UNIVERSITÉ PARIS DAUPHINE
D.F.R. SCIENCES DES ORGANISATIONS

No. attribué par la bibliothèque

THESE

Pour l'obtention du titre de
DOCTEUR EN INFORMATIQUE
(Arrêté du 7 Août 2006)
spécialité : informatique

CARTOGRAPHIE DÉCISIONNELLE MULTICRITÈRE : FORMALISATION ET IMPLÉMENTATION INFORMATIQUE

Salem CHAKHAR

JURY

Directeurs de thèse : **Vincent MOUSSEAU**
LAMSADE, Université Paris Dauphine

Bernard ROY
LAMSADE, Université Paris Dauphine

Rapporteurs : **Claudia BAUZER-MEDEIROS**
Institute of Computing, University of Campinas

Robert LAURINI
LIRIS - INSA de Lyon

Suffrageants : **Denis BOUYSSOU**
CNRS-LAMSADE, Université Paris Dauphine

Philippe RIGAUX
LAMSADE, Université Paris Dauphine

Stefano SPACCAPIETRA
École Polytechnique Fédérale de Lausanne

Présentée et soutenue publiquement le 7 Décembre 2006

L’université n’entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses : ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.

À mon père, à ma mère,
À mes soeurs et frères,
À mes grands parents.

Remerciements

Mes vifs remerciements vont d'abord à mes directeurs de thèse, les professeurs Vincent MOUSSEAU et Bernard ROY, pour leur suivi, soutien et conseils judicieux tout au long de cette thèse.

Mes meilleurs remerciements vont aux professeurs Claudia BAUZER-MEDEIROS et Robert LAURINI d'avoir accepter de rapporter ce travail de recherche. Le professeur Claudia BAUZER-MEDEIROS était également membre de mon jury de pré-soutenance. Ses conseils, remarques et critiques mon permis d'améliorer considérablement ce document. Je la remercie encore une fois.

Mes remerciements vont également aux professeurs Denis BOUYSSOU, Philippe RIGAUX et Stefano SPACCAPIETRA d'avoir accepter de faire partie du mon jury de thèse. Les conseils, remarques et critiques des professeurs Denis BOUYSSOU et Stefano SPACCAPIETRA lors de ma pré-soutenance étaient très utiles pour améliorer la qualité de ce travail de recherche. Je les remercie encore une fois.

Mes meilleurs remerciements vont au professeur Philippe VINCKE qui était membre de mon jury de pré-soutenance. Ses conseils, remarques et critiques mon permis d'améliorer considérablement ce document.

Je remercie infiniment le professeur Rafik BOUAZIZ pour ses encouragements et soutien morale durant toute la période de la réalisation de ce travail de recherche. Le professeur Rafik BOUAZIZ m'as enseigné pendant mes premières années d'étude universitaire. J'ai énormément appris de lui. Je le remercie encore une fois.

Des enseignant qui m'ont marqué par leur competence, discipline, et gentillesse : Mr. Dhaoui MOUSSA, Mr. Abdelaziz BEN ABDALLAH, Mr. BOUCHNAG, Mr. Sami BACHA, Prof. Rafik BOUAZIZ et Prof. Mohamed HOAURI.

J'ai passé mes deux premières années au LAMSADE dans le bureau de Professeurs Vincent MOUSSEAU et Alexis TSOUKIÀS. Je les en remercie tout deux.

L'aide bibliographique des Professeurs Kelly K.L. CHAN, K. Chris KIRBY, Pekka KORHONEN, Amor LAARIBI, Jean-Marc MARTEL et Jacques TEGHEM m'a été très précieuse. Je les remercie tous.

Des discussions avec le professeur José FIGUEIRA et le Dr. Hassene AISSI m'ont permis d'améliorer la première partie du chapitre 6 de ce document. Je les en remercie tous les deux.

Les commentaires de Dr. Maude MANOUVRIER sur une première version de la modélisation orientée objet donnée à la fin du cinquième chapitre m'ont aidé considérablement à l'améliorer. Je le en remercie infiniment.

Je remercie également Dr. Marie-José BELLOSTA-TOURTIER et Dr. Inès SAAD pour leurs commentaires sur le modèle UML donné dans le cinquième chapitre.

Ce rapport à bénéficier des corrections des : Dr. Mohamed Ali ALOULOU, Samia BEN SAID, Prof. Rafik BOUAZIZ, Sonia GUÉHIS, Dr. Bernard HUGUENEY, Dr. Maude MANOUVRIER, Dr. Lydna MOKDAD, Nabila OUERDANE, Wassila OUERDANE, Dominique QUADRI, Nabila REMLI, Sonia TOUBALINE, Donia TRABELSI et Samir YOUCEF. Je les remercie tous.

Mes meilleurs amis : Fethi TOUATI, Samir DAAS, Abdelkader TELMOUDI.

Mes amis : Hassene AISSI, Chérifa BACHA, Meriem KALLEL, Fernando PEREIRA, Costanzo PROCACCINI, Clara PUSCEDDU.

Mes sincères reconnaissances à Rim KALAI et Wassila OUERDANE qui m'ont aidé énormément à être mieux organisé. L'aide de Wassila OUERDANE durant ces derniers mois m'a été très utile. Je le en remercie très chaleureusement.

Mes remerciement vont également à tous les membres du LAMSADE.

Je remercie infiniment mon frère Ashour de m'avoir aider à corriger les versions anglaises de plusieurs chapitres de cette thèse qui ont été publiés.

L'aide financière de mon oncle Ahmed m'a été très utile pour achever à bien ce travail de recherche. Qu'il trouve ici mes sincères remerciements.

Il se peut que j'ai oublié quelques personnes qui m'ont aidé toute au long de ce travail de recherche. Qu'ils retrouvent ici mes meilleures reconnaissances et mes sincères et profondes excuses.

Table des matières

Table des matières **1**

Table des figures **5**

Liste des tableaux **8**

Introduction générale **9**

1 Cartographie décisionnelle multicritère **14**
1.1 Introduction 14
1.2 Spécificités des problèmes spatiaux 16
1.2.1 Facteurs de complexité des problèmes spatiaux 16
1.2.2 Nature multicritère des problèmes spatiaux 18
1.3 Système d'information géographique et analyse spatiale 19
1.3.1 Système d'information géographique 19
1.3.2 Capacités analytiques des SIG 26
1.3.3 Limites du SIG en aide à la décision spatiale 28
1.4 Aide multicritère à la décision 30
1.4.1 Aide à la décision 31
1.4.2 Définition de l'aide multicritère à la décision 32
1.4.3 Notion de problématique de décision 33
1.4.4 Aperçu général sur les méthodes d'analyse multicritère 35
1.4.5 Formulation multicritère d'un problème de décision 36
1.4.6 Démarche multicritère 37
1.4.7 Analyse multicritère et aide à la décision spatiale 38
1.5 Intégration du SIG et de l'analyse multicritère 39
1.5.1 Nécessité de l'intégration SIG-AMC 40
1.5.2 Schéma conceptuel, modes et directions d'intégration 41
1.5.3 État de l'art concernant l'intégration SIG-AMC 45
1.6 Limites des travaux d'intégration SIG-AMC 50
1.7 Conclusion 52

2 Stratégie d'intégration SIG-AMC **53**
2.1 Introduction 53
2.2 Schémas généraux des méthodes multicritères 54
2.2.1 Méthodes discrètes 54
2.2.2 Méthodes continues 56
2.3 Schéma général de la stratégie proposée 58
2.4 Fonctions d'évaluation multicritère 59
2.4.1 Définition/Génération des actions 60
2.4.2 Construction des cartes critères 64
2.4.3 Définition/Génération des objectifs et des attributs 68
2.4.4 Définition du programme mathématique 69
2.4.5 Résolution d'un programme mathématique 72
2.4.6 Génération du tableau de performance 72
2.4.7 Quantification 73
2.4.8 Normalisation 73
2.4.9 Préanalyse de dominance 74
2.4.10 Génération des actions "acceptables" 75
2.4.11 Élicitation des préférences 77
2.4.12 Pondération des critères d'évaluation 79
2.4.13 Analyse de sensibilité/de robustesse 80
2.4.14 Agrégation 81
2.4.15 Construction de la prescription 83
2.5 Exemple didactique 85
2.6 Regard sur la stratégie proposée 87
2.7 Conclusion 90

3 Module à base de règles pour le choix de la procédure d'agrégation **91**
3.1 Introduction 91
3.2 Nécessité et importance du choix de la PAMC 93
3.3 État de l'art sur le problème de choix de la PAMC 93
3.4 Principe de la solution proposée 98
3.5 Caractérisation de la situation décisionnelle 99
3.5.1 Caractérisation des problèmes de décision à référence spatiale 99
3.5.2 Caractérisation du décideur 106
3.5.3 Caractérisation des méthodes d'analyse multicritère 109
3.6 Description conceptuelle du module 118
3.6.1 Quantification des méthodes multicritères et de la situation décisionnelle 118
3.6.2 Conception des questions et représentation des réponses 118
3.6.3 Stratégie pour l'identification de la méthode 120
3.6.4 Conception et construction de la base des connaissances 121
3.7 Regard sur l'approche adoptée 127
3.8 Conclusion 129

4 Méthodologie pour la cartographie décisionnelle multicritère 130
4.1 Introduction . . . 130
4.2 Quelques relations topologiques . . . 132
4.3 Concept de la carte décisionnelle . . . 134
4.4 Méthodologie proposée . . . 136
4.4.1 Phase I : Construction d'une carte décisionnelle . . . 137
4.4.2 Phase II. Exploitation . . . 145
4.5 Solutions proposées pour la construction des actions atomiques . . . 150
4.5.1 Construction des actions ponctuelles . . . 151
4.5.2 Construction des actions linéaires . . . 151
4.5.3 Construction des actions polygonales . . . 154
4.6 Construction des actions composées . . . 156
4.7 Regard sur la méthodologie proposée . . . 159
4.7.1 Cartographie décisionnelle *vs* modélisation cartographique . . . 159
4.7.2 Comparaison avec d'autres travaux . . . 162
4.7.3 Extension du concept de la carte décisionnelle . . . 164
4.8 Conclusion . . . 166

5 Algèbre pour la modélisation spatiale multicritère 167
5.1 Introduction . . . 167
5.2 Algèbre des cartes : Principe, limites et différentes extensions . . . 168
5.3 Primitives et définitions . . . 174
5.4 Spécification formelle de types de données élémentaires . . . 176
5.4.1 Spécification du type de données `gPoint` . . . 177
5.4.2 Spécification du type de données `gLine` . . . 178
5.4.3 Spécification du type de données `gPolygon` . . . 179
5.4.4 Spécification du type de données `map-layer` . . . 180
5.4.5 Spécification du type de données `aOperator` . . . 180
5.4.6 Spécification de type de données `dTable` . . . 181
5.4.7 Spécification du type de données `aList` . . . 183
5.5 Spécification formelle de l'algèbre . . . 184
5.5.1 Spécification de type de données `sUnit` . . . 184
5.5.2 Spécification du type de données `decision-map` . . . 186
5.5.3 Spécification du type de données `criterion-map` . . . 187
5.5.4 Spécification du type de données `pStructure` . . . 188
5.5.5 Spécification du type de données `sd-model` . . . 189
5.5.6 Spécification du type de données `mcap` . . . 192
5.6 Vers une implémentation orientée objet . . . 193
5.7 Regard sur l'algèbre proposée . . . 198
5.8 Conclusion . . . 202

11 Implémentation informatique et application au problème de génération des corridors 203
11.1 Introduction 203
11.2 Formulation du problème de génération des corridors 204
11.3 Description du prototype 206
11.3.1 Module d'évaluation multicritère 207
11.3.2 Module de génération de la carte décisionnelle 208
11.3.3 Module d'inférence des paramètres de préférence 208
11.4 Application au problème de génération des corridors 212
11.4.1 Construction des cartes critères 213
11.4.2 Construction d'une carte décisionnelle 214
11.4.3 Application de la version révisée de l'algorithme de Martins 218
11.5 Étude comparative 219
11.6 Conclusion 221

Conclusion générale 222

Bibliographie 227

Glossaire 262

Annexes 265

A Construction de la prescription dans le cadre de l'approche de surclassement de synthèse 266
A.1 Construction de la prescription dans le cadre de $P.\alpha$ 266
A.1.1 Représentation d'une relation de surclassement par un graphe 267
A.1.2 Exploitation d'une seule relation de surclassement exacte : cas transitif 268
A.1.3 Exploitation d'une seule relation de surclassement exacte : cas général . 268
A.1.4 Exploitation de plusieurs relations exactes et imbriquées ou d'une seule relation floue 269
A.2 Construction de la prescription dans le cadre de $P.\gamma$ 269
A.2.1 Exploitation d'une relation de surclassement exacte 269
A.2.2 Exploitation de plusieurs relations de surclassement exactes et imbriquées 270
A.2.3 Exploitation d'une seule relation floue 270

B Relations entre questions, réponses et caractéristiques de la situation décisionnelle 271

C Méthode ELECTRE TRI 273

D Programmes mathématiques d'inférence 275
D.1 Notations 275
D.2 Programme mathématique pour l'inférence globale 275
D.3 Programme mathématique pour l'inférence des poids k_i et du seuil de coupe λ . 276
D.4 Programme mathématique pour l'inférence du seuil du veto v_j 276

D.5 Programme mathématique pour l'inférence des profils limites b_h 276

E Version révisée de l'algorithme "label setting" de Martins 277
E.1 Notions préliminaires 277
E.1.1 Définitions 277
E.1.2 Plus court chemin multi-objectifs 278
E.1.3 Algorithme de Martins 278
E.2 Version révisée de l'algorithme de Martins 279

F Solveur GLPK 281
F.1 Présentation du solveur GLPK 281
F.2 Comment utiliser GLPK ? 282

G Structures des fichiers d'entrée et de sortie pour GLPK et IRIS 285
G.1 Fichier "input.txt" pour GLPK 285
G.2 Fichier "output.txt" pour GLPK 286
G.3 Fichier "input.tri" pour IRIS 286
G.4 Fichier "output.rpt" pour IRIS 288

Table des figures

1.1 Structure d'un SIG—*Source* : Malczewski (1999), p. 17 20
1.2 Spécification formelle des TAD spatiaux `gPolygon`, `gLine`, et `gPoint` . . . 24
1.3 Représentation des points, lignes et polygones en modes raster et vecteur 25
1.4 Représentation d'une couche 26
1.5 Différentes démarches d'analyse multicritère—(a) démarche *bottom-up* de B. Roy (b) démarche *top-down* de R. Kenney, et (c) démarche intermédiaire de A. Laaribi 38
1.6 Schéma conceptuel d'intégration SIG-AMC 41
1.7 Différents modes d'intégration SIG-AMC—(a) Intégration indirecte, (b) Intégration encastrée, et (c) Intégration complète 43
1.8 Représentation schématique de l'interaction SIG-AMC—inspiré de Church et *al*. (2000) 44

2.1 Schéma général des méthodes discrètes (a) et des méthodes continues (b) . . . 55
2.2 Schéma général de la stratégie proposée 59
2.3 Ensemble des actions—(a) discret, (b) continu avec un nombre réduit d'actions, et (c) continu avec un nombre très élevé d'actions 63
2.4 Deux représentations schématiques d'une carte critère—(a) type *raster*, (b) type vecteur 67
2.5 Exemple d'un diagramme de flux 68
2.6 Exemple d'une structure hiérarchique 69
2.7 Espace de décision (gauche) et espace des critères (droite) 71
2.8 Représentation schématique du tableau de performance 72
2.9 Exemple illustratif 87
2.10 Relations de précédence/succession pour une méthode discrète 88
2.11 Relations de précédence/succession pour une méthode continue 89

3.1 Principe de la solution proposée 98
3.2 Caractéristiques des problèmes de décision à référence spatiale 100
3.3 Caractéristiques du décideur 108
3.4 Caractéristiques communes aux méthodes d'analyse multicritère 110
3.5 Caractéristiques des méthodes multicritères discrètes 112
3.6 Caractéristiques communes aux méthodes continues 114
3.7 Caractéristiques des méthodes interactives 117

3.8 Stratégie pour la recherche de la méthode la plus appropriée 121
3.9 Définition d'un fait du groupe "General" 122
3.10 Définition d'un fait du groupe "Discrete" 123
3.11 Définition d'un fait du groupe "Continuous" 123
3.12 Définition d'un fait du groupe "Interactive" 124
3.13 Définition d'un fait du groupe "Response" 124
3.14 Définition d'un fait du groupe "Characteristic-Question" 125
3.15 Définition d'un fait du groupe "Question-Question" 125
3.16 Définition d'un fait du groupe "Fact-Class" 125
3.17 Définition du fait "Initialize" 126
3.18 Un exemple d'une règle de production 126
3.19 Règle "Get-Question" 127
3.20 Règle d'initialisation 127
3.21 Règle de génération du résultat final 127

4.1 Schéma général de la méthodologie proposée 136
4.2 Représentation schématique du processus de génération d'une carte décisionnelle 137
4.3 Représentation schématique de l'opération d'union 138
4.4 Définition des catégories par des profils limites 141
4.5 Schéma général de la procédure d'inférence (Mousseau, 2003) 144
4.6 Représentation schématique de la phase d'exploitation 146
4.7 Représentation hiérarchique d'une carte décisionnelle 148
4.8 Illustration du problème de définition des évaluations partielles pour une action de type linéaire 149
4.9 Exemple d'une carte décisionnelle 153
4.10 Graphe de connexité 153
4.11 Représentation schématique de l'arborescence T 155
4.12 Solution d'un problème de zonage 156
4.13 Modélisation des problèmes spatiaux impliquant des actions composées 157
4.14 Représentation schématique du problème de localisation-affectation 158
4.15 Modélisation cartographique classique 161
4.16 Carte décisionnelle composite : Approche 1 165
4.17 Carte décisionnelles composite : Approche 2 165

5.1 Les opérations de l'Algèbre des cartes—locale (a), zonale (b), augmentation (c) et focale (d) (inspiré de Stefanakis (2001)) 170
5.2 Procédure en Algèbre des cartes—*Source* : Tomlin (1990), p. 53 171
5.3 Transformation d'une carte vectorielle par un scalaire—Ici : $B = A \times 3$ 172
5.4 Les relations entre les différents types de données 175
5.5 Spécification formelle du type de données `gPoint` 178
5.6 Spécification formelle du type de données `gLine` 179
5.7 Spécification formelle du type de données `gPolygon` 180
5.8 Spécification formelle du type de données `map-layer` 181
5.9 Spécification formelle de type de données `aOperator` 181

5.10 Spécification formelle du type de données `dTable` 183
5.11 Spécification formelle du type de donnée `aList`. 183
5.12 Spécification formelle de type de données `sUnit`. 185
5.13 Spécification formelle du type de données `decision-map` 187
5.14 Spécification formelle du type de données `criterion-map`. 188
5.15 Spécification formelle du type de données `pStructure` 189
5.16 Spécification formelle du type de données `sd-model` 191
5.17 Spécification formelle du type de données `mcap` 193
5.18 Définition de la classe `gPoint` 194
5.19 Définition de la classe `map-layer` 195
5.20 Définition de la classe `criterion-map` 196
5.21 Définition de la classe `sUnit` (*suite*) 198

11.1 Schéma de transformation du graphe G' 205
11.2 Architecture du prototype 206
11.3 Interface pour la génération d'une carte critère 207
11.4 Interface pour la génération d'une carte décisionnelle 208
11.5 Architecture du module d'inférence 209
11.6 Interface pour l'introduction d'un exemple d'affectation 210
11.7 Interface pour l'introduction des paramètres de préférence 210
11.8 Carte critère "Niveau d'emploie" 214
11.9 Carte intermédiaire 215
11.10 Exemples d'affectation 216
11.11 Carte décisionnelle avant regroupement 217
11.12 Carte décisionnelle après regroupement 217
11.13 Chemins efficaces 218

A.1 Représentation graphique des relations binaires de préférence, d'indifférence et d'incomparabilité 267
A.2 Représentation graphique d'une relation de surclassement exacte (Vanderpooten, 1990, p.188) 267
A.3 Représentation graphique d'une relation de surclassement floue (Vanderpooten, 1990, p.188) 268

E.1 Représentation schématique de deux étiquettes 279

Liste des tableaux

1.1 Significations de quelques termes communs au SIG et à l'AMC 16
1.2 Les différentes problématiques de décision 34

2.1 Quelques caractéristiques des méthodes discrètes et des méthodes continues . . 57
2.2 Fonctions d'évaluation multicritère—D : Méthodes discrètes, C : Méthodes continues 60
2.3 Différents paramètres de préférence 79

3.1 Liste des caractéristiques relatives aux problèmes de décision à référence spatiale 119
3.2 Liste des caractéristiques relatives au décideur 119
3.3 Questions relatives aux caractéristiques des problèmes de décision à référence spatiale 120
3.4 Questions relatives aux caractéristiques du décideur 120

4.1 Modélisation des actions potentielles spatiales 147
4.2 Algorithmes pour la génération des actions composées. 159

5.1 Exemple d'une table de décision 182
5.2 Table de décision associée avec l'opérateur `PCONCORDANCE` 185
5.3 Table de décision associée avec l'opérateur `PDISCORDANCE` 186
5.4 Table de décision associée avec l'opérateur `OUTRANK` 186
5.5 Table de décision `wTable` associée avec la fonction `WEIGHT` 197
5.6 Table de décision `sTable` associée avec la fonction `SLICE` 197
5.7 Correspondance entre les fonctions d'EMC et les opérateurs de DMA 199
5.8 Correspondance entre la méthodologie de cartographie décisionnelle et DMA . 199

11.1 Différent types de problèmes possibles 206
11.2 Valeurs des paramètres de préférence fixes 215
11.3 Résultats de l'inférence 216
11.4 Les paramètres de l'algorithme `GROUPEMENT` 217

B.1 Relation Questions-Réponses-Caractéristiques du décideur 271
B.2 Relation Questions-Réponses-Caractéristiques des problèmes de décision à référence spatiale 272

Introduction générale

Les SIG, *systèmes d'information géographiques*, stockent des données géo-référencées dans des bases de données géographiques, ouvrant ainsi de grandes potentialités en terme d'exploitation. Une utilisation fréquente des SIG concerne la prise de décision à référence spatiale. En effet, les SIG, par leur capacité dans le stockage, la gestion, l'analyse, la modélisation et l'affichage de données à référence spatiale, se présentent comme l'outil le plus adéquat pour appréhender les problèmes de décision à référence spatiale. Néanmoins, la technologie SIG actuelle souffre encore de plusieurs lacunes dues en grande partie à un manque de capacités analytiques capables de supporter les problèmes spatiaux. La solution la plus diffusée pour faire évoluer les SIG vers un vrai outil d'aide à la décision est de les coupler avec les outils de la recherche opérationnelle et en particulier avec l'*analyse multicritère* (AMC). En effet, l'AMC offre à l'évidence plusieurs avantages au niveau de la prise de décision lorsque l'on doit prendre en compte des intérêts conflictuels. Elle apporte le support nécessaire pour combler ces lacunes. Cette solution est également adoptée dans le cadre de ce travail de recherche.

Problématique

De nombreux travaux d'intégration SIG-AMC ont été publiés depuis le début des années 1990 (cf. Malczewski (2006)). Cependant, nous avons pu identifier, à partir de la littérature, plusieurs limites dans ces travaux, ce qui les empêchent d'être diffusés au delà du cadre académique.

1. *Intégration indirecte ou encastrée*. La plupart de ces travaux procèdent (i) soit par une intégration indirecte, où deux outils, un SIG et un logiciel d'AMC, échangent données et résultats via un système intermédiaire, (ii) soit par une intégration encastrée où les deux logiciels restent indépendants mais une seule interface (le plus souvent celle du SIG) est utilisée. Ce dernier mode est une première étape vers une intégration efficace où l'utilisation des fonctionnalités d'analyse multicritère est plus facile que le mode indirecte. Cependant, le fait que les données soient stockées indépendamment, la souplesse d'exploitation et l'interactivité restent toujours problématiques.

2. *Intégration d'une seule ou un nombre limité de méthodes dans le SIG*. C'est le cas de la majorité des travaux d'intégration SIG-AMC. Cependant chaque méthode multicritère possède ses avantages et ses inconvénients de telle sorte qu'une méthode peut être appliquée dans un

type particulier de problèmes mais pas dans d'autres. De ce fait, la nécessité d'incorporer un grand nombre de méthodes d'analyse multicritère dans le SIG semble être une nécessité, vu la "démocratisation" de la technologie SIG et la diversité des problèmes auxquels cette technologie devra faire face dans le futur.

3. *Choix de la méthode multicritère à appliquer*. Dans la plupart des applications de l'AMC, le choix de la méthode à utiliser se fait de manière assez arbitraire : on opte pour celle maîtrisée par l'analyste, celle développée de manière *ad hoc* ou encore tout simplement celle disponible sous forme d'un logiciel. Malgré l'existence de plusieurs travaux concernant le problème du choix de la méthode à utiliser dans un problème particulier, il n'existe que très peu de recherches qui ont été accomplies dans une perspective d'intégration dans un SIG.

4. *Intégration des méthodes du critère unique de synthèse*. Comparativement aux méthodes du critère unique de synthèse, les méthodes de surclassement de synthèse ont reçu peu d'attention dans les travaux d'intégration SIG-AMC. Or, ces méthodes sont généralement mieux adaptées aux problèmes de décision sur le territoire dans le sens où elles permettent de prendre en compte l'aspect ordinal de ces problèmes.

5. *Connaissance approfondie du SIG et de l'AMC*. Malgré le nombre relativement important de travaux d'intégration SIG-AMC, leur utilisation en pratique reste limitée et le plus souvent ne dépasse pas le cadre de la recherche universitaire. Cette situation est due au moins aux deux raisons suivantes : (i) l'utilisation de tels outils exige une bonne connaissance du SIG et de l'AMC ; (ii) la spécificité de chaque problème de décision fait qu'il n'est pas possible de "transporter" un système développé pour un problème donné pour être exploité dans un autre problème.

Objectif et contributions

L'utilité des SIG et de l'AMC, chacun dans son domaine, est bien reconnue. Si la "démocratisation" de la technologie SIG a permis d'étendre le champ d'application de celui-ci, il s'est avéré nécessaire de diversifier les techniques d'analyse et de modélisation disponibles dans les SIG, y compris celles de l'AMC. Un nombre croissant de travaux d'intégration SIG-AMC fait l'objet de publication chaque année. Mais à cause des lacunes énoncées dans la problématique, la diffusion des travaux d'intégration SIG-AMC reste limitée. Notre objectif dans cette recherche consiste à apporter des solutions conceptuelles, méthodologiques et informatiques à ces différentes limites. Plus spécifiquement, nous proposons :

1. *Une stratégie d'intégration SIG-AMC*. L'idée de base de cette stratégie consiste à intégrer dans le SIG non pas une ou plusieurs méthodes d'analyse multicritère, mais plutôt un ensemble restreint de fonctions d'évaluation multicritère. Ces fonctions représentent les opérations élémentaires nécessaires à l'implémentation des méthodes multicritères. Cette stratégie permet de répondre aux exigences permettant d'éviter les deux premières limites des travaux d'intégration SIG-AMC.

2. *Un module à base de règles pour le choix de la procédure d'agrégation à appliquer*. En s'appuyant sur une base de connaissances concernant les caractéristiques des méthodes d'AMC et selon les spécificités du problème considéré, le module utilisera une collection de règles pour proposer au décideur la ou les méthodes les plus appropriées à ce problème.

3. *Une méthodologie pour la cartographie décisionnelle multicritère*. Cette méthodologie est basée sur le concept de la carte décisionnelle, i.e., une subdivision planaire du domaine d'étude, obtenue par la combinaison d'un ensemble de cartes critères. Le résultat est un ensemble d'unités spatiales homogènes et disjointes qui seront alors utilisées pour construire les actions potentielles ponctuelles, linéaires ou surfaciques comme une unité spatiale individuelle, une collection d'unité spatiales adjacentes linéairement ou une collection d'unités spatiales contiguës, respectivement. Ceci permet de réduire considérablement le nombre d'actions et de rendre possible l'utilisation des méthodes multicritères aussi bien de surclassement de synthèse que du critère unique de synthèse.

4. *Une algèbre destinée à la modélisation spatiale multicritère*. Cette algèbre, inspirée de l'Algèbre des cartes de Tomlin (1990), représente une formalisation à la fois de la stratégie d'intégration SIG-AMC et la méthodologie de cartographie décisionnelle multicritère. Elle permet de surpasser la cinquième limite, dans le sens où elle n'exige pas une connaissance approfondie du SIG et de l'AMC.

5. *Une application au problème de génération des corridors*. Afin de valider les solutions proposées dans le cadre de ce travail de recherche, nous avons développé un prototype qui a été appliqué à un problème hypothétique de génération des corridors en utilisant des données réelles relatives à la région Ile-de-France.

Structure du document

Ce document comporte six chapitres dont une brève description est ci-après donnée :

Chapitre 1. *Cartographie décisionnelle multicritère*. Dans ce premier chapitre de mise en contexte, nous commençons par identifier les spécificités des problèmes de décision à référence spatiale. Puis, nous introduisons les deux champs d'études : les systèmes d'information géographiques et l'analyse multicritère. Nous présentons par la suite un extrait des travaux d'intégration SIG-AMC. Nous terminons ce chapitre par dresser une liste des limites dans ces travaux.

Chapitre 2. *Stratégie d'intégration SIG-AMC*. Dans ce chapitre, nous proposons une stratégie d'intégration SIG-AMC. Nous présentons les schémas des méthodes d'AMC. Puis nous identifions et détaillons les différentes fonctions d'évaluation multicritère. Un exemple didactique sera également donné en fin de chapitre.

Chapitre 3. *Module à base de règles pour le choix de la procédure d'agrégation*. Dans la première partie de ce chapitre, nous commençons par énumérer quelques éléments montrant la nécessité et l'importance de l'opération du choix de la procédure d'agrégation multicritère (PAMC). Nous présentons ensuite l'état de l'art concernant le problème du choix de la PAMC. Dans la seconde partie du chapitre, nous détaillons la solution proposée.

Chapitre 4. *Méthodologie pour la cartographie décisionnelle multicritère*. Après l'introduction de quelques relations topologiques et la définition du concept de la carte décisionnelle, nous détaillons la méthodologie proposée. Nous procédons ensuite, successivement, à l'introduction des solutions proposées pour la génération des actions potentielles et à la comparaison de la méthodologie proposée par rapport à la modélisation cartographique classique. Enfin, nous terminons le chapitre en présentant quelques extensions du concept de la carte décisionnelle.

Chapitre 5. *Algèbre pour la modélisation spatiale multicritère*. Nous abordons d'abord l'Algèbre des cartes de Tomlin, ses limites et ses différentes extensions. Puis, nous introduisons les différentes primitives de l'algèbre proposée. Ensuite, nous présentons les spécifications formelles de l'algèbre proposée. Nous terminons le chapitre par introduire une modélisation orientée objet de cette algèbre.

Chapitre 6. *Implémentation informatique et application au problème de génération des corridors*. La première partie de ce dernier chapitre comporte une présentation d'une application des solutions proposées au problème de génération des corridors. La seconde partie est consacrée à la description du prototype développé.

Chapitre 1

Cartographie décisionnelle multicritère

Les problèmes de décision à référence spatiale sont complexes et de nature multicritère. Le traitement de ces problèmes requiert un ensemble de données géo-référencées comme entrée (input). Le système d'information géographique (SIG), par sa capacité dans le stockage, la gestion, l'analyse, la modélisation et l'affichage de données à référence spatiale, se présente comme l'outil le plus adéquat pour appréhender ces problèmes. Néanmoins, la technologie SIG actuelle souffre encore de plusieurs lacunes concernant essentiellement l'absence des capacités analytiques capables de supporter la nature multicritère des problèmes spatiaux. L'analyse multicritère offre à l'évidence plusieurs avantages au niveau de la prise de décision lorsqu'il doit être tenu compte d'intérêts conflictuels. Elle peut donc apporter le support nécessaire pour combler ces lacunes comme l'illustre les travaux d'intégration SIG-AMC publiés depuis le début des années 1990. Cependant ces travaux présentent plusieurs limites qui les empêchent de se diffuser au delà du cadre académique. Dans ce premier chapitre, nous introduisons les deux champs d'études, à savoir les SIG et l'AMC. Ensuite, nous présentons une sélection des travaux d'intégration SIG-AMC. Nous terminons le chapitre par donner une liste de cinq limites qui seront abordées dans les chapitres suivants.

1.1 Introduction

Malczewski (1999) estime que 80% des problèmes de décision qu'un individu doit faire face présentent une connotation spatiale. Ces *problèmes de décision à référence spatiale*[1] varient de simples activités quotidiennes, comme par exemple le choix d'un itinéraire pour aller d'un lieu à un autre, à des décisions plus complexes impliquant un grand nombre de personnes, d'associations et de groupes socio-économiques. La dimension spatiale de ces problèmes peut

[1]Dans ce document, nous utiliserons indifféremment les termes "problème de décision à référence spatiale", "problème décisionnel à référence spatiale", "problème de décision spatial" ou simplement "problème spatial".

être prise en compte ou non, selon sa pertinence dans l'évaluation et la comparaison de différentes alternatives d'action et selon les objectifs recherchés. Dans le cadre de cette thèse, on s'intéresse aux problèmes de décision dont l'espace géographique constitue un élément prépondérant en tant que milieu de vie, d'activité et d'intervention de plusieurs groupes socio-économiques, et en tant que support d'évaluation et lieu d'implémentation de toute décision. Ces problèmes sont généralement mal définis et se diffèrent des autres problèmes (dits "aspatiaux") en plusieurs aspects :

- les problèmes décisionnels concernant le territoire abordent toujours une situation existante ; ils n'opèrent pas dans un environnement nouveau, comme c'est la cas avec des décisions aspatiales. On est donc amené à tenir compte de l'existant (populations, infrastructure, équipement, etc.), qui est généralement hétérogène et complexe (Laaribi, 2000),
- les décisions sur le territoire concernent des entités spatiales dont les contours peuvent être difficiles à discerner (Ding et Fotheringham, 1992),
- les conséquences et impacts d'une décision spatiale sur le territoire sont d'une portée rarement locale (Chevalier, 1994) mais plutôt dispersés aussi bien dans l'espace que dans le temps,
- chaque décision est évaluée sur la base de plusieurs critères qui peuvent être quantitatifs ou qualitatifs,
- ces critères sont souvent définis sur des échelles de mesure différentes (i.e. non commensurables), et d'inégale importance,
- ces critères sont assez souvent conflictuels de tel sorte qui'il n'existe pas de solutions optimisant simultanément tous les critères. Le décideur doit par conséquent trouver des solutions de compromis,
- généralement plusieurs décideurs ou groupes d'intérêt sont impliqués dans la prise de décision,
- ces décideurs et groupes d'intérêt ont souvent des préférences divergentes et des objectifs conflictuels.

Toutes ces caractéristiques rendent ces problèmes plus complexes et les confèrent une nature multicritère inhérente. Le traitement de ces problèmes requiert un ensemble de données géo-référencées comme entrée (*input*). Le SIG (*système d'information géographique*), par sa capacité dans le stockage, la gestion, l'analyse, la modélisation et l'affichage de données à référence spatiale, se présente comme l'outil le plus adéquat pour appréhender les problèmes de décision à référence spatiale. Néanmoins, la technologie SIG actuelle, malgré le progrès technologique réalisé ces dernières années, possède plusieurs lacunes concernant essentiellement l'absence des capacités analytiques capables de supporter la nature multicritère des problèmes spatiaux. Plusieurs tentatives ont été menées dans l'objectif de faire évoluer les SIG vers des vrais outils d'aide à la décision. La solution la plus diffusée consiste en l'intégration de différentes techniques et outils de recherche opérationnelle et d'informatique (*computing tools*) dans le SIG.

Parmi ces outils, l'*analyse multicritère* (AMC) offre à l'évidence plusieurs avantages au niveau de la prise de décision lorsqu'il doit être tenu compte d'intérêts conflictuels. La potentialité d'une intégration entre SIG et AMC est illustrée par le nombre croissant de travaux publiés depuis 1990. Récemment, Malczewski (2006) a répertorié pas moins de 319 articles qui ont été publiés entre 1990 et 2004 concernant l'intégration SIG-AMC. Cependant ces travaux présentent plusieurs limites—que nous allons exposer à la fin de ce chapitre—qui les empêchent de se diffuser au delà du cadre académique.
Dans la section qui suit, nous identifions les différents facteurs de complexité des problèmes spatiaux et les éléments leur conférant une nature multicritère inhérente. Dans les troisième et quatrième sections, nous introduisons très brièvement les deux champs d'étude : SIG et AMC. Nous présentons l'état de l'art concernant les travaux d'intégration SIG-AMC dans la cinquième section. Nous clôturons le chapitre par dresser une liste de limites de travaux d'intégration SIG-AMC.
Notons enfin que plusieurs termes couramment mentionnés dans ce document sont utilisés aussi bien dans le domaine du SIG que celui de l'AMC. Cependant, ces termes n'ont pas la même signification. Pour éviter tout risque de confusion, nous avons listé dans le Tableau 1.1 les différents termes et avec, pour chacun, ses significations en SIG et en AMC.

Concept	**SIG**	**AMC**
Attribut (*Attribute*)	(i) Une propriété ou caractéristique permettant de décrire une entité spatiale ; (ii) Un champ de données.	Un moyen pour mesurer l'achèvement d'un objectif, i.e., une direction traduisant une perspective de changement d'état pour obtenir le système souhaité par le décideur.
Échelle (*Scale*)	Échelle de la carte qui représente le rapport entre la longueur mesurée sur une carte ou un plan et la longueur réelle.	Échelle de mesure qui peut être nominale, ordinale ou cardinale.
Agrégation (*Aggregation*)	(i) Regroupement de plusieurs unités spatiales en éliminant les frontières communes ; (ii) regroupements des unités spatiales en vue d'une analyse statistique spatiale (iii) Combinaison de plusieurs plans d'information.	L'application d'une procédure mathématique permettant d'agréger (en utilisant, par exemple, une somme pondérée) plusieurs évaluations partielles (i.e. relatives à un ensemble de critères d'évaluation) de chaque action en une seule évaluation globale.

TAB. 1.1 – Significations de quelques termes communs au SIG et à l'AMC

1.2 Spécificités des problèmes spatiaux

1.2.1 Facteurs de complexité des problèmes spatiaux

Nous pouvons distinguer quatre types de complexité qui caractérisent les problèmes de décision à référence spatiale :

1. *Complexité liée aux données*. Les entités et phénomènes géographiques sont caractérisés par leurs positions, leurs formes, leurs attributs descriptifs et par les relations topologiques qu'ils entretiennent entre eux. De ce fait, les données associées à ces entités et phénomènes sont *hétérogènes, non-linéaires* (i.e. définies sur plusieurs dimensions) et caractérisées par une *dépendance spatiale* (Anselin, 1989) et *temporelle* leur conférant une nature différente de données

aspatiales conventionnelles. Pour être utilisable en pratique, ces données doivent généralement subir une série de transformations, plus au moins automatiques, dont l'objectif est d'en extraire des informations plus utiles dans le processus de prise de décision. Selon Laaribi (2000), la nature de données à référence spatiale et l'information qui en résulte, ainsi que les relations de dépendance et de proximité spatiale qui les caractérisent font que la plupart de problèmes spatiaux se rapportent à des systèmes hétérogènes complexes.

2. *Complexité conceptuelle*. Les problèmes décisionnels à référence spatiale impliquent des entités et phénomènes (naturels ou artificiels) définis dans un espace de nature continue sous-jacente incitant à des confusions et à des chevauchements dans la définition des concepts et entités spatiaux. Par conséquent, il est souvent difficile de pouvoir diviser le monde réel en un ensemble de classes d'objets définis de manière exacte (Burrough et McDonnell, 1998). En pratique, la conceptualisation de l'espace est largement gouvernée par la catégorie socio-économique à laquelle apparient le concepteur et depend des objectifs de l'étude et du niveau de résolution souhaitée, compliquant ainsi le développement d'outils d'aide à la décision spatiale standards applicables à un large spectre de problèmes spatiaux.

3. *Complexité ontologique et sémantique*. Un autre aspect caractérisant les applications territoriales c'est le fait qu'elles font, de plus en plus, recourt à des données multi-sources dispersées géographiquement et généralement définies séparément sur des systèmes de coordonnées différents. Cette tendance, qui a été renforcée depuis l'avènement d'Internet et qui permet de réduire la redondance de l'information géographique, se confronte, néanmoins, à l'absence d'une base ontologique commune. En effet, l'absence de cette ontologie complexifie l'intégration des données (cf., e.g., Spaccapietra et *al*., 1992 ; Devogele et *al*., 1998), l'interopérabilité (cf., e.g., Laurini, 1998) et limite les possibilités d'interaction et d'échanges de données et de résultats entre des applications conçues séparément (Bishr, 1998 ; Kokla et Kavouras, 2001). À cela s'ajoute une complexité sémantique due aux interprétations différentes qu'un objet ou un phénomène peut avoir : un point, un polygone, ou un ensemble de polygones sont autant des possibilités des représentations conceptuelles d'une ville. Dans ce sens, Bishr (1998) remarque que "les objets géographiques collectés et stockés séparément peuvent varier dans leurs représentations géométriques, dans leurs natures et dans leurs sémantiques, malgré qu'ils désignent le même objet dans le monde réel." La représentation multiple (cf., eg., Rigaux et Scholl, 1994 ; Scholl et *al*., 1996, chap. 5 ; Bauzer-Medeiros et *al*., 1996 ; Spaccapietra et *al*., 2000 ; Rigaux, 2001 ; Bally et *al*., 2004) semble être la meilleure solution pour répondre à cette complexité sémantique.

4. *Complexité technique*. La complexité des problèmes décisionnels à référence spatiale peut découler aussi d'une mauvaise compréhension de la relation entre le problème décisionnel et son espace de solution. Cette *complexité technique*, comme la nomme Hendriks (1995), se manifeste, selon lui, lorsque par exemple il n'est pas clair quels sont les critères relevant dans le problème, la manière dont ces critères sont combinés, quelles sont les mesures possibles, et comment les différentes alternatives d'action sont évaluées et comparées.

1.2.2 Nature multicritère des problèmes spatiaux

Nous avons énuméré dans le paragraphe précédent les différents éléments contribuant à la complexité de problèmes spatiaux. En outre, ces problèmes (i) impliquent plusieurs intervenants dans l'espace, (ii) conjuguent des objectifs non-linéaires et (iii) nécessitent la considération des critères hétérogènes. Nous commentons chacun de ces points dans les trois paragraphes suivants.

1. *Plusieurs intervenants sont impliqués*. Les problèmes de planification et d'aménagement du territoire sont généralement des travaux de grande envergure qui demandent de l'espace pour être implantés. De ce fait, ils impliquent directement une population (Padgett, 1993) de plus en plus avisée par les effets néfastes sur l'environnement et sur la qualité de la vie qui peuvent être engendrés par ces travaux s'ils ne sont pas soigneusement étudiés. Des termes comme NIMBY (i.e. Not In My Back Yard), ou LULUs (i.e. Locally Unwanted Land Uses), ou NOPE (i.e. Not On Planted Earth), ou encore CAVE (Citizens Against Virtually Everything)[2] illustrent bien les difficultés rencontrées dans ces travaux.

2. *Des objectifs conflictuels*. Un autre élément caractérisant les problèmes spatiaux et qui consiste à l'existence d'une multitude d'objectifs dans toute activité d'aménagement intégré du territoire. Cette multiplicité d'objectifs découle directement de la nature multidimensionnelle des problèmes spatiaux. La situation est compliquée par ce que Hendriks (1995) appelle le *contexte social* du problème de décision qui fait que ces objectifs sont généralement conflictuels, reflétant la diversité d'intérêts et préoccupations des intervenants dans le territoire. En effet, la même étendue spatiale est perçue, conçue, formalisée et modélisée différemment par un environnementaliste, un politicien, un économiste, etc. Chacun de ces intervenants dans l'espace détient une perception de l'espace différente selon ses objectifs et ses préoccupations.

3. *Des critères hétérogènes*. Un aménagement intégré du territoire est nécessairement interdisciplinaire exigeant la prise en compte de plusieurs critères de nature quantitative et qualitative, généralement non commensurables—mesurés sur des échelles différentes—et n'ayant pas la même importance. La nécessité de prendre en compte plusieurs critères a été assujettie par de nombreuses lois gouvernementales en matière de l'aménagement du territoire et de la protection de l'environnement. En plus, avec la diversité d'intérêts, il n'est pas toujours aisé d'obtenir un consensus sur la famille de critères à considérer ou d'avoir l'unanimité sur leurs importances respectives aux yeux de tous les intervenants dans le problème.

En somme, les problèmes décisionnels à caractère spatial sont (i) de nature multidimensionnelle, interdisciplinaires et mal définis, (ii) impliquent plusieurs personnes et institutions, ayant généralement des préférences et des objectifs divergeants , (iii) nécessitent la définition de plusieurs critères conflictuels dont l'importance n'est pas la même, et (iv) demandent une quantité considérable de données quantitatives et qualitatives : c'est le champ d'application de l'analyse multicritère.

[2] Voir, par exemple, Heiman (1990), Dear (1992), Frank (1992), Lake (1993), Moor (1994), Couclelis et Monmonnier (1995), et Dente (1995) pour plus de détails sur ces acronymes et sur leurs significations et implications pratiques.

1.3 Système d'information géographique et analyse spatiale

Dans cette section, nous présentons d'abord une brève définition des SIG et une description succincte de leurs caractéristiques ainsi que les principales approches pour la modélisation et la représentation des entités géographiques. Ensuite, nous explicitons quelques capacités analytiques des SIG. Enfin, nous adressons les potentialités et les limites des SIG actuels en aide à la décision à référence spatiale.
Il est impossible de couvrir tous les aspects de la technologie SIG dans ce document. Nous renvoyons cependant le lecteur intéressé à la literature spécialisée. Davis (2001) donne une introduction simplifiée et didactique à la technologie SIG. Pour une introduction plus approfondie, nous pouvons consulter avec intérêt les livres suivants : Peuquet et Marble (1990), Laurini et Thompson (1992), Burrough et McDonnell (1998), Looelney et *al*. (2001), et Chrisman (2002). Concernant l'aspect base de données, une introduction simplifiée est donnée par Scholl et *al*. (1996) et pour approfondir, nous conseillons le livre de Rigaux et *al*. (2002). Pour ce qui est de l'analyse spatiale, nous pouvons consulter les ouvrages suivants : Sanders (2001) et Longley et Batty (2003).

1.3.1 Système d'information géographique

Historiquement, le terme GIS (*geographic information system*) ou SIG (*système d'information géographique*, en français) a été utilisé pour la première fois par Roger Tomlinson en 1963, alors que le premier SIG a été développé au début des années 1960 par Howard T. Fisher de l'Université Harvard. Depuis leurs apparitions au début des années soixante, différents systèmes SIG, de plus en plus sophistiqués, ont vu le jour[3]. Les SIG sont utilisés de façon croissante dans des domaines très variés : urbanisme (établissement de schémas directeurs, aménagement et gestion des plans d'occupation du sol (POS)), études économiques et socio-économiques (population, emploie, logement, "géo-marketing"), planification et aménagement du territoire, gestion des ressources naturelles, protection de l'environnement (gestion des déchets et de la pollution ainsi que des espaces "naturels"), sciences de la terre (géologie, géodésie, pédologie, etc.), applications militaires, gestion de réseaux de transports, de télécommunications et de distribution (eau, gaz, électricité, etc.), agriculture (maîtrise des pollutions agricoles, prévention des incendies et des inondations), environnement, gestion des risques naturels ou technologiques et de la sécurité civile (la lutte contre les risques majeurs et la gestion des moyens d'intervention en cas de crise font de plus en plus appel à la technologie SIG), l'hydrographie et l'océanographie, etc.

Définition et caractéristiques des SIG

Différentes définitions ont été proposées pour le terme SIG, chacune reflète une perspective différente et renvoie à une discipline particulière. Certains focalisent sur l'aspect technologique,

[3]En partant de simples outils dédiés à des applications spécifiques, à des systèmes *desktop* (e.g. Arc/Info et ArcGIS d'ESRI Inc. Redlands, CA), aux logiciels *open source* (GRASS, OSSIM, PostGIS) jusqu'aux systèmes partialement ou totalement fonctionnels sur Internet (e.g. GIS Online (Plewe, 1997), Internet GIS (Peng, 1999 ; Peng et Tsou, 2003), WebGIS (Mathiyalagan et *al*., 2005). (cf. Ramsey, 2006)

d'autres sur l'aspect gestion de base de données, alors que certains autres mettent l'accent sur les aspects organisationnels et institutionnels. Une définition qui a été établie par un consensus parmi 30 spécialistes et qui nous semble appropriée dans le cadre de cette recherche est la suivante (Chrisman, 2002, p. 12) :

Définition 1.1 *Geographic Information System—A system of hardware, software, data, people, organizations and institutional arrangements for collecting, storing, analyzing, and disseminating about areas of the earth.*

Selon cette définition, un SIG est un ensemble de sous-systèmes qui devra inclure les composantes (voir Figure 1.1) nécessaires :

- à l'acquisition des données d'entrée (données issues des cartes, données de recensement, données terrain, etc.),
- au stockage, à la représentation et à la gestion de base de données,
- à la manipulation et à l'analyse des données,
- à l'affichage et à la génération de produits (rapports, cartes statistiques, etc.), et
- au dialogue avec l'usager.

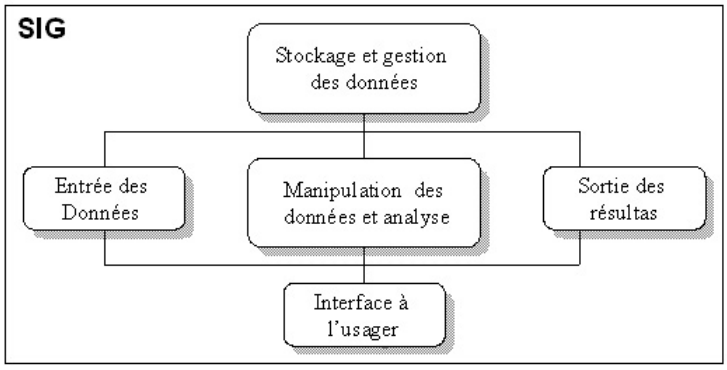


FIG. 1.1 – Structure d'un SIG—*Source* : Malczewski (1999), p. 17

Au-delà des divergences de vues sur les définitions des SIG, nous remarquons qu'il y a un large consensus sur leurs puissance en tant qu'outils de gestion des données à référence spatiale. Les auteurs semblent s'accorder sur le fait que la caractéristique fondamentale qui distingue les SIG des logiciels graphiques et notamment des logiciels de cartographie automatique (en particulier CAD[4] et CAM[5]) est leur capacité d'effectuer des analyses spatiales et de cartographier les résultats automatiquement (Goodchild, 1992 ; Burrough et McDonnell,

[4]Un CAD (*computer-aided design*) ou conception assistée par ordinateur (CAO) en français, est le domaine des logiciels et des techniques permettant de concevoir, de tester, et de réaliser des outils et des produits manufacturables.

[5]Un CAM (*computer-aided mapping*) ou cartographie assistée par ordinateur est un ensemble de techniques et d'arts graphiques ayant pour objet la conception, la préparation, la rédaction et la réalisation de tous les types de plans ou de cartes.

1998 ; Laaribi, 2000). Il faut également distinguer les SIG des systèmes d'information à référence spatiale (SIRS[6]) qui constituent un moyen permettant de fournir de l'information sur le territoire sans avoir nécessairement recours à un système informatisé.
Foot et Lynch (1996) mentionnent trois caractéristiques importantes qui, à notre avis, résument bien les fonctionnalités des SIG et les distinguent des autres logiciels :

1. *Les SIG ont la particularité et la potentialité de gérer des données à référence spatiale*. Les SIG sont dotés d'un SGBD[7] à référence spatiale permettant de gérer des données descriptives mais surtout des données à référence spatiale. Ils se distinguent ainsi des autres SGBD et systèmes d'information dans le sens où la prise en compte de la dimension spatiale des données est la raison d'être du SIG. D'autres bases de données ou systèmes d'information peuvent contenir de l'information spatiale (e.g. les adresses ou codes postaux), mais la base de données d'un SIG utilise la dimension spatiale comme premier moyen pour stocker et accéder à ces données.

2. *Les SIG sont des intégrateurs des technologies*. Ils intègrent une variété des technologies géographiques, comme les systèmes de télédétection et de surveillance (*remote sensing*—RS), système de positionnement global (*global positioning system*—GPS), CAD et CAM, et les outils de la cartographie automatique et de gestion de bâtiments (*automated mapping and facilities management*—AM/FM). Chacune de ces technologies ne traite qu'un type spécifique de données. Les SIG, par contre, ont une capacité remarquable d'intégrer des données multi-sources, multi-échelles et multi-formats. Cela s'explique par le fait que le développement de la technologie SIG est reposé sur les innovations réalisées dans différentes disciplines : géographie, cartographie, photogrammétrie, télédétection et surveillance, topographie, hydrographie, géodésie, génie civil, statistique, informatique, recherche opérationnelle, intelligence artificielle, démographie, etc., qui ont tous contribué au développement de la technologie SIG.

3. *Les SIG sont destinés à supporter la prise de décision*. Il est établit que l'objectif principal du SIG est d'offrir un support pour la prise de décision. En effet, le SIG peut être considéré comme "un système d'aide à la décision impliquant l'intégration des données à référence spatiale dans un environnement de solution de problème"[8] (Cowen, 1988). Le SIG n'est pas simplement un logiciel ou un matériel informatique mais aussi des moyens humains. Les fonctions de collection, de stockage, de manipulation et d'analyse de données à référence spatiale du SIG sont destinés en premier lieu à la prise de décision (Grimshaw, 1994).

[6]Un SIRS (système d'information à référence spatiale) est "une organisation structurée de ressources humaines, d'équipements, de procédures et de données qui se coordonnent pour réaliser l'acquisition et la gestion des données et fournir l'information sur le territoire" (Laaribi, 2000, p. 24).

[7]Les SGBD (système de gestion des bases de données), qui ont fait leur apparition comme des logiciels indépendants dans les années 1960-65, sont destinés à la gestion des bases des données. Lorsque ces SGBD sont destinés à la gestion des données géographiques, on parle alors des SGBD géographiques qui, selon plusieurs auteurs (e.g. Scholl et *al*. 1996), représentent le coeur même des SIG.

[8]Notre traduction de "*GIS is a decision support system involving the integration of spatially referenced data in a problem solving environment*".

Modélisation et représentation des entités géographiques

Notons que ce paragraphe est tiré en grande partie du livre de Scholl et *al*. (1996, pp. 7-19). Les informations d'un SIG correspondant à un sujet particulier sont rassemblées dans des *rubriques* que nous appellerons *thèmes* ou *plans d'information* (en anglais, *layer* ou *coverage* ou encore *level*). Les cours d'eau, les pays, le réseau routier sont des exemples de thèmes. Au moment de l'affichage d'un thème sur un écran ou sur une imprimante, nous voyons une *carte* au sens usuel, avec des couleurs, une échelle, etc. La première étape dans l'utilisation d'un SIG est la modélisation de l'information géographique, qui comprend tout d'abord une phase de modélisation conceptuelle des thèmes (indépendamment de toute implantation) puis une phase de modélisation logique, c'est-à-dire la représentation des thèmes suivant le modèle de données du SGBD, noyau du SIG. Dans le cadre de cette thèse, nous ne nous préoccupons pas de la modélisation logique, mais nous nous attachons à décrire informellement les thèmes à un niveau conceptuel. Le lecteur intéressé par la modélisation logique peut consulter, entre autres, Laurini et Thompson (1992), Scholl et *al*. (1996), Burrough et McDonnell (1998), et Rigaux et *al*. (2002).

Vocabulaire de base Au niveau conceptuel, les *entités*[9] atomiques que nous considérons sont appelées *objets géographiques* (ou *spatiaux*). Il est important de distinguer entre les termes "entité géographique" et "objet géographique". Selon Malczewski (1999), le terme *entité géographique* est utilisé pour désigner un élément du monde réel, i.e., les entités sont contenues dans l'espace géographique. Le terme *objet géographique* est une représentation dans le SIG d'une entité géographique. Par exemple, les entités géographiques "ville", "autoroute" et "pays" sont représentées dans la base de données du SIG sous forme d'objets "point", "ligne" et "polygone" que nous définissons ci-après.
Généralement un objet géographique possède deux types de propriétés (ou des caractéristiques) souvent nommées *attributs* :

- Des attributs *descriptifs* (ou *alphanumériques* ou encore *aspatials*), qui constituent sa description. Par exemple, le nom et la population d'une ville sont des attributs de ce type.
- Un attribut *spatial*, qui correspond généralement à la géométrie de l'objet géographique, sa position dans l'espace. Par exemple, un polygone représente la géométrie d'une ville

Étant donné la complexité des entités du monde réel, nous parlons d'objets géographiques *atomiques* ou *complexes*, les derniers étant *composés* d'autres objets géographiques. Par exemple, l'objet géographique "Paris" est constitué d'objets géographiques atomiques représentant les différentes communes.
L'attribut spatial d'un objet géographique est représenté par des objets spatiaux. Nous distinguons généralement les trois objets spatiaux de base suivants :

[9]Le terme "entité" englobe également les phénomènes spatiaux qui sont géographiquement localisés. Par phénomène spatial nous entendons les différentes variables continues (e.g. température, précipitation, pollution). Les phénomènes spatiaux sont considérés des entités spatiales lorsqu'ils sont localisés par leurs propres attributs (e.g. température ou précipitation à Paris), par leurs formes géométriques (e.g. distribution spatiale d'une épidémie), ou par les deux (Bedard, 1991).

- *Point* : Il représente un objet géographique de dimension 0 (zero). On dira également d'un point qu'il s'agit d'un *objet spatial ponctuel*. Par exemple, l'objet spatial associé à une ville est un point.
- *Ligne* : Il représente un objet géographique de dimension 1. On dira également d'une ligne qu'il s'agit d'un *objet spatial linéaire*. Par exemple, l'objet géographique associé à une rivière est une ligne.
- *Polygone* : Il représente un objet géographique de dimension 2. On dira également d'un polygone qu'il s'agit d'un *objet spatial polygonal* ou *surfacique*. Par exemple, l'objet géographique associé à une commune est un polygone.

Certains auteurs, utilisent le terme *zone* et parfois *région* pour désigner l'objet spatial polygone. Dans le cadre de cette thèse, le terme "polygone" est réservé aux objets surfaciques atomiques, le terme *zone* désigne une collection de polygones adjacents et le terme *région* désigne une collection de *zones* adjacentes.

Types abstraits de données spatiaux Dans ce paragraphe nous introduisons quelques *types abstraits de données* (TAD) spatiaux. Ils servent comme introduction à l'algèbre de modélisation spatiale multicritère que nous proposons et que nous allons introduire au niveau du cinquième chapitre. Un TAD spatial est une vue fonctionnelle abstraite des objets spatiaux qui ne nécessite pas la connaissance de la structuration interne de ces objets. L'idée de base consiste à une séparation entre utilisation et implantation (appelée *encapsulation*) des objets spatiaux. Chaque TAD sera alors défini en terme d'opérations qu'on peut faire sur ce TAD. Pour pouvoir l'utiliser, il n'est nécessaire de connaître ni la structure de représentation des objets spatiaux ni la manière dont sont implantées les opérations.
La Figure 1.2 présente les définitions des TAD spatiaux polygone (`gPolygon`), ligne (`gLine`) et point (`gPoint`) [10]. Pour chaque TAD nous précisions un sous-ensemble d'opérations de signification précise et dont les arguments et le résultat portent sur des objets de type *polygon*, *line* et *point* ainsi que sur d'autres types d'information atomique comme *boolean*, *integer*, etc. Différentes méthodes de spécification sont disponibles. Dans la Figure 1.2 nous avons utilisé une version simplifiée de la méthode de spécification de Guttag (1977) (voir également Guttag et Horning (1978) et Dorenbeck et Egenhofer (1991)). Plus précisément, chaque opération d'un type n'est spécifiée que par un nom et une signature (types des arguments et du résultat). Néanmoins, une manière plus formelle consiste à décrire également les comportements des différentes opérations. Nous utiliserons cette dernière version au cinquième chapitre. La description de la sémantique de différentes opérations de la Figure 1.2 sera également donnée dans le cinquième chapitre.

Modes de représentation Il existe essentiellement deux modes de repérage et de représentation des objets dans l'espace : *discret* (en anglais, *raster*) ou *vecteur* (en anglais, *vector*), que nous décrivons brièvement ci-dessous.

[10] Dans ces définitions ainsi que celles qui seront introduites au chapitre 5, nous garderons les termes anglo-saxon étant donné leur acceptation universelle.

Type : **gPolygon**
set : gPolygon, gLine, gPoint, Rectangle, boolean, real

syntax :

MAKE	gPoint × ··· × gPoint → gPolygon
POINT-In-POLYGON	gPolygon × gPoint → boolean
INTERSECT	gPolygon × gPolygon → boolean
INTERSECTION	gPolygon × gPolygon → gPolygon
CLIPPING	gPolygon × Rectangle → gPolygon
ADJACENT	gPolygon × gPolygon → boolean
AREA	gPolygon → real
CENTROID	gPolygon → gPoint
HOLE	gPolygon → gPolygon
BOUNDARIES	gPolygon → gLine

Type : **Line**
set : Polygon, Line, Point, boolean, real

syntax :

MAKE	gPoint × gPoint → gPoint
POINT-In-LINE	gLine × gPoint → boolean
LENGTH	gLine → real
START	gLine → gPoint
END	gLine → gPoint
INTERSECT-LP	gLine × gPolygon → boolean

Type : **Point**
set : Polygon, Line, Point, boolean, real

syntax :

MAKE	real × real → gPoint
ISEQUAL	gPoint × gPoint → boolean
DISTANCE-PP	gPoint × gPoint → real
DISTANCE-ZP	gPolygon × gPoint → real
X	gPoint → real
Y	gPoint → real

FIG. 1.2 – Spécification formelle des TAD spatiaux `gPolygon`, `gLine`, et `gPoint`

Mode raster L'espace est régulièrement découpé en cellules élémentaires. Le cas le plus simple et le plus courant correspond à une discrétisation du plan en carrés élémentaires ou *pixels*. Dans ce type d'espace appelé *raster* ou encore *maille*, *trame*, *matriciel*, etc., de résolution le pixel, un point est représenté par les coordonnées (l'adresse) du pixel où "il se trouve". Une variante appelée *grille* ne représente qu'un ensemble fini de points à l'intersection de droites parallèles aux axes à égale distance les unes des autres (colonnes et rangées). Les coordonnées d'un point sont alors un numéro de colonne et un numéro de rangée. Un point est localisé par le pixel dont l'intersection avec ce point est non nulle. La géométrie d'un polygone ou d'une ligne est représentée par l'ensemble des pixels dont l'intersection avec le polygone ou la ligne est non nulle (voir Figure 1.3)
Ce mode de représentation est aussi appelé *mosaïque* (*mesh*) ou *tessélation* (*tessellation*), car il existe d'autres techniques de découpage régulier de l'espace (cf. Laurini et Thompson, 1992 ; Scholl et *al.*, 1996 ; Lee et *al.*, 2000 ; Nievergelt et Widmayer, 2000) où les cellules élémentaires ne sont pas nécessairement des carrés mais peuvent prendre la forme de polygones variés (comme par exemple la forme hexagonale).

Mode vecteur Le mode *vecteur* permet une représentation de la géométrie des objets peu coûteuse en place mémoire : un point est représenté par ses coordonnées, une ligne est représentée par une liste de points et un polygone par la liste des lignes constituant sa frontière (voir Figure 1.3). Cette géométrie est obtenue soit par "vectorisation" de données déjà numérisées en mode *raster*, soit par "digitalisation" de documents pré-existants. Les lignes sont généralement représentées de manière approximative par des séquences de segments de droite. Cependant il existe d'autres représentations élémentaires de lignes par des courbes calculées (arcs de cercle, cubiques, etc.) (Plazanet et *al*., 1996) ou par des *splines* (Laurini et Thompson, 1992).
Pour traiter les reliefs, il existe en mode vecteur un modèle appelé TIN (*Triangulated Irregular Network*), dans lequel le relief est décrit par des triangles suivant un modèle topologique.

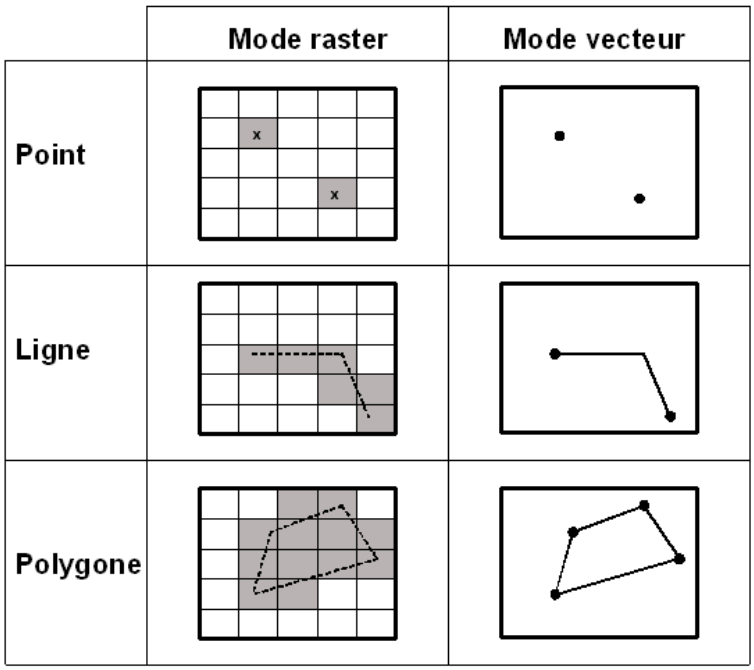


FIG. 1.3 – Représentation des points, lignes et polygones en modes raster et vecteur

Notion de couche

Définition Nous avons défini un *thème* comme un ensemble d'objets géographiques homogènes, c'est-à-dire qui ont le *même type*. En particulier, ils ont même type spatial (polygone, ligne ou point). Dans un SIG, *plusieurs* thèmes peuvent être associés au même territoire. On dit qu'ils ont la même *couverture spatiale*. La notion de "couche" est définie ainsi (Scholl et *al*., 1996) :

Définition 1.2 *Une* ***couche*** *est un ensemble de un ou plusieurs thèmes ayant même couverture spatiale.*

Il s'agit donc d'un ensemble d'objets géographiques qui partagent le même territoire. Par exemple, les thèmes "cadastre", "patrimoine municipal", "corps de rue", "réseaux d'adduction d'eau, d'assainissement, de lignes téléphoniques" partagent le même territoire d'une commune. Bien que ces thèmes soient saisis et mis à jour séparément, à des précisions et échelles souvent différentes, l'analyse spatiale peut parfois nécessiter leur association non seulement à l'écran mais également à l'intérieur de la base de données.
La construction d'une couche commence souvent par un thème servant comme une grille de référence (*reference grid*) (souvent nommé *geodetic level* dans la terminologie du SIG) sur laquelle d'autres thèmes relatifs à une application particulière viennent s'ajouter (Figure 1.4).

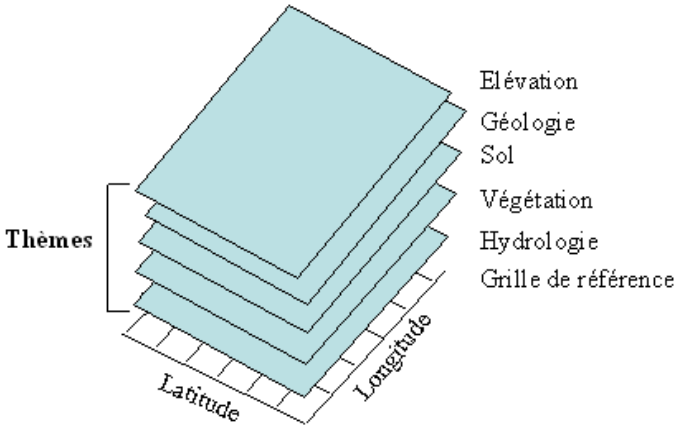


FIG. 1.4 – Représentation d'une couche

1.3.2 Capacités analytiques des SIG

Les spécialistes des SIG semblent d'accord sur le fait que la caractéristique fondamentale qui distingue les SIG des autres logiciels graphiques et notamment des logiciels de cartographie numérique (e.g. CAD, CAM), est leur capacité d'effectuer des analyses (Laaribi 1994, Burrough et McDonnell 1998, Malczewski 1999). Un nombre croissant de fonctionnalités analytiques est offert par les SIG actuels et de nombreuses classifications ont été proposées (e.g. Goodchild, 1987 ; Aronoff, 1989 ; Bracken et Webster, 1990 ; Star et Estes, 1990 ; Maguire et *al.*, 1991 ; Burrough,1992 ; Laurini et Thompson, 1992 ; Chrisman, 1996 ; DeMers, 1997 ; Malczewski, 1999 ; Davis, 2001 ; Chrisman, 2002). Dans cette thèse, nous adoptons la classification établie par Chrisman (2002). Ce dernier distingue six groupes d'opérations spatiales de complexité croissante.

1. ***Opérations sur les attributs descriptifs***. Les opérations les plus simples sont celles qui portent sur les attributs des entités spatiales sans impliquer la composante spatiale. Il s'agit généralement d'opérateurs mathématiques ou ensemblistes qui transforment les valeurs existantes en de nouvelles valeurs. *Exemples* : classification, agrégation, changement d'échelle, etc.

Certaines opérations de ce groupe peuvent également engendrer, de façon indirecte, des changements sur la composante spatiale comme par exemple l'opération d'agrégation qui peut nécessiter l'élimination des frontières communes des entités polygonales appartenant à la même catégorie.

2. ***Techniques de superposition de couches (overlay)***. Ce groupe contient un ensemble d'opération booléennes qui permettent à des entités géographiques, avec un ensemble de caractéristiques communes, d'être identifiées et affichées. *Exemples* : identifier toutes les propriétés à l'intérieur d'une zone d'affectation, toutes les zones inférieures à 200 mètres d'altitude avec une utilisation agricole du sol, etc. Cette technique est appropriée à une structuration et une représentation de l'information géographique par thèmes : couverture du sol, réseau hydrographique, réseau routier, réseau d'utilité public (électricité, gaz, eau potable, assainissement, téléphonie), foncier, habitat, etc.

3. ***Opérations métriques***. Ces opérations se basent sur la notion de distance. Trois types d'opérations métriques peuvent être distingués : (i) création des zones tampons relatives à des objets isolés (e.g. recherche d'une zone tampon relative à tous les bâtiments situés à 1000 mètres de l'aéroport), (ii) mesure de distance entre objets (e.g. recherche de tous les bâtiments situés à moins de 150 mètres d'une borne d'incendie) et construction des champs de distance pour les données *raster* (utilisé par exemple dans les problèmes de localisation-affectation (*location-allocation*) ou de localisation), et (iii) construction de diagramme de Voronoi[11] "étendu" (*"extended" Voronoi network*) où la notion de zone de proximité concerne aussi bien les points que les lignes ; et où chaque zone représente la partie de l'espace qui est la plus proche d'un objet particulier (un point ou une ligne) que les autres.

4. ***Opérations sur les surfaces et le plus proche voisin***. Les opérations de ce groupe portent sur une description continue de l'espace. Le calcul de la pente (i.e. inclinaison d'un terrain ou d'une surface par rapport au plan de l'horizon), du gradient (taux de variation en fonction de l'angle du plan tangent à la surface en un point donné), et l'aspect (direction de la pente) sont des exemples typiques de cette famille d'opérations. Les opérations de voisinage nécessitent deux composantes : un voisinage (*neighborhoods*) et une règle de combinaison (e.g. une règle de dominance qui sélectionne une valeur sur certains critères). Le voisinage peut être défini sur la base de la distance Euclidienne ou sur la base des relations entre objets. La représentation de profile (élévation de la surface par rapport à une ligne spécifiée) ou la modélisation du drainage de surface sont deux exemples de ce type d'opérations.

5. ***Opérations avancées***. Trois types d'opérations avancées peuvent être distinguées : (i) opérations itératives, (ii) modèles de localisation-affectation, (iii) méthodes d'analyse statistique. Les opérations itératives généralisent les opérations de voisinage. *Exemple* : calcul de zones de visibilité (*viewshed*), analyse des réseaux, etc. Les modèles d'allocation-affectation cherchent à optimiser une fonction objectif afin de localiser, par exemple, des écoles, des points de service, etc. Dans un problème de distribution des marchandises, la fonction objectif peut être

[11] Le *diagramme de Vornnoi* consiste en un découpage de l'espace en régions définies autour des points de données de telle sorte que chaque région est constitué par l'ensemble des points de l'espace qui sont plus proches du point de données auquel cette region est associée que de tous les autres points de données.

par exemple, la minimisation de la distance totale entre les points de demande et les points de service. Les opérations statistiques permettent d'effectuer un ensemble de manipulations statistiques sur les attributs comme par exemple l'analyse de régression ou l'analyse par clusters (*cluster analysis*).

6. ***Opérations de transformation***. Ces opérations, les plus complexes, impliquent des conversions d'une forme de données à une autre. En effet, les données en entrée peuvent être de différentes formes : semi de points, des courbes de niveaux, carte thématique, des *Modèles Numériques de Terrain* (MNT), etc. Pour le besoin de l'analyse, il est parfois nécessaire de convertir un semi de points en un TIN, des courbes de niveaux en un semi de points ou un TIN, un MNT en une carte thématique, etc. L'interpolation, le triangulation sont deux exemples d'opérations de transformation.

1.3.3 Limites du SIG en aide à la décision spatiale

Malgré ces nombreuses fonctionnalités analytiques, les SIG souffrent encore de plusieurs lacunes dans le domaine de l'aide à la décision à référence spatiale. En se référant à la littérature spécialisée (Burrough, 1990 ; Clarke, 1990 ; Jankowski et ZumBrunnen, 1990 ; Carver, 1991 ; Openshaw, 1991 ; Goodchild, 1992 ; Fischer et Nijkamp, 1993 ; Fotheringham et Rogerson, 1993 ; Sui, 1998 ; Goodchild, 2000 ; Jiang et Esatman, 2000 ; Laaribi, 2000 ; Malczewski, 2004), nous avons pu identifier plusieurs limites dont souffrent les SIG.

1. *Manque de fonctionnalités analytiques*. Malgré la grande variété des méthodes d'analyse incluses dans les SIG standards, ces derniers souffrent particulièrement encore de leur manque de traitement de la notion du temps (e.g. il n'est pas possible de faire une interpolation entre deux cartes à des dates différentes) et de la multidimensionnalité (pas de véritables 3D—image aérienne souvent drapée sur un MNT) et le peu de performance dans le traitement des aspects multi-échelles (difficulté à travailler sur de petites échelles—études de cas locales, à moyenne ou à grande échelle) et multi-sources.

2. *Limites des techniques d'overlay*. Les techniques d'*overlay*, un exemple typique des techniques analytiques des SIG, sont remarquables pour des opérations de superposition afin de combiner et corréler différentes variables en vue de fournir de l'information thématique. Cependant, elles sont limitées pour des tâches plus sophistiquées à cause de facteurs identifiés par plusieurs auteurs : (i) les résultats de l'opération d'*overly* deviennent rapidement inextricables et donc difficiles à comprendre quand le nombre de facteurs impliqués dépasse quatre ou cinq ; (ii) la plupart des procédures *overlay* dans les SIG ne tiennent pas compte du fait que les variables peuvent être d'inégale importance—c'est-à-dire que l'on pourrait leur attribuer des poids différents afin de pondérer les informations entre elles ; (iii) un problème se pose lorsqu'on saisit des variables pour des analyses en overlay : comment furent définies les valeurs de seuil qui ont été alors utilisées ; et (iv) l'utilisation de valeurs de seuil pour cartographier des variables continues, comme par exemple la densité de la population, va inévitablement mener à une perte substantielle de la qualité de l'information.

3. *Difficultés d'intégration de l'analyse spatiale aux SIG*. L'analyse spatiale a émergé et connu

un développement bien avant l'avènement des SIG. Pour un certain temps, les deux domaines ont évolué indépendamment l'un de l'autre. Ils ont oeuvré à fournir, chacun de son coté, un éclairage opérationnel aux problèmes complexes spatialisés. Les modèles d'analyse spatiale et les SIG ont plusieurs similarités, comme le besoin de données à référence spatiale et la capacité analytique pour traiter ces données, les différences demeurent cependant nombreuses. La plupart de ces différences sont généralement inhérentes aux approches suivies : un modèle d'analyse spatiale tend à mettre l'accent sur les traitements de phénomènes de la réalité spatiale qu'illustrent les fonctions d'analyse effectuées sur des mesures et par des calculs, alors qu'un SIG se préoccupe beaucoup plus de la structure du système, c'est-à-dire des composantes ou des éléments qui représentent cette réalité. C'est ce qui explique, en bonne partie, les difficultés d'intégration de l'analyse spatiale et des SIG.

4. *Discrétisation de l'espace*. Un autre problème s'ajoute aux difficultés d'intégration des SIG et de l'analyse spatiale : il concerne la discrétisation des phénomènes spatiaux. Goodchild (1992b) soutient que cette discrétisation de l'espace est explicite dans les SIG alors qu'elle est implicite ou non spécifiée dans la plupart des formes d'analyse spatiale. En effet, plusieurs fonctions d'analyse spatiale sont conçues pour des phénomènes continus sur l'espace. Elles ne parviennent pas, par conséquent, à traiter ces phénomènes à cause des incertitudes introduites par le processus de discrétisation (par exemple, les isolignes relatives aux pentes).

5. *Modélisation et théorie des données à référence spatiale*. Un problème pratique surgit quand on effectue des analyses spatiales avec les SIG : c'est l'absence d'une démarche systématique qui permettrait d'utiliser des séquences d'opérations pour obtenir la réponse désirée. Pour répondre à une requête spatiale simple, chaque utilisateur se fie à son intuition et emprunte un chemin personnel, pour aboutir finalement aux mêmes résultats (Burrough, 1990). Cette démarche intuitive, qui fonctionne pour des opérations simples, serait peu opérationnelle pour des analyses plus complexes. Une telle situation témoigne, selon plusieurs chercheurs dont Goodchild (1991, 1992b), du manque de clarté qui entoure l'analyse spatiale, perçue comme un ensemble de techniques développées dans des domaines différents sans aucune codification claire ni un cadre conceptuel reposant sur une assise théorique robuste.

6. *Une situation riche de données et pauvre en théorie*. Plusieurs études, qui se sont livrées à l'analyse des SIG existants, sont concordantes : on se trouve dans une situation caractérisée par un état riche en données et en progression croissante par rapport à un état pauvre en théorie. En effet, "il y a place pour une approche plus créative et pour des outils analytiques pouvant suggérer de nouvelles propositions théoriques et supporter des fonctions d'exploration de données" (Laaribi, 2000).

7. *Des critères d'admissibilité et non des critères d'évaluation*. Les fonctionnalités analytiques du SIG ne permettent pas d'aborder des problèmes à référence spatiale lorsqu'un ensemble de critères conflictuels et d'objectifs multiples sont en jeu. En effet, si l'analyse spatiale des SIG utilise plusieurs critères de sélection appliqués sur plusieurs attributs d'un ou de plusieurs objets de la base de données, de telles analyses s'avèrent limitées en matière d'aide à la décision et ce pour les raisons suivantes : (i) les critères qui sont pris en compte pour l'analyse ne sont pas considérés comme conflictuels ; (ii) les critères sont généralement considérés d'égale im-

portance[12] ; (iii) la solution obtenue doit répondre à tous les critères ; ainsi, comme on applique critère après critère et qu'il s'agit de *critères d'admissibilité*[13] et non de critères d'évaluation, tout se passe comme s'il s'agissait d'une recherche monocritère itérative. Les SIG permettent d'identifier les solutions propices répondant simultanément à tous les critères et non pas d'effectuer un rangement de ces solutions pour fournir la meilleure solution, un résultat généralement crucial pour le décideur.

Pour combler ces lacunes, la plupart des chercheurs supportent l'idée d'intégrer dans le SIG des outils informatiques (*computing tools*) et de recherche opérationnelle : programmation linéaire (e.g. Campbell et *al*., 1992 ; Chuvieco, 1993 ; Caro et *al*., 2004), statistique (e.g Burrough, 2001 ; Wise et *al*., 2001 ; Zhang et McGrath, 2004), réseaux de neurones artificiels (e.g. Sui 1993 ; Bennett et *al*., 1996 ; Rigol et *al*., 2001), algorithmes génétiques (e.g. Brookes, 2001 ; Ducheyne et *al*., 2006), automate cellulaire (e.g. Wu, 1998 ; Batty et *al*., 1999), logique floue (e.g. Wang et *al*., 1990 ; Stefanakis et *al*., 1999 ; Yanar et Akyürek, 2006), intelligence artificielle (e.g. Egenhofer et Frank, 1990), systèmes experts (e.g. Yialouris et *al*., 1997 ; Eldrandaly, 2006 ; Fleming et *al*., 2007), recuit simulé (e.g. Aerts et Heuvelink, 2002), multi-agents (e.g. Gimblett, 2002 ; Sengupta et Bennett, 2003 ; Brown et al., 2005) sont des exemples de ces travaux. D'autres travaux se sont focalisés sur la définition des langages de spécification et de modélisation (e.g. Albrecht et *al*., 1997 ; Burrough, 1997).
Ces travaux ont permis d'améliorer les potentialités analytiques des SIG et de répondre aux limites mentionnées plus haut. Cependant, ils échouent lorsqu'il s'agit de tenir compte des aspects multicritères des problèmes de décision à référence spatiale. L'AMC semble être la mieux placée pour faire face à ces insuffisances.

1.4 Aide multicritère à la décision

Dans cette section nous donnons quelques éléments de base de l'analyse multicritère. Différents termes et concepts seront utilisés sans définitions explicites. Ils le seront dans le prochain chapitre. Nous nous limitons aux éléments nécessaires à l'introduction des solutions proposées dans le cadre de cette thèse. Particulièrement, nous n'allons pas présenter des méthodes particulières mais nous renvoyons le lecteur intéressé à la littérature abondante : Keeney et Raffia (1976), Roy (1985), Shärlig (1985), Vincke (1989), Pomerol et Barba-Romero (1993), Roy et Bouyssou (1993), Zanakis et *al*. (1998), Belton et Stewart (2002), et Figueira et *al*. (2005a). Une bibliographie en ligne dans le domaine de l'aide multicritère à la décision contenant plus de 5000 références peut également être consultée à l'adresse suivante : `http://www.lamsade.dauphine.fr/mcda/biblio/`.

[12] Notons néanmoins que le logiciel SPANS de Tydac a été le premier à offrir une pondération simple des critères. Aussi, les modules GRID d'Arc/Info d'ESRI et MGE Grid Analyst d'Intergraph en analyse *raster* offrent un type de pondération de critères. Le SIG IDRISSI intègre, depuis sa version 4.1, un module d'analyse multicritère avec notamment la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) de Saaty (1980) pour la détermination des poids et des méthodes de somme pondérée pour les procédures d'agrégation.

[13] Dans le sens où elles représentent des critères qui doivent être satisfaits pleinement, par opposition aux critères d'évaluation qui eux doivent être satisfaits au maximum.

1.4.1 Aide à la décision

Bernard Roy (1985) définit l'aide à la décision ainsi :

Définition 1.3 *L'**aide à la décision** est l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à prescrire, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part.*

Selon cette définition, une activité d'aide à la décision s'articule autour d'un *processus de décision* [14]. En effet, Martel (1999) soutient le fait qu'une activité d'aide à la décision "implique un minimum d'insertion dans le processus de décision : elle ne se fait seulement pour mais essentiellement avec les acteurs du processes dans l'établissement d'une véritable relation d'aide". Pour Bernard Roy (1992)[15], un "problème" de décision n'est pas un objet qui préexiste. La formulation qu'on en donne ne peut pas, en général, être totalement objective et ne peut être envisagée indépendamment des rapports entre l'individu et la réalité. Il ajoute qu'il est normal que cette formulation évolue au fur et à mesure de l'avancement dans le processus de décision. Dans ce sens, Landry (1998) remarque que le succès d'une démarche d'aide à la décision dans une organisation nécessite la compréhension de l'ensemble du processus de décision dans lequel s'insère cette aide, ce qui implique une capacité d'appréhender adéquatement le problème qui justifie l'origine et qui alimente par la suite ce processus.
Toute activité d'aide à la décision fait intervenir un décideur et assez souvent un homme d'étude. Le *décideur* (*decision-maker* en anglais), est un intervenant principal à qui s'adresse l'aide à la décision et occupant une place centrale dans le processus de décision. La notion de décideur "*désigne en dernier ressort l'entité qui apprécie le "possible" et les finalités, exprime les préférences et est sensé les faire prévaloir dans l'évolution du processus*" (Roy, 1985). Remarquons que dans cette thèse on se met dans un cadre de mono-décideur, où la décision relève d'une seule entité. Néanmoins, en pratique la décision concerne souvent plusieurs parties, que ce soient plusieurs personnes individuelles ou des entités. Mais on suppose en effet qu'il y a une autorité finale qui prend la décision et qui constitue un décideur unique.
Dans les problèmes relativement complexes, le décideur est généralement guidé par l'*homme d'étude*[16] (*analyst* en anglais) dont le rôle "*consiste entre autres à expliciter le modèle, à l'exploiter en vue d'obtenir des éléments de réponses, à éclairer le décideur sur les conséquences de tel ou tel comportement en lui rendant intelligibles, éventuellement en prescrivant (préconisant, conseillant) une ou une série d'actions ou encore une méthodologie*" (Roy, 1985).

[14] Différents processus de décision ont été proposé dans la littérature. Incontestablement, le modèle à trois phases (i.e. *intelligence*, *conception* et *choix*) de H. Simon (1960) est le plus connu dans le domaine de l'aide à la décision. D'autres modèles (e.g. Mintsberg et *al.*, 1976 ; Jacquet-Lagrèze, 1981 ; Tsoukias, 2003) ont été également proposés, mais la plupart d'entre eux sont des extensions de celui de Simon.

[15] Une version anglaise de cet article est publiée dans Roy (1993).

[16] Qualifié aussi d'*analyste* ou encore d'*ingénieur de décision*. Les Canadiens utilisent souvent le terme *facilitateur*.

1.4.2 Définition de l'aide multicritère à la décision

Un problème de décision monocritère est un problème du type :

$$\text{opt}\{g(x) : x \in A\}$$

où A est l'ensemble des *actions admissibles* et g est la *fonction critère* à optimiser. Ce modèle traduit généralement un problème bien structuré et bien défini mathématiquement, qui s'impose à la fois au décideur et à l'homme d'étude.
Lorsque les actions potentielles d'un problème de décision ne sont pas évaluées par un critère unique, mais par un ensemble de critères qu'on désigne par $g_1, g_2, \cdots, g_m$, et que le décideur souhaite optimiser simultanément, le problème posé est alors de la forme :

$$\text{opt}\{g_1(x), g_2(x), \cdots, g_m(x) : x \in A\}$$

La principale difficulté d'un problème multicritère est qu'il s'agit d'un problème mathématiquement mal posé, c'est-à-dire sans solution objective. Il n'existe pas, en général, d'action meilleure que toutes les autres, simultanément sur tous les critères : le concept de solution optimale, un postulat de base de l'approche monocritère (Roy, 1990a), n'a donc pas de sens dans un contexte multicritère. Il ne s'agit pas donc de chercher une vérité cachée, mais plutôt à aider le décideur à progresser vers une *action de compromis*.
Lorsque l'activité de l'aide à la décision se base sur une approche multicritère (i.e. plusieurs critères, souvent conflictuels, sont pris en compte, reconnaissance de l'existence de plusieurs rationalités , qu'il n'existe pas une solution "optimale"), on parle de l'*aide multicritère à la décision*. Différentes définitions ont été proposées pour l'aide multicritère à la décision. Nous reprenons ici celle de Vincke (1989, p.18) :

Définition 1.4 *L'aide multicritère à la décision vise, comme son nom l'indique, à fournir à un décideur des outils lui permettant de progresser dans la résolution du problème de décision ou plusieurs points de vue, souvent contradictoires, doivent être pris en compte.*

Traditionnellement, l'activité de l'aide à la décision se base sur l'idée de l'existence d'une fonction objectif (ou un critère) bien définie et unique et qui s'impose aux yeux de tous pour caractériser la bonne direction dans laquelle il convenait de faire évoluer le système dont on s'intéressait (Roy, 1988). En procédant ainsi, on a l'avantage d'aboutir à un problème "bien posé" mathématiquement dans en ce sens qu'il est posé en des termes tels que la solution optimale, est entièrement déterminée par sa formulation (Martel, 1999).
Néanmoins, en pratique les conséquences sont suffisamment complexes, c'est le cas surtout dans le cadre spatial, pour qu'une seule fonction objectif (un seul critère) ne puisse appréhender adéquatement toute l'information nécessaire à la comparaison globale des différentes alternatives d'action possibles. D'après Martel (1999), ces conséquences sont multiples et s'apprécient en des termes forts variés (économiques, techniques, de confort, etc.).
Pour Bouyssou (1993), l'argument réaliste selon lequel la réalité étant multidimensionnelle, il est naturel que l'on prenne en compte plusieurs points de vue pour aider à la décision et donc qu'on utilise des méthodes multicritères, ne peut à lui seul justifier d'adopter une démarche multicritère pour aider à la décision. Utiliser un tel argument conduirait à voir le monocritère

comme un cas limite et dégénéré du multicritère. Toujours selon Bouyssou (1993), adopter une démarche multicritère, ce n'est pas postuler que "dans la réalité" un seul critère est à l'oeuvre mais c'est, plus simplement, vouloir aider à la décision en n'exhibant qu'un seul critère. Il y a, selon lui, à la base d'une démarche multicritère en aide à la décision, un "acte de foi" consistant à croire que construire explicitement plusieurs critères peut avoir un "rôle positif" dans le processus de modélisation.

1.4.3 Notion de problématique de décision

La *problématique* peut être perçue comme étant une orientation de l'investigation qu'on adopte pour un problème de décision donné. Elle exprime les termes dans lesquels le décideur ou l'homme d'étude pose le problème et traduit le type de la prescription qu'il souhaite obtenir. Roy (1985) distingue quatre problématiques, dont les caractéristiques sont résumées dans le Tableau1.2, de base que tout problème de décision multicritère doit se ramener nécessairement à l'une d'entre elles.

Problématique du choix ($P.\alpha$) : Elle consiste à sélectionner un sous ensemble aussi restreint que possible de l'ensemble des actions A, contenant les meilleures actions. L'ideal est d'obtenir une seule et meilleure action. Mais à cause de la nature conflictuelle des critères, il est préférable de fournir au décideur quelques actions qui représentent différentes variantes de la "meilleure action". Évidement, le résultat final peut être raffiné en utilisant de l'information additionnelle ou avec une analyse plus approfondie. Formellement, le résultat de la prescription est un sous ensemble $A^0 \subset A$. *Exemple* : choix d'un site pour une localisation industrielle où chaque site représente une action.

Problématique de tri ($P.\beta$) : Elle consiste à affecter chaque action à un ensemble de catégories pré-définies. Cette formulation est adéquate lorsque le problème de décision consiste à examiner chaque action indépendamment des autres (en tenant compte que des caractéristiques intrinsèques de chaque action) dans le but de proposer une recommandation parmi un ensemble des recommandations spécifiées en avance. Chaque recommandation peut être associée avec une catégorie. Le problème de décision est alors vue comme trier les actions potentielles aux différentes catégories définies en termes de normes pré-définies. La procédure de tri doit être définie de telle sorte que chaque action est affectée à une et seule catégorie. Formellement, une prescription consiste à une partition de A. *Exemple* : affecter différentes parcelles d'un territoire (donc chaque parcelle est une action) à un type d'utilisation particulier parmi différentes utilisations possibles.

Problématique de rangement ($P.\gamma$). Elle consiste à ranger les différentes actions en allant de la meilleure action à la moins bonne avec éventuellement des *ex aequo*. Cette problématique est intéressante lorsque les actions sont à différencier selon leur intérêt relative. L'idéal est d'obtenir un ordre complet. Cependant, à cause à la nature conflictuelle des critères, à l'imprécision, à l'existence de systèmes de valeurs différents, il est souvent plus réaliste de présenter au décideur un ordre partiel. Il est à noter qu'en pratique, le rangement peut être nécessaire seulement pour les actions les plus intéressantes. Formellement, la prescription est un ordre partiel, i.e., une relation transitive définie sur A (ou un sous ensemble de A). *Exemple* : ranger les différents

sites historiques en vue d'une restoration échelonnée sur plusieurs années qui commence par le site le plus urgent.

Problématique de description ($P.\delta$) : Elle consiste simplement à décrire les actions et leurs conséquences et non pas à les comparer comme c'est le cas avec les trois autres problématiques précédentes. Ici, il n'existe pas une prescription et la procédure d'investigation est cognitive. *Exemple* : identifier et décrie, dans le seul but d'apprendre et se de préparer à des éventuels accidents, les différentes actions possibles pour lutter contre la pollution.

Problématique	**Objectif**	**Procédure d'investigation**	**Prescription**
P.α	sélectionner un sous ensemble aussi restreint que possible de A contenant les meilleures actions	Sélection	Sous ensemble $A^0 \subset A$
P.β	Affecter chaque action de A à une et une seule des catégories définies selon de normes préétablies	Segmentation	Partition de A
P.γ	Ordonner les actions de A de la meilleure à la moins bonne	Classement	Ordre partiel sur A
P.δ	Décrire les actions et leurs conséquences	Cognitive	Aucune prescription

TAB. 1.2 – Les différentes problématiques de décision

Un problème de décision multicritère n'est évidement pas une réalité objective dont on peut donner une description immédiatement acceptable par tout le monde. Il arrivera d'ailleurs souvent qu'un problème concret donne lieu à un mélange de problèmes de choix, de tri et de rangement (Vincke, 1992 ; Bana e Costa, 1996)
Plus récemment, Bana e Costa (1996) a proposé d'étendre la typologie de Bernard Roy. Il distingue entre (i) *Problématique d'évaluation comparative* qui inclue les problèmes de choix d'une seule meilleure action (P.α), choix de k actions à partir de n (P.k/n), choix répétitive (P.$\alpha \times k$), et rangement, (ii) *Problématique d'évaluation absolue* qui inclue les problématiques de tri et de tri préliminaire non compensatoire (*screening*), et (iii) *Problématique de rejet* ($P.\beta^{\circ}$).
La typologie de B. Roy reste également valable dans un contexte spatial, avec néanmoins un part plus important pour la problématique du choix. Notons finalement que plusieurs auteurs (e.g. Schärlig, 1985) ne retiennent pas la problématique de description, étant donné qu'il n'existe pas des méthodes particulières pour cette problématique. Néanmoins, nous pensons que cette problématique peut servir dans un cadre spatial où l'objectif consiste parfois à évaluer une situation et non pas à prendre une décision (voir par exemple la thèse de B. Rousval (Rousval, 2005)). Une telle évaluation peut servir à long terme comme base de prise de décision : elle peut être utilisée comme action de référence pour comparer différents types de planification (cf., e.g., Janssen et van Herwijnen, 1998).
Par ailleurs, Sijtsma (2006) remarque que parmi les limites qu'on peut adresser aux méthodes d'AMC est le fait qu'elles ne sont pas appropriées aux situations de décision de "*nul-alternative*" ou de "*zero-option*" (Sijtsma, p. 92). Pour pallier cette limite, Sijtsma soutient l'idée d'utiliser l'AMC conjointement avec des méthodes d'*analyse coût-bénéfice* (*cost-benefit analysis*). Il rejoint dans ce sens la proposition de Voogd (2004).

1.4.4 Aperçu général sur les méthodes d'analyse multicritère

Les méthodes d'analyse multicritère sont souvent classées sur la base de l'ensemble des actions A en deux catégories : méthodes *discrètes* et méthodes *continues*. Les méthodes appartenant à la première catégorie impliquent un ensemble fini (ou dénombrable) d'actions : $A = \{a_1, a_2, \cdots, a_n\}$ où n est le nombre d'actions. Les actions sont évaluées et comparées sur la base d'un ensemble des *critères* d'évaluation $g_1, g_2, \cdots, g_m$ où m est le nombre de critères. L'évaluation d'une action a selon un critère g_j est notée $g_j(a)$.
Pour comparer les actions dans A, il est nécessaire d'agréger les évaluations partielles (i.e. par rapport à chaque critère) en une évaluation globale en utilisant un *mécanisme d'agrégation* donné. Dans la catégorie discrète, il existe deux approches d'agrégation : (i) *approche du critère unique de synthèse*, et (ii) *approche de surclassement de synthèse*. Le principe général de la première approche est que le décideur à pour but de maximiser une fonction d'utilité $U(a) = U(g_1(a), g_2(a), \cdots, g_m(a))$ en agrégeant les évaluations partielles de chaque action $a \in A$ en une évaluation globale. La fonction d'utilité la plus simple et la plus utilisée est la suivante :

$$U(a) = \sum_j u_j(g_j(a))$$

Les fonctions d'utilités partielles u_j $(j = 1, \cdots, m)$ sont strictement croissantes et à valeurs réelles qui servent uniquement à transformer les critères initiaux à ce qu'ils s'expriment tous suivant la même échelle de mesure. Dans cette forme, les relations binaires de *préférence* P et d'*indifférence* I sont définies pour deux actions a et b comme suit :

$$aPb \Leftrightarrow U(a) > U(b) \quad \text{et} \quad aIb \Leftrightarrow U(a) = U(b)$$

À l'opposé de la première famille, la deuxième utilise des fonctions d'agrégation partielle. En effet, les critères sont agrégés en utilisant une relation binaire partielle S, tel que aSb veut dire "a est au moins aussi bonne que b". La relation binaire S est appelée *relation de surclassement*. Le concept de surclassement est dû à Bernard Roy qui le définit comme suit (Roy, 1985) :

Définition 1.5 *Une relation de surclassement est une relation binaire S définie dans A telle que aSb si, étant donné ce que l'on sait des préférences du décideur et étant donné la qualité des évaluations des actions et la nature du problème, il y a suffisamment d'arguments pour admettre que a est au moins aussi bonne que b, sans qu'il y ait de raison importante de refuser cette affirmation.*

Il ne s'agit pas d'une définition mathématique précise mais plutôt d'une idée générale. En effet, les méthodes de surclassement de synthèse ne s'appuient pas sur une axiomatique mathématique solide mais exploitent plutôt l'information disponible, avec ses imprécisions et ses insuffisance, pour une explication au moins partielle des préférences du décideur (Zoller et Beguin, 1992).
La méthode la plus connue dans cette famille est ELECTRE I de Roy (1968) (voir aussi Figueira et *al*., 2005b). Pour construire la relation de surclassement S, on calcule pour chaque

paire d'actions (a, b), d'une part, un indice de concordance $C(a, b) \in [0, 1]$ qui mesure la force des critères en faveur de l'assertion aSb, et d'autre part un indice de discordance $ND(a, b) \in [0, 1]$ mesurant la force des critères s'opposant à l'assertion aSb. La relation S est définie comme suit :

$$\begin{cases} C(a, b) \geq \hat{c} \\ ND(a, b) \leq \hat{d} \end{cases}$$

où $\hat{c}$ et $\hat{d}$ sont respectivement le *seuil de concordance* et le *seuil de discordance*. Les indices de concordance $C(a, b)$ et de discordance $ND(a, b)$ sont ensuite utilisés pour la construction d'un indice $\sigma(a, b) \in [0, 1]$ représentant la crédibilité de la proposition aSb, $\forall(a, b) \in A \times A$. La proposition aSb est vérifiée si $\sigma(a, b)$ est plus grand ou égal à un *seuil de coupe* (*cutting level*), λ.
Les méthodes continues évoquent un nombre très grand d'actions, voire un nombre infini. Dans ce cas, l'ensemble des actions, généralement noté X, est défini implicitement en terme d'un ensemble de *contraintes*. Un problème multicritère continu peut être formulé ainsi :

$\max$ (ou $\min$) $z_1, z_2, \cdots, z_m$

sous les contraintes suivantes :

$z_j = f_j(x_1, \cdots, x_n)$, $(j = 1, \cdots, m)$

$h_i(x_1, \cdots, x_n) \leq 0$, $(i = 1, \cdots, n)$

où $z_1, z_2, \cdots, z_m$ représentent les fonctions objectifs relatives aux m objectifs. Ces fonctions dépendent des variables $x_1, \cdots, x_n$ qui elles-mêmes sont sujettes aux contraintes $h_1, h_2, \cdots, h_n$.

1.4.5 Formulation multicritère d'un problème de décision

Il existe deux écoles importantes regardant l'aide multicritère à la decision : l'*école américaine* (cf. Keeney (1992)) et l'*école française* (cf. Roy et Vanderpooteen (1996)). Les méthodes d'aide à la décision développées selon la première approche sont très différentes de celles développées selon la deuxième approche (Vansnick, 1988) mais ils ne s'opposent pas car elles s'appliquent à des problèmes différents. Elles sont plutôt complémentaires puisqu'elles sont adaptées à des situations pratiques différentes. D'après Vansnick (1990), les deux écoles se basent sur le même modèle de décision pour l'application de leurs méthodes : «$A, A/F, E$» où :

- A : est l'ensemble d'actions potentielles ;
- A/F : est l'ensemble fini des attributs[17] ou critères[18], généralement conflictuels, à partir desquels les actions sont évaluées ; et
- E : est l'ensemble des évaluations de performances des actions selon chacun des attributs ou critères, c'est-à-dire l'ensemble des vecteurs de performances, un vecteur par action.

[17] Il faut distinguer le terme "attribut" utilisé en AMC et qui signifie un moyen pour mesurer l'achèvement d'un objectif du même terme utilisé dans le SIG et qui signifie une caractéristique d'une entité spatiale.

[18] Selon l'école à laquelle on adhère, on parle d'attributs ou de critères. Le terme "attribut" est utilisé surtout dans l'école américaine alors que le terme "critère" est utilisé dans l'école française.

Il existe d'autres modèles pour structurer un problème de décision comme par exemple une structure hiérarchique ou en architecture réseau utilisée dans la méthode AHP de Saaty (1980). En effet, l'analyse selon le processus hiérarchique AHP ne suit pas exactement cette formulation. Dans la structure hiérarchique, les actions occupent le dernier niveau de la hiérarchie, mais elles sont traitées exactement comme les éléments des autres niveaux à l'aide des comparaisons par paire.
Remarquons également que, d'après Jacquet-Lagrèze (1990), dans plusieurs problèmes de décision multicritère, la modélisation formelle du problème s'arrête à la définition des actions et des critères, laissant au décideur la responsabilité de la prise de décision, sans aucun modèle mathématique pour agréger les différents critères.
Par ailleurs, la grande partie des travaux en AMC concernent la phase d'évaluation (développement des méthodes). Néanmoins, on s'intéresse de plus en plus à la première phase, celle de la *structuration* (Bana e Costa et *al*., 1997). Au delà de la définition de l'ensemble d'actions A, qui n'est pas du tout une activité triviale, une partie clé pour tout modèle multicritère est la sélection de la famille de critères qui seront utilisés pour l'évaluation. Il ne s'agit pas d'une étape triviale qui doit se faire obligatoirement avant la phase d'évaluation. Elle permet de rendre explicite les systèmes de valeur de tous les acteurs impliqués dans le problème de décision. La phase de structuration est importante car elle offre, aux différents acteurs, la possibilité de l'identification de différentes opportunités de décision, la construction de nouvelles actions ainsi que l'évaluation des actions.

1.4.6 Démarche multicritère

Il existe différentes démarches pour faire face à la situation de décision multicritère. Chacune met l'accent sur certains aspects aux dépends d'autres et, par conséquent, chacune a ses avantages et ses inconvénients. Keeney (1992) se base sur l'approche du "haut vers le bas" (*top-down*) qui consiste à construire une structure hiérarchique ayant à son premier niveau l'objectif global qui est "éclaté" en sous-objectifs qui sont à leur "éclatés" en sous-sous-objectifs jusqu'à ce que l'on atteigne un niveau mesurable que l'on qualifie d'attributs (cf. Figure 1.5.b). Roy (1985) se base sur une approche de "bas vers le haut" (*bottom-up*) qui consiste à identifier toutes les conséquences pouvant résulter de la mise en oeuvre des actions, que l'on structure en dimensions puis en axes de signification autour desquels sont construits les critères (Figure 1.5.a). Mais les deux cherchent à arriver à un *ensemble de points de vue fondamentaux* (un "*set of fundamental objectives*" selon la terminologie de Keeney ; et une "*famille cohérente de critères*" selon la terminologie de Roy) et indiquer les propriétés désirable à cet ensemble. En plus, Keeney associe de manière explicite chaque attribut avec un objectif fondamental, où les attributs peuvent être nommés *déscripteurs* (*descriptors*), i.e., les niveaux d'impacts destinés à être utilisés pour décrire les impacts plausibles des actions potentielles par rapport à chaque point de vue. Roy parle plutôt de la performance de chaque action par rapport à chaque critère.
L'approche *bottom-up* à partir des conséquences préconisée par Bernard Roy et l'approche *top-down* à partir des objectifs de Keeney représentent en fait deux cas relativement extrêmes. Récemment, Laaribi (2000) a proposé une approche intermédiaire qui, selon lui, est de portée plus générale (Figure 1.5.c). Laaribi décrit son approche comme suit : "partant d'une situation

de décision quelconque (perception d'un problème de décision), il y a lieu de tenter de dégager au départ les objectifs qu'on cherche à atteindre. En tenant compte de ces objectifs, un faisceau de points de vue pourrait se dégager, exprimant en quelque sorte des classes de critères. Aussi, les objectifs permettraient de définir des actions (globales) ou des scénarii (ensemble des actions fragmentées), tandis que la famille de points de vue se traduit généralement par un ensemble de critères qui permettraient de procéder à une évaluation des actions ou des scénarii. Une fois l'évaluation effectuée, on procède à l'investigation par une procédure d'agrégation multicritère appropriée afin de parvenir à une recommandation" (Laaribi, 2000, p. 57).
Nous ne prenons position pour aucune de ces démarches. En effet, la stratégie d'intégration SIG-AMC que nous proposons dans le chapitre qui suit supporte les trois approches. En fait, l'idée de base de cette stratégie consiste à incorporer dans le SIG un ensemble de fonctions d'évaluation multicritère (et non pas une méthode particulière), donnant ainsi au décideur (ou à l'analyste) la possibilité d'appliquer l'une ou l'autre des approches, sans lui imposer une démarche particulière à suivre.

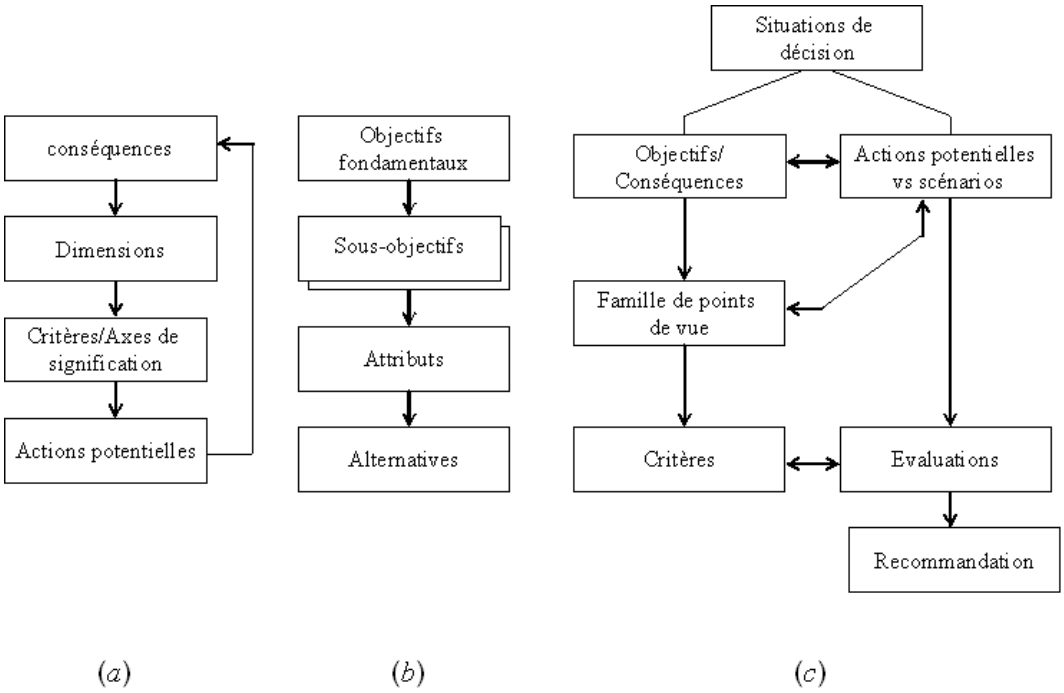


FIG. 1.5 – Différentes démarches d'analyse multicritère—(a) démarche *bottom-up* de B. Roy (b) démarche *top-down* de R. Kenney, et (c) démarche intermédiaire de A. Laaribi

1.4.7 Analyse multicritère et aide à la décision spatiale

L'AMC a été appliquée depuis son emergence à des problèmes à référence spatiale sans utilisation du SIG : localisation (e.g. Martel et Aouni, 1992 ; Khalil et *al.*, 2003), aménage-

ment et utilisation du sol (e.g. Beinat et Nijkamp, 1998 ; Koo et O'Connell, 2006), allocation-affectation, plus court chemin, planification urbaine et régionale, zonage, environment (e.g. Lahdelma et *al*., 2000 ; Kiker et *al*., 2005), gestion forestière (e.g. Tarp et Helles, 1995 ; Tecle et *al*., 1998), agriculture (e.g. Janssen et Rietveld, 1990), gestion et conservation des ressources en eau (e.g. Raju et Pillai, 1999a ; Raju et Pillai, 1999b), planification du transport (e.g. Clímaco et *al*., 1993 ; Jankowski, 1995).
Cependant, les méthodes d'AMC toutes seules sont incapables de tenir compte de tous les aspects des problèmes de décision à référence spatiale. En effet, avec les approches conventionnelles d'analyse multicritère spatiale (i.e. sans utilisation du SIG), la dimension spatiale est totalement occultée alors que plusieurs chercheurs (e.g. Giupponi et *al*., 1999, Herwijnen et Rietveld, 1999 ; Jiang et Esatman, 2000 ; Jankowski et *al*., 2001 ; Feick et Hall, 2002 ; Phua et Minowa, 2005 ; Koo et O'Connell, 2006 ; Strager et Rosenberger, 2006) insistent sur l'importance de prendre en compte la distribution géographique des actions, des critères d'évaluation et des paramètres préférentiels. Koo et O'Connell (2006), par exemple, remarquent, qu'avec ces approches, les performances des actions et les valeurs de paramètres de préférence sont ou bien intrinsèquement aspatiales ou bien agrégées en une valeur unique. En d'autres termes, ces approches assument une *homogénéité spatiale* sur toute la zone d'étude. Cette supposition est non réaliste car dans plusieurs problèmes de décision à référence spatiale, les performances des actions et les valeurs de paramètres de préférence varient dans l'espace. Quand à Giupponi et *al*. (1999), ils remarquent que "la même quantité de nitrate produira des niveaux de risque différents, selon qu'elle est utilisée dans une zone ayant un sol perméable et peu profonde comparée à une zone ayant des caractéristiques diamétralement opposées"[19].
Par ailleurs, les logiciels d'AMC sont peu pratiques dans l'aide à la décision à référence spatiale pour les deux raisons suivantes :

- Les logiciels d'AMC ne disposent pas de capacités nécessaires pour la gestion des données à référence spatiale.
- Les logiciels d'AMC manquent d'outils nécessaires à la représentation cartographique des résultats qui peuvent améliorer leur compréhension (*eye thinking*) et à arriver à une meilleure maîtrise du processus décisionnel. Plusieurs auteurs dont Wu (1998) et Koo et O'Connell (2006) insistent sur le plus-value de la représentation et la visualisation de l'espace de décision dans la prise de décision spatiale.

En revanche, le SIG est bien adapté pour répondre à ces deux insuffisances de l'approche classique de l'analyse multicritère spatiale. L'intégration du SIG et l'AMC semble être la meilleure solution pour combler leurs lacunes respectives.

1.5 Intégration du SIG et de l'analyse multicritère

Nous avons vu, au terme de la section 1.3, qu'un SIG tout seul est bien adapté pour la représentation de la complexité des problèmes de décision à référence spatiale mais il échoue, au

[19]Notre traduction de "It is in fact, evident that the same amount of nitrate released by a cultivated field will produce a different level of risk for the environment if located in area with permeable soils and shallow, unprotected aquifers compared to another area with the opposite characteristics." Giupponi et *al*. (1999, p. 260)

même temps, à prendre en compte la dimension multicritère inhérente de ces problèmes. Nous avons également conclu à la fin de la section précédente que l'AMC permet une formulation et modélisation des problèmes spatiaux, mais par contre elle est limitée lorsqu'il s'agit de représenter la dimension spatiale des problèmes spatiaux.
Il nous semble donc naturel de parvenir à la nécessite de conjuguer les potentialités de deux outils en vue d'une aide à la décision spatiale plus élaborée. Dans cette section, nous commençons par avancer les arguments qui militent en faveur de cette intégration. Ensuite, nous présentons les différents modes et directions d'intégration physique. Et nous terminons par dresser le bilan de l'état actuel de l'intégration SIG-AMC.

1.5.1 Nécessité de l'intégration SIG-AMC

Les arguments en faveur d'une intégration entre SIG et AMC sont nombreux (Pereira et Duckstein, 1993 ; Laaribi, 2000 ; Chakhar et Martel, 2003, 2004 ; Malczewski, 2004) :

1. Les SIG ont atteint une certaine maturité en tant qu'outils de gestion de données pour traiter et analyser un ensemble, de plus en plus grandissant, de problèmes à référence spatiale. Néanmoins, ils ne sont qu'à leurs premières balbutiements en tant qu'outils d'aide à la décision. Or les problèmes décisionnels à référence spatiale, de plus en plus appréhendés dans toutes leurs dimensions, présentent toutes les caractéristiques des problèmes multicritères et, en tant que tels, leur traitement par analyse multicritère trouve sa raison d'être.

2. L'approche SIG permet de définir des solutions potentielles, d'aider à construire des critères d'admissibilité et d'évaluer automatiquement ces solutions pour un ceratin nombre des critères quantitatifs (par exemple, surface aménagée de chacune des zones d'un bassin versant, coût total de l'aménagement de chaque zone, etc.).

3. Les capacités analytiques des SIG et notamment les techniques d'*overlay* permettent l'application d'un ensemble de critères afin de générer les solutions potentielles. Cependant, les solutions obtenues répondent simultanément à tous les critères. En toute rigueur, les critères utilisés par le SIG sont en réalité des contraintes d'admissibilité qui sont de nature à transformer l'ensemble des solutions possibles de départ en un ensemble réduit de solutions qui peuvent facilement être évaluées et comparées par une méthode multicritère.

4. Les SIG, comme les modèles monocritères d'optimisation, définissent les actions et les contraintes pour le *design* de la solution alors que l'analyse multicritère, du moins dans son aspect agrégation, met plus l'accent sur la sélection que sur le *design* ; de tels intérêts sont évidemment complémentaires.

5. Les différentes lois exigeant des approches multicritères pour les problèmes de planification et d'aménagement du territoire ont, en quelques sortes, incité les différentes organisations et entreprises impliquées dans ce type de problèmes à renforcer les SIG qu'elles détiennent avec les fonctionnalités de l'analyse multicritère. À titre d'exemple, nous citons le *National Environmental Policy Act* (1969, États-Unis) imposant aux décideurs qui veulent implanter des infrastructures tels qu'un aéroport ou une entreprise la prise en compte d'une série de critères économiques, politiques, sociaux, environnementaux et techniques.

1.5.2 Schéma conceptuel, modes et directions d'intégration

1.5.2.1 Schéma conceptuel d'intégration

L'idée conceptuelle sur laquelle se base les travaux d'intégration SIG-AMC est donnée en Figure 1.6. Elle consiste à utiliser les fonctionnalités du SIG pour préparer les entrées (*inputs*) nécessaires à l'application d'une méthode multicritère.
Opérationnellement, un système SIG-AMC intégré commence par la définition du problème, où les capacités analytiques du SIG sont utilisées pour générer l'ensemble d'actions potentielles et l'ensemble des critères. Ensuite, la procédure de superposition (*overlay*) est utilisée pour réduire un nombre initialement très grand (voire infini) d'actions en un nombre limité d'actions qui peuvent facilement être évaluées et comparées par une méthode d'analyse multicritère. Finalement, les potentialités de présentation du SIG sont utilisées pour visualiser les résultats de l'analyse.

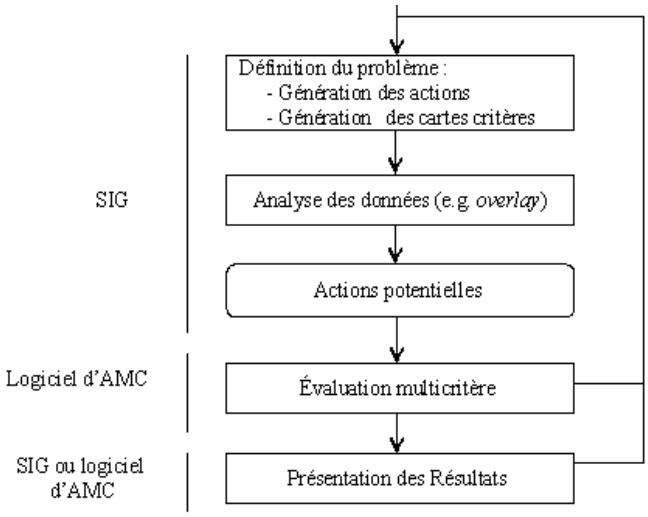


FIG. 1.6 – Schéma conceptuel d'intégration SIG-AMC

1.5.2.2 Différents modes d'intégration

Nous pouvons distinguer quatre modes d'intégration SIG-AMC (Goodchild, 1991 ; Goodchild et *al.*, 1992 ; Nyerges, 1992 ; Laaribi et *al.*, 1993 ; Jankowski, 1995 ; Karimi and Houston, 1996 ; Malczewski, 1999 ; Jun, 2000 ; Chakhar, 2001 ; Comes et Lins, 2002 ; Chakhar et Martel, 2003, 2004 ; Malczewski, 2006) : (i) pas d'intégration, (ii) intégration indirecte (*loose coupling*), (iii) intégration encastrée (*tight coupling*), et (iv) intégration complète (*full integration*). Dans le premier mode il n'y a pas une intégration entre les deux outils. C'est le cas de

tous les travaux réalisés jusqu'à la fin des années 1980[20]. Les trois autres modes correspondent à différents niveaux de complexité. Nous les décrivons brièvement dans les trois paragraphes suivants.

Intégration indirecte. Les deux outils, un SIG et logiciel d'AMC, restent indépendants et le dialogue entre eux se fait à travers un *système intermédiaire* (Figure 1.7.a). Ce dernier permet de re-formuler et re-structurer les données obtenues suite à l'opération de superposition dans le SIG en une forme convenable pour le logiciel d'AMC. Les autres paramètres nécessaires à l'analyse sont introduits directement via le logiciel d'AMC. Les résultats de l'analyse (complètement effectuée par le logiciel d'AMC) peuvent être visualisés par le logiciel d'AMC ou exportés, via le système intermédiaire, vers le SIG pour les visualiser ou les stocker ; et, éventuellement, pour d'autres traitements. Dans ce mode d'intégration, les deux logiciels restent complètement indépendants mais les fonctionnalités d'analyse multicritère sont utilisables. Cependant, son emploi reste lourd et l'interactivité complexe rend ce mode d'intégration peu exploitable en pratique. Ce mode à été adopté surtout par les premiers travaux d'intégration SIG-AMC au début des années 1990 (e.g. Guimarães et *al.*, 1994 ; Jankowski, 1995) mais plusieurs travaux récents ont également suivi ce mode d'intégration.

Intégration encastrée. Les deux logiciels restent indépendants mais une seule interface (le plus souvent celle du SIG) est utilisée (Figure 1.7.b). Le dialogue entre les deux systèmes se fait toujours via un système intermédiaire mais pour l'utilisateur l'intégration est apparemment réalisée puisque les échanges de données lui sont transparents. Ce mode est une première étape vers une intégration effective et l'utilisation des fonctionnalités d'analyse multicritère est plus facile que le mode précédent. Cependant, le fait que les données soient stockées indépendamment, la souplesse d'exploitation et l'interactivité restent toujours problématiques. Ce mode d'intégration été adopté surtout à la fin des années 1990 (e.g. Bennett et *al.*, 1999 ; Riedl et *al.*, 2000).

Intégration complète. Une intégration complète permet d'avoir un système SIG-AMC intégré possédant une interface unique et une base de données commune (Figure 1.7.c). Dans ce mode, les fonctionnalités de l'analyse multicritère sont activées directement comme toute autre fonction de base du SIG. La base de données du SIG est renforcée afin qu'elle supporte aussi bien les données à référence spatiale que les paramètres nécessaires à l'application des techniques d'analyse multicritère. Les algorithmes multicritères sont re-programmés dans le macro-langage du SIG (e.g. AML d'Arc/Info ou PLL d'Intergraph ou encore Avenue d'ArcView) ou un langage procédural supporté par le SIG (e.g. comme le SIG ArcGIS d'ESRI qui supporte VBA et JAVA, MapObjects qui supporte VBA) ou un langage de script. Ce mode d'intégration a été utilisé par, par exemple, Eastman et *al.* (1995), Laaribi et *al.* (1996), Matthews et *al.* (1999) et Chakhar (2001).

[20]Probablement, les premiers travaux d'intégration SIG-AMC remontent à la fin des années 1980 avec les deux papiers de Diamond et Wright (1988) et de Moreno et Sigel (1988).

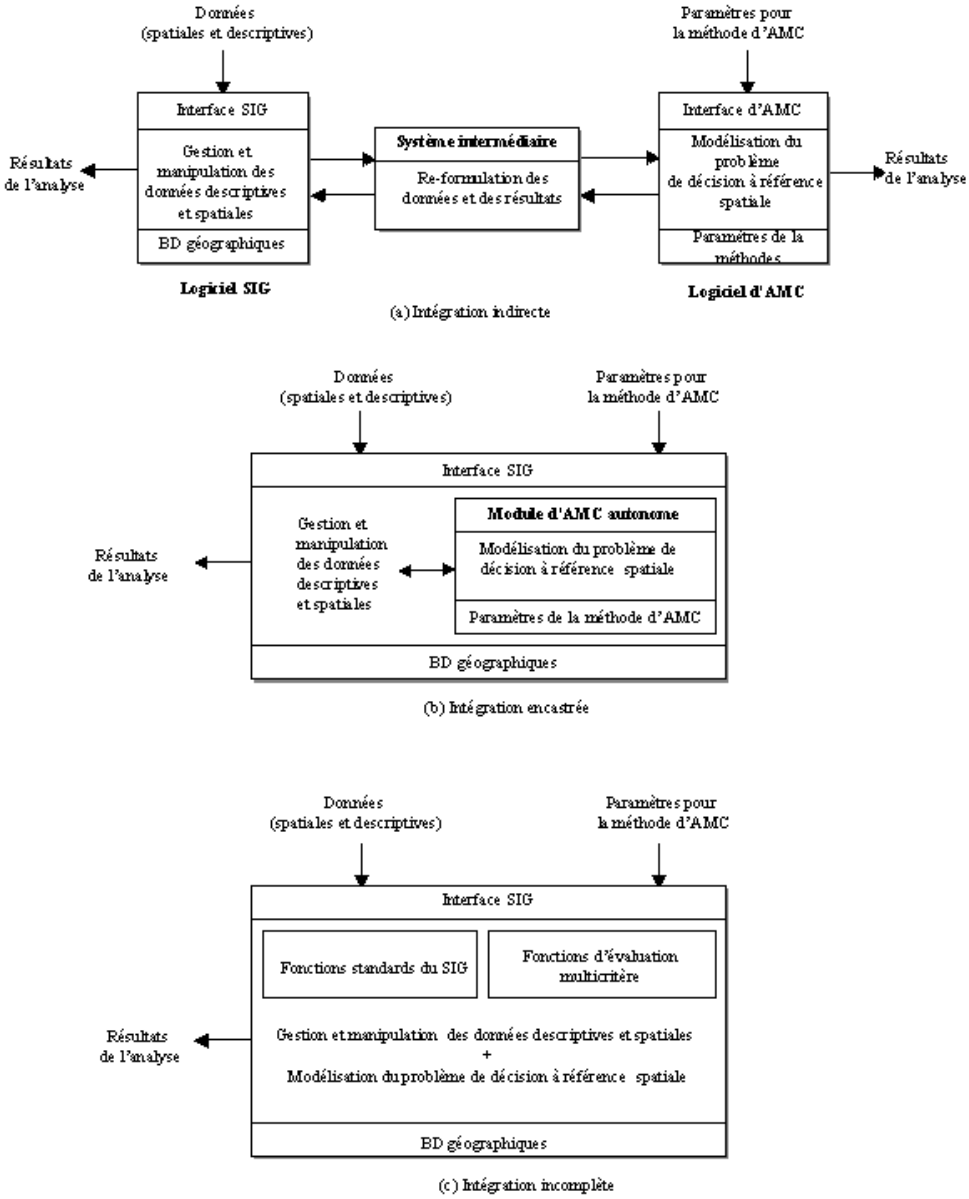


FIG. 1.7 – Différents modes d'intégration SIG-AMC—(*a*) Intégration indirecte, (*b*) Intégration encastrée, et (*c*) Intégration complète

1.5.2.3 Directions d'interaction

Une représentation schématique de l'interaction SIG-AMC est donnée dans Figure 1.8. Nous pouvons y distinguer cinq direction d'interaction SIG-AMC (Nyerges, 1992 ; Church

et *al*., 2000 ; Jun, 2000)[21] : (i) pas d'interaction, (ii) interaction à sens unique (*one-direction interaction*) avec le SIG comme logiciel principal, (iii) interaction à sens unique avec l'outil d'AMC comme logiciel principal, (iv) interaction à double sens (*bi-directional interaction*), et (v) interaction dynamique. L'interaction à sens unique ne permet qu'un seul sens de transfert de données et d'information. Le transfert peut ainsi être déclenché soit par le SIG (e.g. Laaribi et *al*., 1996 ; Jun, 2000 ; Chakhar, 2001 ; Malczewski et *al*., 2003) soit par le logiciel d'AMC (e.g. Antoine et *al*., 1997 ; Kächele et Dabbert, 2000). Dans l'approche d'interaction à double sens, le transfert de données et d'information peut se faire dans un sens ou dans l'autre (e.g. Eastman et *al*., 1995 ; Matthews et *al*., 1999). Néanmoins, avec ce type d'interaction, le transfert n'est effectué qu'une seule fois. L'interaction dynamique est comme la précédente sauf que dans ce cas le transfert entre les deux logiciels peut se faire selon le besoin de l'utilisateur (e.g. Jun, 2000).

Malczewski (2006) a établi une classification des travaux d'intégration SIG-AMC entre 1990 et 2004 selon le mode d'intégration et la direction d'interaction. Les principaux résultats sont les suivants :

- 26.0% d'articles ne donnent aucune indication ni sur le mode d'intégration, ni sur la direction d'interaction ;
- 33.2% d'articles ont opté pour le mode indirect, 29.8% pour le mode encastré et 11.0% pour le mode d'intégration complète ;
- 48% ont opté par une intégration avec le SIG comme logiciel de base, 12.5% avec l'outil d'AMC comme logiciel de base, 9.1% pour une intégration bi-directionnelle et 4.4% pour une intégration dynamique.

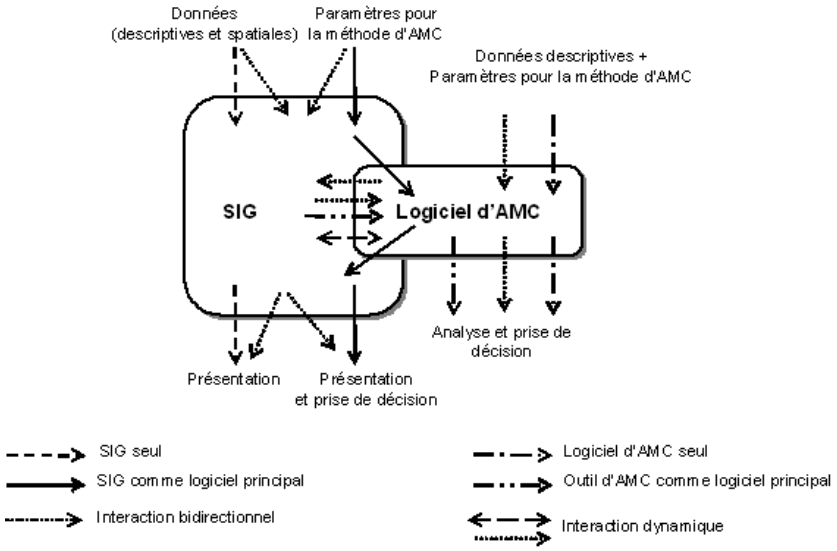


FIG. 1.8 – Représentation schématique de l'interaction SIG-AMC—inspiré de Church et *al*. (2000)

[21]Ces auteurs (sauf Church et *al*. (2000)) parlent de direction d'"intégration" mais nous pensons que le terme "interaction" est plus approprié.

1.5.3 État de l'art concernant l'intégration SIG-AMC

Dans une revue de littérature récente, Malczewski (2006) énumère environ 319 articles dédiés à l'intégration SIG-AMC entre 1990 et 2004. La liste complète de ces articles est disponible à l'adresse Internet suivante : `http://publish.uwo.ca/~jmalczewski/gis-mcda.htm`. Les résumes de ces articles sont également disponibles à l'adresse Internet suivante : `http://publish.uwo.ca/~jmalczewski/gis-mcda.htm`. Dans cette sous-section, nous présentons un extrait des travaux que nous jugeons les plus significatifs.

Parmi les premières tentatives d'incorporer les fonctionnalités de l'AMC dans les SIG est celle de Janssen et Rietveld (1990). Cependant, il ne s'agit pas d'une intégration effective puisque les deux outils sont utilisés indépendamment. En effet, les auteurs ont utilisé les données récupérées du SIRS de la *National Physical Planning Agency of the Netherlands* utilisant le SIG Arc/Info pour alimenter une procédure multicritère INFINITE, développée de manière *ad hoc*, qui a été appliquée au problème de l'utilisation agricole des terres aux Pays-Bas.

La première intégration effective du SIG et de l'AMC est très probablement celle réalisée par Carver (1991)[22]. L'auteur a utilisé le langage de macrocommandes Arc Macro Language (AML) du SIG Arc/Info pour incorporer trois techniques multicritères (*Ideal Point*, *Hierarchical optimization* et *Concordance-Discordance Analysis*), préalablement programmées en FORTRAN 77, dans Arc/Info. Le système a été utilisé pour le choix de sites appropriés à l'enfouissement de déchets nucléaires au Royaume-Uni. Les procédures d'*overlay* d'Arc/Info ont été utilisées pour identifier les 5878 sites potentiels en tenant compte de quatre critères d'admissibilité relatifs à la géologie, densité démographique, accessibilité et conservation du sol. Dans un deuxième temps, l'auteur a utilisé chacune des méthodes en considérant 16 critères d'évaluation pour identifer les 25 meilleures localisations.

Le travail de Eastman et *al.*(1993b) semble être le plus significatif dans les premières tentatives d'intégration SIG-AMC. En effet, les auteurs ont ajouté un outil analytique d'aide à la décision à la version 4.1 d'IDRISI[23]. Le module d'analyse incorporé dans IDRISI comporte des modules d'évaluation multicritère, dont la méthode est celle de la somme pondérée, et de détermination de poids utilisant la méthode AHP de Saaty (1980). En outre, il comporte des modules d'analyse de propagation d'erreur utilisant la méthode de Monte-Carlo, d'analyse de probabilité de Bayes, d'analyse de séries "floues", etc. IDRISI est probablement l'un des rares logiciels SIG qui consacre un ensemble de modules analytiques à l'aide à la décision en générale et multicritère en particulier.

Il existe plusieurs autres travaux d'intégration SIG-AMC qui ont été publiés en 1993. Pereira et Duckstein (1993), par exemple, ont incorporé la technique de *compromise programming* de Zeleny (1973) dans le SIG IDRISI pour un problème d'analyse des aptitudes (*suitability*) du sol. Les auteurs ont incorporé également deux techniques de normalisation : *value assessment* pour les données cardinales et *priority assessment* pour les données ordinales. Également en 1993, Can (1993) a intégré la méthode de surclassement de synthèse ELECTRE I, écrit en C, dans Arc/Info via son langage de macro-commandes AML pour l'évaluation de la qualité résiden-

[22] Selon l'étude de Malczewski (2006), cet article est probablement le plus cité dans les travaux d'intégration SIG-AMC.

[23] IDRISI est un SIG dédié principalement aux applications de télédétection, conçu et distribué par l'Université Clarke aux États-Unis.

tielle dans la ville de Syracuse, de l'état de New York. Keller et Strapp (1993) ont combiné la méthode *ideal point analysis* avec le logiciel Terrasoft pour une application de réforme cadastrale. Banai (1993) a proposé l'intégration de la méthode AHP dans le SIG pour un problème de localisation. Ce travail est parmi les premiers à utiliser la logique floue dans un système SIG-AMC.

Dans le papier de Jankowski et Richard (1994), les auteurs ont intégré quelque techniques, dont la méthode d'optimisation hiérarchique, d'évaluation multicritère dans le SIG pour l'identification d'un corridor destiné à l'implantation d'une autoroute. Guimarães et *al*. (1994) ont combiné un algorithme génétique et l'analyse multicritère afin de générer un ensemble d'actions robustes dans un problème de localisation des points de vente et de service.

Jankowski (1995), en s'inspirant de deux modes d'intégration indirecte (*loose coupling strategy*) et encastré (*tight coupling strategy*) proposés par Nyerges (1993) pour incorporer des modules d'analyse environnementale dans le SIG, a développé deux stratégies pour intégrer différentes méthodes multicritères dans le SIG Arc/Info. Dans la première stratégie, un module d'échange *File Exchange Module* (FEM) a été utilisé pour assurer le lien entre le SIG Arc/Info et un ensemble de logiciels d'AMC existants[24]. Le SIG a été utilisé pour générer l'ensemble des actions potentielles. Ensuite, le FEM a été utilisé pour extraire les données (ensembles des actions, les performances, etc.) à partir de la base de données du SIG et pour générer le tableau de performance sous forme d'un fichier ASCII. C'est ce dernier qui a été utilisé comme entrée aux différents logiciels d'AMC. La deuxième stratégie consiste à enrichir le SIG par différentes fonctions d'évaluation multicritère ("*decision table generation*", "*decision maker's preferences enumeration*", "*aggregation procedure selection*" et "*sensitivity analysis*") représentant les opérations commune aux méthodes multicritères discrètes. Néanmoins, cette deuxième stratégie n'était pas implementée.

Jain et *al*. (1995) décrivent un SIAD spatial destiné à la planification durable de la production animale dans la région de Southern Iowa aux États-Unis. Le SIAD a été construit en incorporant dans Arc/Info, via son module ARCGRID, la méthode multicritère d'optimisation hiérarchique (Jankowski et Richard, 1994) et une technique *ad hoc* de pondération. Le système incorpore également le logiciel ERADS[25] utilisé surtout pour la classification et traitement des données relatives à l'utilisation et couverture du sol. Le résultat de l'analyse sont visualisés en utilisant le module ARCPLOT d'Arc/Info et le SIG ArcView.

Malczewski (1996) considère le cas où un groupe de décideurs sont impliqués dans un problème de décision à référence spatiale. L'auteur propose une approche basée sur l'incorporation, dans IRISSI, de la méthode multicritère TOPSIS[26] de Hwang et Yoon (1981) et la règle du choix de Borda (Borda, 1781). TOPSIS permet d'ordonner les actions potentielles selon la proximité (en terme de distance) de la solution idéale. Elle été utilisée pour identifier les préférences de chaque participant dans le processus décisionnel. La règle du choix de Borda a été

[24] Il s'agit de Best Choice qui implémente la méthode de somme pondérée, Expert Choice qui implémente la méthode AHP, un logiciel implémentant la méthode AIM (Aspiration level Interactive Method), et MADM-Windows supportant trois méthodes discrètes (conjunctive, disjunctive et TOPSIS).

[25] ERADS est développé par Earth Resources Data Analysis Systems, Inc., Atalanta, Georgia, États-Unis. Il est destiné aux traitements d'image et de données à référence spatiale mais il supporte plusieurs fonctionnalités de base du SIG.

[26] Abréviation de Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution.

utilisée pour combiner les préférences individuelles ou pour établir un rangement de consensus. Le système développé a été appliqué à un problème hypothétique de localisation d'un complexe nocif impliquant trois décideurs.
Laaribi et *al*. (1996) sont probablement les premiers à proposer une méthodologie de guidage "systématique" pour le choix d'une méthode multicritère dans une perspective d'intégration dans un SIG. En effet, les auteurs ont proposé une méthodologie à trois phases destinée à aider le décideur lors du choix de la méthode à incorporer dans un SIG. Cette méthodologie établit d'abord une correspondance entre les caractéristiques du problème de décision en consideration et les caractéristiques des méthodes multicritères appropriées au problèmes. Ensuite, en se servant d'un arbre de classification, elle procède par élimination jusqu'à l'identification de la méthode la plus appropriée. Laaribi et *al*. (1996) ont appliqué la méthodologie proposée à un problème de conservation des eaux et du sol en Tunisie. La méthode sélectionnée était PROPMETHEE II qui a été ensuite incorporé dans le SIG Arc/Info.
Jankowski et *al*. (1997) proposent un SIAD spatiale, nommé Spatial Group Choice (SGC), destiné à la prise de décision de groupe. SGC comporte deux modules : (i) un module d'évaluation multicritère constitué d'un sous-module de prise de décision multicritère et un sous-module de vote, et (ii) un module de visualisation basé sur ArcView 2. Les deux modules communiquent via un protocole d'échange dynamique (*dynamic data exchange protocol*). Le tout fonctionne sur le système d'exploitation Microsoft Windows for Work Groups. Le système a été appliqué à un problème de choix de trois localisations pour le développement d'habitat impliquant cinq décideurs.
Le prototype SimLand proposé par Wu (1998) est une intégration encastrée du SIG Arc/Info, de l'automate cellulaire et de la méthode multicritère AHP. Cette dernière a été utilisée pour déterminer les règles de transition de l'automate cellulaire. Le prototype a été utilisé pour la simulation de l'évolution de l'utilisation du sol dans la ville de Guangzhou dans le sud de la Chine. L'auteur énumère trois avantages de SimLand : (i) visualisation de la prise de décision, (ii) accès plus facile aux données, et (iii) une définition plus réaliste des règles de transition.
Giupponi et *al*. (1999) ont utilisé l'analyse multicritère et le SIG pour évaluer et représenter les pollutions diffuses dans le bassin versant de la région de Lagon (Venise) en Italie. Deux types d'agriculture ont été considérés (ordinaire et écologique) et comparés en tenant compte de deux critères : vulnérabilité du sol et risque de pollution. Des modèles de simulation du risque de pollutions diffuses ont été utilisés pour mesurer le risque de pollution des ressources en eaux. Les cartes de vulnérabilité de ressources en eau ont été obtenues en évaluant les différents types d'utilisation du sol par rapport à plusieurs variables, telles que le type du sol et les conditions climatiques. Le SIG IDRISI a été utilisé pour combiner ces différentes cartes. Le papier ne donne aucune indication sur la méthode multicritère utilisée mais il semblerait que ça soit la somme pondérée. Le résultat de l'étude a montré la potentialité de l'agriculture écologique pour réduire le risque de pollution des ressources en eau aussi bien surfaciques que souterraines.
Jiang et Easrman (2000) discutent quelques concepts et problèmes relatifs à deux procédures d'évaluation multicritère couramment utilisées dans le SIG. La première est à la *combination booléenne* (*boolean overlay*) où des niveaux d'aspiration sont associés aux différentes cartes critères permettant ainsi de produire des cartes booléennes, et qui sont par la suite combinées par les opérateurs logiques d'intersection (AND) ou d'union (OR). La deuxième procédure est

la somme pondérée linéaire (*weighted linéaire combination*) où les cartes sont d'abord normalisées et ensuite combinées en utilisant la technique de somme pondérée. Pour résoudre les différences conceptuelles entre les deux procédures, les auteurs proposent d'utiliser la logique floue pour normaliser les performances. Ils proposent un nouvel opérateur, *Ordered Weighted Average*, qui, selon eux, généralise les règles d'agrégation précédentes. L'idée de base des auteurs consiste à considérer le résultat de l'agrégation comme un ensemble flou dont les opérateurs MAX et MIN représentent les extrémités. L'approche proposée a été incorporée dans IDRISI et appliquée à un problème de localisation industrielle dans la ville de Nakuru en Kenya.

Jorein et Musy (2000) (voir également Jorein et *al*. (2001)) ont utilisé un SIAD, nommé MAGISTER (Multicriteria Analysis and GIS for Territory) (cf. Jorein (1998)) pour un problème de construction des habitats dans une zone rurale située dans le canton de Vaud en Suisse. MAGISTER est construit sur le base du SIG MapInfo. La méthode de classification multicritère ELECTRE TRI a été programmée en utilisant MapBasic et incorporée dans MapInfo. Les auteurs ont utilisé un *indice d'homogénéité* qui permet de calculer la similarité entre chaque élément du territoire (i.e. pixel) et les caractéristiques moyennes de la zone afin de subdiviser le domaine d'étude en zones homogènes. Les zones homogènes générées représentent les actions potentielles qui sont alors classées, par ELECTRE TRI, dans trois catégories de convenance : favorable, incertaine et non favorable.

Pour tenir compte de la complexité dans les problèmes de gestion et d'aménagement intégré des basins versants, Itami et *al*. (2000) proposent l'intégration de la méthode AHP de Saaty (1980) dans le SIG ArcView d'ESRI. AHP permet de prendre en compte les connaissances des experts et le module de Spatial Analyst d'ArcView est utilisé pour combiner les différentes cartes attributs. Le prototype permet en particulier de construire la hiérarchie objcetifs/attributs et de pondérer les différents facteurs. Le prototype a été utilisé dans un problème de bassin versant dans la région de Victoria en Australie.

L'article Jankowski et *al*. (2001) est intéressant dans le sens où il figure parmi les premiers travaux destinés à la *décision multicritère spatiale visuelle*. En effet, les auteurs étendent la métaphore de la carte cartographique au delà d'un simple moyen de représentation et de visualisation pour devenir un espace de décision où l'utilisateur, en se basant sur une manipulation directe de la carte, peut (i) ranger les alternatives de décision, (ii) pondérer les cartes critères, et (iii) modifier l'espace de critères. Le papier présente une description plus au moins détaillée du prototype développé. Ce dernier, nommé DECADE—pour Dynamic, Exploratory Cartography for Decision Support—a été utilisé pour ranger les différents départements (*counties*) de l'état d'Idaho aux États-Unis quand à leur priorité pour l'installation des centres hospitalières.

Gomes et Lins (2002) présentent un cas d'étude pour montrer la potentialité d'une intégration SIG-AMC dans l'aide à la décision spatiale. Pour ce faire, les auteurs ont considéré un problème hypothétique qui consiste à localiser la mairie de la ville de Rio de Janeiro au Brézil. Quinze critères regroupés en cinq familles (infrastructure, éducation, sécurité, santé et emploi) ont été considérés. Les auteurs ont utilisé une stratégie d'intégration encastrée similaire à celle adoptée par Jankowski et Richard (1994) pour coupler le SIG (les auteurs ne précisent pas quel SIG a été utilisé) et le logiciel VIG supportant la méthode de programmation mathématique à objectifs multiples Pareto Race de Korhonen et Laakso (1986). Un aspect important dans ce papier revient au fait que les auteurs considèrent que chaque district (i.e. polygone) est une ac-

tion potentielle. Ceci a pour effet de réduire considérablement le nombre d'actions à évaluer et permet en particulier d'utiliser les méthodes de surclassement de synthèse (quoique, les auteurs ont utilisé une méthode continue, l'idée nous semble intéressante surtout lorsqu'une méthode de surclassement de synthèse se prête mieux au problème).

Sharifi et *al*. (2002) considèrent le problème de re-localisation de la zone frontalière entre le "Tunari National Park" et la ville de "Cochabamba" en Bolivie. Ils ont intégré le logiciel GeoChoice[27] et le logiciel DEFINITE (cf. Janssen et *al*., 2001). La méthode multicritère élémentaire de la somme pondérée, incorporée dans DEFINITE, a été utilisée pour (i) combiner les différentes cartes critères générées par GeoChoice, et (ii) effectuer une analyse de sensibilité. Les auteurs ont également utilisé la méthode AHP de Saaty (1980) (programmée dans GeoChoice) pour déterminer le poids de différentes cartes critères. Un aspect particulier dans ce papier est le fait que chaque action potentielle est représenter par une carte. En effet, trois cartes, chacune représentant une approche pour répondre aux objectifs des décideurs, ont été générées et comparées avec la situation actuelle.

Martin et *al*. (2003) ont développé et testé un système intégré d'aide à la décision (SIAD) pour l'aménagement de la plaine alluviale de la Rivière Saint-Charles au Québec, Canada. Le SIAD est composé d'une banque de données, du SIG Mapinfo, d'une interface usager et deux logiciels d'AMC (PROMOCALC et GAIA 3.5) implémantant les méthodes PROMETHEE I et II. Le SIAD a été utilisé pour évaluer huit scénarios d'aménagement du corridor de la Rivière Saint-Charles sur la base de onze critères.

Malczewski et Rinner (2005) ont repris le module OWA—supportant l'opérateur *Ordered Weighing Average* de Yager (1988)—qu'ils ont récemment implémenté (cf. Rinner et Malczewski (2002)) dans le logiciel CommonGIS (cf. Andrienko et Andeienko, 1999) pour permettre la prise en compte des opérateurs linguistiques comme *très*, *près de*, *autour de*, *presque*, *plus au moins*, etc. L'objectif des auteurs a été de faciliter la définition de différentes stratégies de décision et d'analyse exploratoire multicritère. La nouvelle version du module OWA permet à l'utilisateur de "jouer" sur les valeurs de poids de l'opérateur OWA pour implémenter des stratégies intermediaries entre les stratégies extrêmes : (i) une stratégie optimiste (qui correspond à l'opérateur binaire OR), et (ii) une stratégie pessimiste (qui correspond à l'opérateur binaire AND). Dans tous les cas, des expressions linguistiques, représentées par des nombres flous triangulaires, peuvent être utilisées. Le papier présente également l'application de l'approche proposée à un problème d'évaluation de la qualité résidentielle dans la ville de London, Ontario (Canada).

Marinoni (2005) a intégré deux versions de la méthode multicritère PROMETHEE (la version standard et une version stochastique) dans le SIG ArcGIS d'ESRI. Les deux méthodes ont été ensuite utilisées pour le choix d'une parcelle pour la construction de nouvelles habitations. Un aspect important dans ce papier concerne le fait que les actions sont construites par agrégation (spatiale) des pixels.

Koo et O'Connell (2006) distinguent entre l'*analyse multicritère aspatiale* et l'*analyse multicritère spatiale*. Selon eux, la distinction principale entre les deux approches consiste au fait que dans la deuxième approche on dispose d'une matrice de décision par critère alors que dans la

[27] GeoChoice, développé par GeoChoice Inc. (`www.geochoice.com`), supporte la prise de décision spatiale en groupe

première approche une seule matrice est considérée. Ensuite, les auteurs ont proposé une nouvelle approche pour l'analyse multicritère spatiale qui se distingue de l'approche actuellement utilisée par la prise en compte explicite de la dimension spatiale des paramètres préférentielles et en particulier du poids de différents critères. En effet, les auteurs ont supposé que le poids d'un critère varie d'une zone à une autre. Pour prendre en compte la "spatialité" du poids, ils utilisent deux fonctions : (i) une fonction w_{Nj} mesurant la distribution d'un indicateur (nommé N-indicator) représentant l'inverse de la potentialité de pollution en nitrate de chaque pixel, et (ii) une fonction w_{Ej} représentant la potentialité de chaque pixel pour une activité agricole. Les auteurs ont appliqué leur approche à un problème de gestion de la pollution diffuse du nitrate en Angleterre. La méthode multicritère utilisée est celle de la *Compromise Programming* de Zeleny (1973). Notons enfin que les auteurs n'abordent pas la question d'intégration dans un SIG mais la description qu'ils donnent exige l'utilisation d'un tel outil ou, au moins, un outil qui supporte la représentation cartographique.
Marinoni (2006) propose une approche itérative basée sur une variation spatiale dans la géométrie (forme) des régions. Les zones homogènes sont alors définies comme une agrégation spatiale des pixels basée sur une relation de voisinage. L'auteur propose également un exemple d'illustration basé sur l'intégration de la méthode PROMETHEE dans ArcGIS. En comparant l'évaluation obtenue par son approche à une évaluation existante obtenue par l'application de la méthode AHP, il a conclu que les méthodes de surclassement de synthèse se comportent plutôt bien pour des problèmes avec un grand nombre d'actions.

1.6 Limites des travaux d'intégration SIG-AMC

Dans la section précédente nous avons présenté un extrait des travaux d'intégration SIG-AMC. Malgré le nombre important de ces travaux, seulement 11.0%[28] d'entre eux procèdent par intégration complète. Mais même avec les travaux d'intégration complète, plusieurs limites persistent encore. Dans ce qui suit, nous dressons la liste des limites des travaux d'intégration SIG-AMC. Les chapitres qui suivent sont destinés y répondre.

1. *Modes d'intégration indirecte ou encastrée*. La plupart de travaux d'intégration SIG-AMC ont opté soit pour l'intégration indirecte (33.2%) soit pour l'intégration encastrée (29.8%). L'intégration complète n'est utilisée que dans 11.0%[29]. Ce constat s'explique par les trois raisons suivantes : (i) simplicité de ces deux modes d'intégration, (ii) par rapport à l'approche par intégration complète, ces deux approches ne demandent pas ou peu d'effort de programmation additionnelle, (iii) l'existence des logiciels commerciaux pour la plupart des méthodes multicritère[30], (iv) les deux outils sont relativement récents et une intégration complète, qui nécessite un effort considérable, aussi bien conceptuel que technique, n'est motivée que par une reconnaissance de la plus-value d'une telle intégration de la part des praticiens, et (v) manque d'échanges entre les chercheurs de deux domaines de recherche.

[28] Sauf indication contraire, tous les pourcentages donnés dans cette section sont empruntés de Malczewski (2006).

[29] Le 26% qui reste correspond aux travaux qui ne donnent aucune indication sur le mode d'intégration adopté.

[30] Par exemple : Expert Choice pour la méthode AHP, PREFCALC pour UTA, ELECTRE III/IV, ELECTRE TRI et IRIS pour les différentes méthodes de la famille ELECTRE, etc.

2. *Intégration d'une seule (ou un nombre limité) de méthode(s) d'AMC*. La plupart des travaux d'intégration proposent l'incorporation d'une seule ou d'un nombre limité de(s) méthode(s) d'AMC dans le SIG. Cependant, il est bien établit (voir, par exemple, Carver, 1991 ; Ozerny, 1992 ; Heywood et *al*. 1995 ; Guitouni et *al*., 1999b ; Chakhar et Martel, 2003) que chaque méthode multicritère possède ses avantages et ses inconvénients de telle sorte qu'une méthode peut être appliquée dans un type particulier des problèmes et pas dans un autre type. Par exemple, dans une étude effectuée par Heywood et *al*. (1995), les auteurs ont utilisé les procédures d'analyse multicritère disponibles dans IDRISI et SPANS pour un problème de choix d'une zone pour le développement d'habitat et ont conclu que les résultats obtenus par les deux systèmes ne s'accordent que dans seulement 34.8% des cas. De plus, les problèmes de décision à référence spatiale sont très différents et il n'est pas possible qu'une seule méthode peut être appliquée avec succès à tous ces problèmes. Par ailleurs, la "démocratisation" de l'utilisation du SIG a élargie son champ d'application mais a fait naître au même temps la nécessité de diversifier les techniques d'analyse et de modélisation disponibles dans les SIG y compris celles de l'AMC.

3. *Choix de la méthode multicritère*. Dans la plupart des applications de l'AMC, le choix de la méthode à utiliser se fait de manière assez arbitraire : soit que l'analyste est familiarisée avec une méthode particulière, soit qu'elle a été développée de manière *ad hoc* ou encore tout simplement parce qu'elle est disponible sous forme de logiciel. Cependant, l'importance du choix de la méthode à utiliser dans un problème particulier a été soulevée par différents auteurs (e.g. Ozernoy, 1992 ; Hobbs et Meier, 1994 ; Guitouni, 1998 ; Cao et Brustein, 1999 ; Guitouni et *al*., 1999b ; Laaribi, 2000 ; Lahdelma et *al*., 2000 ; Lu et *al*., 2000 ; Caillet, 2003 ; Liu et *al*., 2003 ; Opricovic et Tzeng, 2006). Il existe un certain nombre de travaux qui ont été reportés dans la littérature. Ces travaux se basent sur l'utilisation (i) d'un arbre de classification (e.g. Hwang et Yoon, 1981 ; Teghem et al., 1989 ; Yoon et Hwang, 1995), (ii) d'une méthode multicritère (e.g. Tecle, 1992 ; Tecle et Duckstein, 1992), ou (iii) d'un système expert/d'un SIAD (e.g. Ozernoy, 1992 ; Poh, 1995 ; Quaddus, 1997, Lu et *al*., 1999, 2000). Malgré l'existence de quelques travaux de recherche concernant le choix de la méthode multicritère à appliquer dans des problèmes sur le territoire (e.g. Jansen et *al*., 1984 ; Hobbs et *al*., 1992 ; Tecle, 1992 ; Tecle et Duckstein, 1992) il n'existe que très peu de travaux qui ont été accomplis dans une perspective d'intégration dans un SIG (e.g. Laribi et *al*., 1996 ; Chakhar, 2001 ; Chakhar et Martel, 2003-2004).

4. *Intégration des méthodes du critère unique de synthèse*. Selon les chiffres reportés par Malczewski (2006), 71.3% de travaux d'intégration SIG-AMC concernent des *méthodes discrètes* et 28.7% concernent des *méthodes continues*. Parmi ceux adressés aux méthodes discrètes, il comptabilise 58.3% de travaux qui utilisent les méthodes du critère unique de synthèse[31] (e.g. Eastman et *al*., 1995 ; Araujo et Mecedo, 2002 ; Marinoni, 2004 ; Wu et *al*., 2004) et seulement 4.7% qui utilisent les méthodes de surclassement de synthèse (e.g. Craver, 1991 ; Can, 1992 ; Villa et *al*., 1996 ; Joerin et Musy, 2000 ; Joerin et *al*., 2001 ; Martin et *al*., 2003 ; Morari et *al*., 2004). D'après ces chiffres, il est facile de constater que, comparativement aux méthodes

[31] Parmi ce 58%, 39.3% utilisent des méthodes de type somme pondéré, 9.6% des méthode de type point idéal ou point de référence comme TOPSIS ou MOLA, et 9.4% utilisent la méthode AHP.

du type critère unique de synthèse, les méthodes de surclassement de synthèse ont reçu peu d'attention dans les travaux d'intégration SIG-AMC. Néanmoins, les méthodes de surclassement de synthèse sont généralement mieux adaptées aux problèmes de décision sur le territoire (Malczewski, 1999 ; Joerin et Musy, 2000 ; Joerin et *al.*, 2001). Cette situation a au moins deux explications : (i) les méthodes de surclassement de synthèse sont mathématiquement plus complexes et difficiles à expliquer aux décideurs, et (ii) elles sont sujettes à des "limitations informatiques"[32] par rapport au nombre d'actions.

5. *Connaissance approfondie du SIG et de l'AMC.* Malgré le nombre relativement important de travaux d'intégration SIG-AMC, leur utilisation en pratique reste limitée et le plus souvent ne dépasse pas le cadre de la recherche universitaire. Cette situation est due aux deux raisons suivantes : (i) l'utilisation de tels outils exige une bonne connaissance du SIG et d'AMC ; (ii) la spécificité de chaque problème de décision fait qu'il n'est pas possible de "transporter" un système développé pour un problème donné pour être exploité dans un autre problème. Une solution possible à ce problème consiste à faire doter le SIG par un langage formel du type *script* qui est souvent plus simple à apprendre qu'un langage procédural classique. Un grand nombre de systèmes SIG possèdent leur propre macro-langage comme AML d'Arc/Info, PLL d'Intergraph, Avenue d'ArcView, etc. Mais tous ces langages nécessitent un investissement supplémentaire de la part de l'utilisateur. Plusieurs systèmes SIG supportent des langages procéduraux bien établis comme par exemple le SIG ArcGIS qui supporte VBA et JAVA, et MapObjects qui supporte VBA. Il existe également plusieurs tentatives pour développer des langages de spécification formelle inspirés de l'Algèbre des cartes de Tomlin (1990) et qui sont destinés à faciliter l'incorporation des fonctionnalités de modélisation et d'analyse spatiale dans les systèmes SIG : Graphic Map Algebra (Kirby et Pazner, 1990), SPRING (Câmara et *al.*, 1994), GeoAlgebra (Takeyama et Couclelis, 1997), CALANG (Stocks et Wise, 2000), MapScript (Pullar, 2001), Map Calculus (Haklay, 2004), SimuMap (Pullar, 2004), Vector Map Algebra (Wang et Pullar, 2005), et Multidimensional Map Algebra (Mennis et *al.*, 2005a). Cependant, aucun de ces algèbres et langages n'est destiné explicitement à la modélisation spatiale multicritère.

1.7 Conclusion

Dans ce premier chapitre de mise en contexte, nous avons introduit les deux champs d'étude—le SIG et l'AMC—et présenté quelques travaux d'intégration SIG-AMC. Nous avons également établi une liste de quelques limites concernant ces travaux. Dans la suite de ce document, nous proposons des solutions conceptuelles, méthodologiques et informatiques permettant de répondre à ces limites.

[32] Notre traduction du terme "computational limitations".

Chapitre 2

Stratégie d'intégration SIG-AMC

Dans le chapitre précédent nous avons identifié cinq limites relatives aux travaux d'intégration SIG-AMC existants. La première limite est relative à l'utilisation des modes d'intégration indirecte ou encastrée. La deuxième limite concerne le nombre limité de méthodes d'AMC généralement incorporées dans le SIG. Ce chapitre présente une stratégie d'intégration SIG-AMC permettant de répondre conjointement à ces deux limites. L'idée de base de cette stratégie consiste à intégrer dans le SIG un ensemble restreint de fonctions d'évaluation multicritère. Ces fonctions représentent les opérations élémentaires nécessaires à l'implémentation des méthodes multicritères. En se servant des schémas généraux des méthodes d'analyse multicritère, nous avons pu identifier quinze fonctions d'évaluation multicritère. La stratégie proposée répond aux deux limites mentionnées précédemment car (i) elle permet une intégration complète dans le sens où les fonctions d'évaluation multicritère sont définies de manière générique et peuvent facilement être incorporées dans le SIG ; et (ii) elle donne la possibilité d'appliquer différentes méthodes multicritères existantes ou même de créer des méthodes "ad hoc" adaptées au problème considéré.

2.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons identifié les différentes limites de travaux d'intégration SIG-AMC. Les deux premières limites concernent le mode d'intégration et le nombre limité de méthodes souvent incorporées dans le SIG. L'intégration complète se réalise lorsque les fonctionnalités de l'analyse multicritère peuvent être utilisées comme toute autre fonction standard du SIG. Une solution possible à la deuxième limite consiste en l'intégration d'un grand nombre de méthodes d'AMC au sein du SIG. Nous pensons que cette solution présente plusieurs insuffisances : (i) le système n'est pas flexible, (ii) elle demande un effort considerable pour programmer les différentes méthodes d'AMC, et (iii) elle n'offre pas la possibilité de développer des méthodes "personnalisées".
La stratégie d'intégration SIG-AMC que nous proposons dans ce chapitre permet de répondre à

ces deux limites. L'idée de base de cette stratégie consiste à intégrer un nombre limité (mais suffisant) de fonctions *d'évaluation multicritère* (EMC) dans le SIG. Ces fonctions représentent les opérations de base nécessaires à l'implémentation de différentes méthodes multicritères comme par exemple la génération des actions potentielles, la construction des cartes critères, l'agrégation, la résolution d'un programme mathématique à objectifs multiples, la normalisation, la quantification, etc.
Le chapitre est organisé comme suit. Dans la section suivante, nous présentons les schémas généraux des méthodes d'AMC. Dans la troisième section nous donnons une idée générale sur la stratégie d'intégration SIG-AMC proposée. Dans la quatrième section nous détaillons les différentes fonctions d'évaluation multicritère destinées à être incorporées dans le SIG. Nous présentons un exemple didactique dans la cinquième section et nous terminons par discuter quelques éléments relatifs à la solution proposée.

2.2 Schémas généraux des méthodes multicritères

L'objectif de cette section est de présenter les schémas généraux des méthodes multicritères. Ils nous servent comme base pour l'identification des différentes fonctions d'évaluation multicritère à intégrer dans le SIG.
Comme mentionné dans le chapitre précédent, l'ensemble des actions A peut être fini (ou dénombrable) ou infini. Les méthodes multicritères sont regroupées sur la base de l'ensemble A en deux catégories : *discrètes* et *continues*. Les méthodes de la première catégorie s'appliquent lorsque l'ensemble des actions est discret et fini, et ceux de la deuxième s'appliquent lorsque l'ensemble des actions est infini. Dans ce deuxième cas on fait souvent appel à la *programmation mathématique à objectifs multiples*—PMOM.
Plusieurs auteurs (e.g. Yoon et Hwang, 1995) classifient les méthodes multicritères en (i) méthodes de *prise de décision multi-attribute* (MADM)[1], et (ii) méthodes de *prise de décision à objectifs multiples* (MODM)[2]. Nous retiendrons la classification discrète/continue pour deux raisons : (i) elle tient compte de l'état actuel de la représentation des données dans le SIG (*vecteur* vs *raster*), et (ii) elle est plus générale que la classification MADM/MODM car le terme "multi-attribute" dénote plutôt les méthodes multicritères d'inspiration américaine.
La Figure 2.1 présente les schémas généraux des méthodes multicritères discrètes et continues. Ces deux modèles, qui seront détaillés dans les deux sous-sections suivantes, illustrent la manière dont les différents éléments du problème de décision sont liés entre eux. Remarquons que différents concepts seront introduits dans le reste de cette section. Nous les définissons de manière plus formelle en Section 2.4 lors de la présentation des fonctions d'évaluation multicritère.

2.2.1 Méthodes discrètes

Les méthodes discrètes impliquent un nombre fini d'*actions* : $A = \{a_1, a_2, \cdots, a_n\}$ où n est le nombre d'actions. L'entrée d'une méthode discrète est un *tableau de performance* conte-

[1] Abréviation de *multiple attribute decision-making*.
[2] Abréviation de *multiple objective decision-making*.

nant les évaluations de l'ensemble des actions par rapport à un ensemble de critères d'évaluation. Les *critères d'évaluation* sont des facteurs sur lesquels les actions seront évaluées et comparées. L'*évaluation* (on dit également *score*) d'une action a selon un critère g_j est notée $g_j(a)$. Nous notons $G = \{g_1, g_2, \cdots, g_m\}$ l'ensemble de critères et par $F = \{1, 2, \cdots, m\}$ l'ensemble de leurs indices.

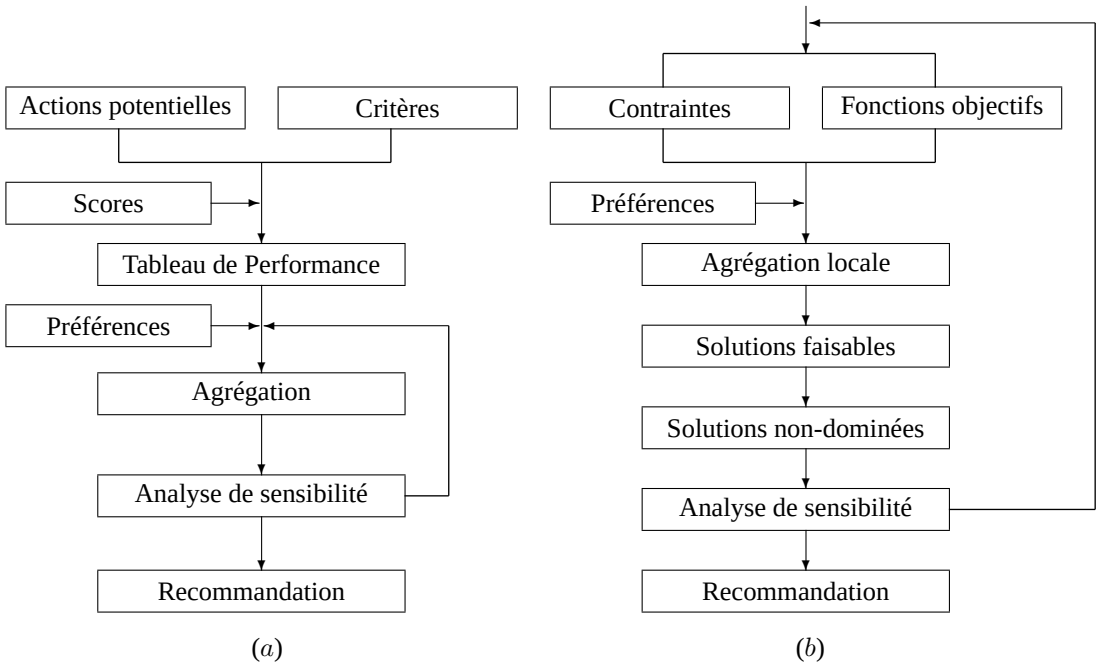


FIG. 2.1 – Schéma général des méthodes discrètes (a) et des méthodes continues (b)

L'étape suivante dans une méthode discrète est celle de l'*agrégation*. Elle consiste à utiliser un mécanisme mathématique d'agrégation pour combiner les différentes *évaluations partielles* (i.e. par rapport à un seul critère) en une *évaluation globale* (i.e. qui tient compte de tous les critères). Cette agrégation fournit au décideur une base pour la comparaison des différentes actions. Les procédures d'agrégation sont, en quelque sorte, la caractéristique principale des méthodes multicritères[3]. Dans le cadre des méthodes discrètes, nous distinguons généralement deux approches d'agrégation (cf. §2.4.14) : (i) l'*approche du critère unique de synthèse, évacuant toute incomparabilité*, et (ii) l'*approche de surclassement de synthèse, acceptant l'incomparabilité*.
En plus des évaluations, l'étape d'agrégation fait également appel à un ou plusieurs *paramètres de préférence*. Il s'agit souvent d'un jeu de coefficients d'*importance relative* associés aux différents critères d'évaluation. Le jeu de coefficients, désignés souvent par *poids*, fournit de l'information sur l'importance relative que le décideur accorde aux évaluations selon chacun des critères. En plus de ces coefficients, certaines méthodes multicritères font appel à d'autres

[3]Selon Guitouni et *al*. (1999a), dans la littérature, on utilise fréquemment la même dénomination pour désigner la méthode multicritère et la procédure d'agrégation multicritère de cette méthode.

paramètres de préférence comme par exemple des *seuils de discrimination* (*indifférence*, *préférence*) et de *veto*, au niveau de chacun des critères, pour modéliser localement les préférences du décideur (cf. §11.7).
Les imperfections et les incertitudes qui caractérisent tout problème de décision, nécessitent souvent une analyse de sensibilité/de robustesse permettant au décideur de tester la consistence des données et/ou des résultats. La dernière étape consiste à exploiter les résultats de l'opération d'agrégation multicritère en vue d'aider à formuler une *recommandation* qui puisse apporter une réponse au problème de décision.
Les méthodes de surclassement de synthèse les plus connues sont : la famille des méthodes ELECTRE[4] (Figueira et *al*., 2005b), la famille des méthodes PROMETHEE[5], MELCHIOR (Leclercq, 1984), ORESTE (Roubens, 1981) et REGIME (Hinloopen et *al*., 1983). Celles du critère unique de synthèse sont : TOPSIS (Hwang et Yoon, 1981), MAUT (Keeney et Raffia, 1976), UTA (Jacquet-Lagrèze et Siskos, 1982), SMART (Winterfeldt et Edwards, 1986), AHP (Saaty, 1980) et EVAMIX (Voogd, 1983). Il existe également plusieurs méthodes permettant de traiter diverses imperfections de l'information contenue dans les évaluations et dans les paramètres préférentiels, que ces imperfections soient de nature probabiliste, floue ou mixte (e.g. Slowinski et Teghem (eds), 1990 ; Chen et Hwang, 1992 ; Munda, 1995 ; Martel, 1998).

2.2.2 Méthodes continues

Les méthodes continues concernent les problèmes de décision impliquant un très grand nombre d'actions, voire un nombre infini. Les données d'entrée de base de ce type de méthodes est un ensemble de *contraintes* et un ensemble d'*objectifs*. Les contraintes représentent des restrictions, naturelles et/ou artificielles, sur la composante spatiale et/ou les attributs descriptifs des actions. Ainsi, les actions sont définies de manière *implicite* à travers ces contraintes.
Dans ces méthodes, les paramètres préférentiels prennent la forme de *coefficients d'importance* (ou *poids*) qui sont associés aux différentes fonctions objectifs. Ils peuvent également prendre la forme de *niveaux d'aspiration* (*aspiration levels*) qui doivent être satisfaits par toute solution admissible. Le décideur/l'analyste doit également indiquer, pour chaque fonction objectif, son sens d'optimisation, i.e., *maximisation* ou *minimisation*.
Généralement, des algorithmes d'*agrégation locale* et *interactive* sont utilisés pour définir l'ensemble des solutions admissibles. Cela permet d'alterner des étapes de calculs (fournissant les compromis successifs) et des étapes de dialogue (source d'informations supplémentaires sur les préférences du décideur). Contrairement aux méthodes discrètes, les algorithmes de résolution dans le cas des méthodes continues exigent que les préférences du décideur soient exprimées *progressivement* durant le processus de résolution. L'algorithme de résolution s'arrête lorsque le décideur accepte la solution proposée par la procédure/l'ordinateur.
Dans plusieurs problèmes réels, le décideur/l'analyste est appelé à relaxer une ou plusieurs contraintes pour garantir que l'ensemble des solutions ne soit pas vide ou simplement pour

[4]Il s'agit des méthodes suivantes : ELECTRE I (Roy, 1968), ELECTRE II (Roy et Bertier, 1973), ELECTRE IS (Roy et Skala, 1984), ELECTRE III (Roy, 1978), ELECTRE IV (Roy et Hugonnard, 1982), ELECTRE A (non publiée pour des raisons de confidentialité) et ELECTRE TRI (Yu, 1992).

[5]Il s'agit des méthodes suivantes : PROMETHEE I (Brans et *al*., 1984), PROMETHEE II (Brans et *al*., 1984), PROMETHEE TRI (Figueira et *al*., à paraître), et PROMETHEE CLUSTER (Figueira et *al*., à paraître).

tester la stabilité des résultats. La *recommandation* dans le cas des méthodes continues revient simplement à adopter la dernière solution acceptée par le décideur/l'analyste.
Parmi les méthodes continues les plus connues nous citons : STEM (SETp Method) de Benayoun et *al*. (1971), MOLP (Interactive Multiple Objective Linear Programming) de Zionts et Wallenius (1983), IGP (Interactive Goal Programming) de Dyer (1972), PRIAM (PRogramme utilisant l'Intelligence Artificielle en Multicritère) de Lévine et Pomerol (1986) et VIM (Visual Interactive Method) de Korhonen et Laakso (1986).
Le Tableau 2.1 ci-après résume les caractéristiques des méthodes discrètes et des méthodes continues.

Méthodes discrètes	**Méthodes continues**
Un ensemble réduit d'actions potentielles	Un grand nombre ou un nombre infini d'actions potentielles
Les actions sont définies explicitement	Les actions sont définies implicitement
L'agrégation se base sur l'utilisation d'une relation de surclassement de synthèse ou sur un critère unique de synthèse	L'agrégation est locale et basée sur des algorithmes interactifs
Demande beaucoup d'information *a priori* sur les préférences du décideur	Demande peu d'information *a priori* sur les préférences du décideur

TAB. 2.1 – Quelques caractéristiques des méthodes discrètes et des méthodes continues

Comme mentionné plus haut, la résolution des problèmes multicritères impliquant un ensemble infini d'actions font le plus souvent appel à la programmation mathématique à objectifs multiples. Pour mieux cerner les fonctions d'évaluation multicritère destinées à implémenter les méthodes continues, nous nous sommes basés sur l'article de Gardiner et Steuer (1994a). Dans cet article, les auteurs proposent l'unification de neuf méthodes interactives connues[6] auxquelles ils ajoutent quatre autres méthodes [7] dans Gardiner et Steuer (1994b). Les auteurs présentent alors un algorithme général et montrent comment ces différentes méthodes peuvent lui être adaptées. L'algorithme comporte quatre étapes :

1. Définition des paramètres de contrôle (e.g. poids, coefficients, niveaux d'aspiration, etc.) ;
2. Optimisation d'un ou plusieurs programmes mathématiques,
3. Examen du résultat (si la règle d'arrêt est vérifiée, l'algorithme se termine),
4. Préparation de l'itération suivante.

La première étape ne s'effectue qu'une seule fois. Les trois autres se font de manière itérative. L'algorithme s'arrête lorsqu'une condition d'arrêt est vérifiée. Parmi les approches utilisées pour résoudre les programmes mathématiques à objectifs multiples, les méthodes interactives sont probablement les mieux adaptées à la prise de décision à référence spatiale. En effet,

[6] Il s'agit de : e-constraint, STEM, Geoffrion-Dyer-Feinberg procedure, IGP, Aspiration Criterion Vector Method, Tchebycheff Procedure, Satisficing Trade-off Method, VIA, et Pareto Race. Les références à toutes ces méthodes sont données dans Gardiner et Steuer (1994a).

[7] Il s'agit de : Interactive Weighted-Sums Heuristics, Interactive Tchebycheff Heuristic, Bi-Reference Procedure, et Efficiency Projection Method. Les références à toutes ces méthodes sont données dans Gardiner et Steuer (1994b).

une méthode interactive implique non seulement le décideur dans la définition des actions potentielles et des objectifs, comme c'est le cas pour toutes les méthodes d'aide à la décision, mais contribue également à la recherche de solutions en lui permettant d'intervenir dans la phase de traitement de la méthode (Vincke, 1992). En s'inspirant de l'algorithme de Gardiner et Steuer présenté plus haut, nous pouvons distinguer, dans une approche interactive, les étapes suivantes :

1. Définition du programme mathématique à résoudre,
2. Optimisation d'un ou plusieurs programmes mathématiques,
3. Proposition d'une solution de compromis au décideur,
4. Préparation de l'itération suivante.

Si le décideur accepte la solution de compromis proposée (par l'ordinateur), alors l'algorithme s'arrête. Autrement, le décideur est appelé à fournir des informations additionnelles. Comme nous allons le voir plus loin dans ce chapitre, deux fonctions d'évaluation multicritère seront nécessaires pour implémenter cet algorithme : (i) une première fonction de définition du programme mathématique qui correspond à la première étape (c.f. §2.4.3) et (ii) une deuxième fonction de résolution qui contient les trois dernières étapes (c.f. §2.4.3).

2.3 Schéma général de la stratégie proposée

Le schéma général de la stratégie proposée est illustré dans la Figure 2.2. Elle consiste à incorporer dans le SIG non pas une ou quelques méthodes multicritères, comme dans la majorité des travaux déjà existants, mais plutôt les différentes foncions d'*évaluation multicritère* (EMC). Les fonctions d'EMC représentent les opérations de base nécessaires à implémenter les différentes méthodes d'analyse multicritère. Ces fonctions, au nombre de quinze, sont identifiées en se basant sur les schémas généraux des méthodes d'AMC présentés dans la section précédente.
Nous avons proposé une première version de cette stratégie dans Chakhar (2001), et Chakhar et Martel (2003). Dans cette thèse, nous l'avons enrichie pour inclure les fonctions d'EMC relatives aux méthodes du critère unique de synthèse, de surclassement de synthèse, et aux méthodes continues. Dans notre recherche antérieure, la stratégie a été renforcée par un module du choix de la procédure d'agrégation multicritère. Ce module est l'implémentation d'une solution proposée par Laaribi et *al*. (1996). Dans le cadre de cette thèse, nous avons développé un module à base de règles qui sera introduit au niveau du troisième chapitre.
Dans la Figure 2.2 nous distinguons également la présence de deux autres modules : un module du choix de la technique de pondération et un module du choix de la technique de normalisation. Ces deux modules ne seront pas introduits dans cette thèse mais nous envisageons de les ajouter dans nos recherches futures. La Figure 2.2 comporte également un "solveur". Ce dernier est utilisé pour la résolution des programmes mathématiques à objectifs multiples. Notons que la version actuelle du prototype développé (cf. Chap. 6) est couplée avec le "solveur" GLPK (cf. Makhorin (2005)) (selon le mode d'intégration encastrée). Le "solveur" est totalement transparent au décideur.

Au moins deux possibilités sont disponibles pour implémenter cette stratégie. La première consiste à associer à chaque fonction une interface permettant à l'utilisateur de préciser les entrées (cartes, paramètres, etc.) et, éventuellement, les sorties. Cette solution a été partiellement adoptée dans Chakhar (2001) où nous avons programmé quelques fonctions en utilisant MapObjects Lt d'ESRI. Dans le cadre de cette thèse, nous avons adopté une idée plus intéressante. Il s'agit de définir une algèbre pour la modélisation multicritère spatiale intégrant les différentes fonctions d'EMC introduites dans ce chapitre. Nous revenons en détail sur cette algèbre au niveau du cinquième chapitre.
Par ailleurs, la stratégie d'intégration SIG-AMC proposée permet de répondre aux deux premières limites des travaux d'intégration SIG-AMC. En effet, elle correspond à une intégration complète avec le SIG comme logiciel principal. En outre, elle offre au décideur la possibilité d'appliquer les différentes méthodes multicritères. Ainsi, en utilisant des fonctions différentes et indépendantes, le décideur a la possibilité d'intégrer librement les différents éléments dans le but d'implémenter une méthode existante ou même de créer une méthode *ad hoc* adaptée au problème considéré.

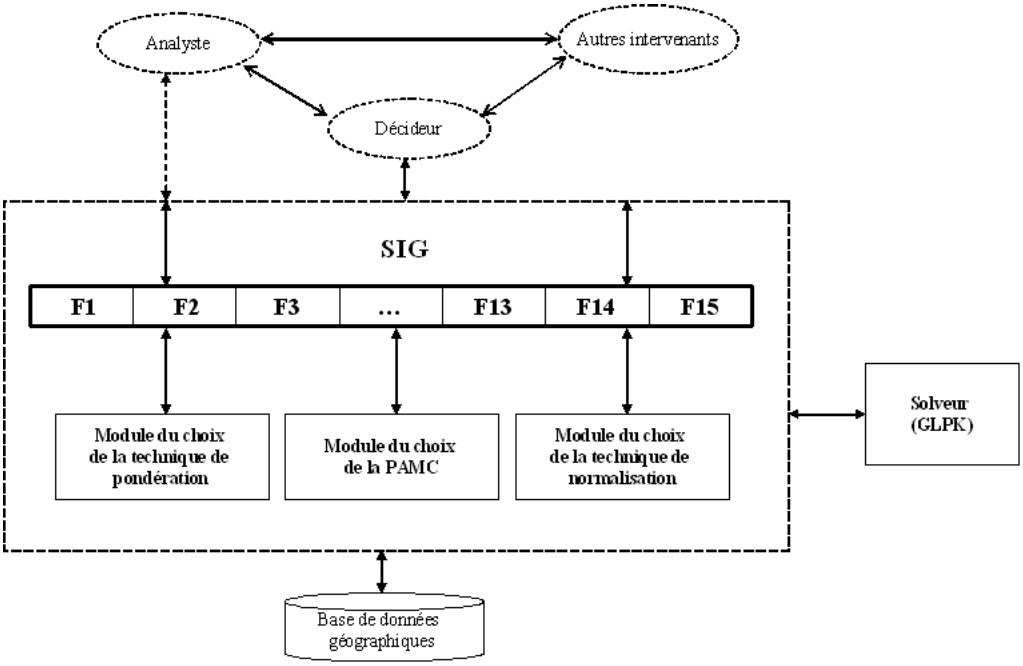


FIG. 2.2 – Schéma général de la stratégie proposée

2.4 Fonctions d'évaluation multicritère

Les fonctions d'évaluation multicritère considérées dans le cadre de cette stratégie sont données dans le Tableau 2.2. Elles seront décrites dans les sous-sections qui suivent. Pour chaque fonction, nous commençons par définir le concept multicritère auquel la fonction a été associée. Les notions de l'AMC ne sont pas spécifiques aux problèmes de décision à référence

spatiale. Cependant, nous essayons de mettre l'accent, tant que possible, sur les aspects spatiaux de ces notions.
Une fonction peut être utile pour l'implémentation d'une méthode discrète, d'une méthode continue ou les deux à la fois. La dernière colonne du Tableau 2.2 indique la portée des différentes fonctions proposées.
Bien évidement, d'autre fonctions plus élémentaires peuvent être ajoutées. Néanmoins, nous pensons que cette liste couvre la majorité des méthodes multicritères et qu'une décomposition plus fine peut aller à l'encontre de notre objectif principal, celui de fournir un ensemble de fonctions aussi restreint que possible tout en s'assurant que ces fonctions permettent d'implémenter la plupart des méthodes d'analyse multicritère.

No.	**Fonction d'EMC**	**Utilisée dans**
F1	Définition/Génération des actions	D
F2	Construction des cartes critères	D
F3	Construction des cartes attributs	D
F4	Définition d'un programme mathématique	C
F5	Résolution d'un programme mathématique	C
F6	Génération du tableau de performance	C
F7	Quantification	D
F8	Normalisation	D
F9	Préanalyse de dominance	D
F10	Génération des actions "acceptables"	D/C
F11	Elicitation des préférences	D/C
F12	Pondération des critères d'évaluation	D/C
F13	Analyse de sensibilité/de robustesse	D/C
F14	Agrégation	D
F15	Construction de la prescription	D

TAB. 2.2 – Fonctions d'évaluation multicritère—D : Méthodes discrètes, C : Méthodes continues

2.4.1 Définition/Génération des actions

Notions d'action et d'action potentielle

Bernard Roy (1985) définit ainsi la notion d'action :

Définition 2.1 *Une **action** est la représentation d'une éventuelle contribution à la décision globale susceptible, eu égard à l'état d'avancement du processus de décision, d'être envisagée de façon autonome et de servir de point d'application à l'aide à la décision.*

En analyse multicritère, et notamment au sein de l'école francophone, le terme "action" est utilisé dans le sens de proposition et non dans son sens traditionnel de réalisation (Laaribi,

2000). Les auteurs anglophones utilisent assez souvent le terme "alternative" pour désigner des solutions possibles, des variantes, ou des actions potentielles. Dans la suite de ce document, nous adaptons le terme "action" qui est de porté plus général puisque (Roy, 1990a) :

- contrairement aux alternatives, deux (ou plusieurs) actions, peuvent être implémentées conjointement ;
- la faisabilité d'une action n'est pas imposée : l'ensemble des actions peut contenir certaines actions pour lesquelles il est difficile de dire si elles sont faisables ou non, soit parce qu'elles représentent des actions idéalisées servant comme point de référence, ou parce que la frontière entre ce qui est faisable et ce qui ne l'est pas est ambiguë.

Bernard Roy définit également la notion d'action potentielle :

Définition 2.2 *Une **action potentielle** est une action réelle ou fictive provisoirement jugée réaliste par un acteur au moins ou présumé telle par l'homme d'étude en vue de l'aide à la décision.*

L'ensemble des actions potentielles sur lequel l'aide à la décision prend appui au cours d'une phase d'étude est noté A. Selon Bernard Roy, la modélisation de l'ensemble A diffère selon que chaque action est exclusive de toutes les autres ou bien que plusieurs actions peuvent être combinées. Dans le premier cas l'ensemble A est considéré globalisé (dans ce sens, le terme "alternative" désigne une action globalisée) tandis que dans le second cas il est considéré fragmenté.
L'ensemble des actions A peut être défini (Vincke, 1992) : (i) *en extension* (par énumération de ses éléments) lorsqu'il est fini et suffisamment petit pour que l'énumération soit possible, ou (ii) *en compréhension* (i.e. par une propriété caractéristique ou par des contraintes mathématiques) lorsqu'il est infini ou fini mais trop grand pour que l'enumeration soit possible[8].
Selon Martel (1999), la littérature en aide multicritère à la décision n'a pas accordé suffisamment d'attention à la génération de l'ensemble des actions, du moins dans le cas discret. C'est comme si cet ensemble s'imposait *a priori*. C'est peut-être vrai pour plusieurs problèmes de décision, mais il y en a d'autres, notamment en aménagement du territoire, où ce n'est pas le cas.

Actions spatiales

Lorsque l'action à prendre est définie par sa localisation géographique, sa forme et/ou ses relations spatiales, on parlera d'*action spatiale*. Il ne s'agit nullement d'un simple changement de terminologie car la dimension spatiale dont nous devons tenir compte aura des répercussions sur la définition, l'évaluation et la comparaison des actions. On peut citer quelques exemples de décision dans l'espace géographique : quel est le meilleur tracé pour construire l'autoroute ? quel est le meilleur site qu'il faudrait choisir pour implémenter un barrage, une centrale nucléaire, un aéroport, un site d'enfouissement de déchets ?
Une action spatiale est définie à travers au moins deux éléments (Malczewski, 1999) : (i)

[8] Roy (1990a) utilise les termes "forme analytique" (*analytic form*) et "forme énumérative" (*enumerative form*) pour désigner ces deux catégories.

l'*action* elle même (quoi faire ?) et (ii) la *localisation géographique* (où faire ?). Dans les problèmes de décision où la dimension temporelle est prise en compte (e.g. lorsque la décision prend la forme d'une séquence d'actions dispersées dans le temps), une troisième composante est nécessaire (Chakhar et Mousseau, 2003) : (iii) *localisation temporelle* (quand faire ?). La nécessité de la dimension temporelle se justifie surtout pour les problèmes à référence spatiale qui demandent une implémentation séquentielle. Laaribi (2000) utilise le terme *scénario*, qu'il définit comme une combinaison d'actions organisées dans le temps, pour désigner cette spécification temporelle au niveau des actions. Dans la suite de ce document, nous nous contentons de deux premières composantes.
La composante spatiale d'une action spatiale peut être spécifiée de manière *explicite* ou de manière *implicite* (Malczewski, 2006). Comme exemples d'actions explicites, nous citons : différents sites pour localiser une usine ou différents tracés pour construire une autoroute. Dans plusieurs problèmes spatiaux, la composante spatiale n'est pas définie de manière explicite mais il existe des implications spatiales associées à l'implémentation de ladite action. Par exemple, les impacts spatiaux peuvent résulter de l'implémentation d'une solution particulière pour lutter contre les inondations fluviales où les impacts (qui peuvent être positifs ou négatifs) sont dispersés dans l'espace.
La cardinalité de l'ensemble des actions spatiales est une caractéristique importante permettant de distinguer s'il est représenté sous une vue discrète ou continue (Figure 2.3) :

- *vue discrète* : dans des problèmes à référence spatiale, on peut se trouver en présence d'un ensemble discret d'actions connues *a priori* et très souvent sujettes à débat. Ce sont des problèmes de nature discrète : dix tracés possibles pour une autoroute, par exemple.
- *vue continue* : le nombre d'actions est très grand voire infini ; ces actions ne sont généralement pas explicitées d'avance et sont plutôt exprimées à partir de contraintes, par exemple, le nombre d'hectares d'une terre agricole allouée à un programme de développement rural. Pour des raisons pratiques, un tel ensemble est souvent représenté sous une forme discrétisée (par exemple, cellules matricielles).

Cette dichotomie correspond bien à la représentation actuelle des problèmes décisionnels à référence spatiale : la représentation vectorielle qui est appropriée à un ensemble discret d'actions potentielles et la représentation matricielle (*raster*) qui est plus appropriée à un ensemble d'actions très grand.

Représentation des actions spatiales

Les actions spatiales représentent des visions particulières de l'espace géographique. Elles peuvent donc être représentées par des entités spatiales. La manière dont ces actions sont représentées est dépendante du modèle de données utilisé dans le SIG (Malczewski, 1999). Les données géométriques sont généralement organisées en structures en *tessellation* (régulière : *raster*, ou irrégulière) ou en structures vectorielles (points, lignes, polygones, etc.). Dans le premier cas, chaque pixel représente une action potentielle. Il est également possible d'utiliser une combination de plusieurs pixels pour représenter une action. Dans une représentation vectorielle, les actions spatiales sont modélisées par des entités ponctuelles, linéaires ou polygonales :

- *Actions ponctuelles* : Ce type d'actions est souvent utilisé dans les problèmes de localisation. *Exemple* : dans un problème de localisation d'une école, les différentes possibilités sont souvent représentées par des entités ponctuelles.
- *Actions linéaires* : Les entités linéaires sont utiles pour l'implémentation et la gestion des infrastructures linéaires (autoroutes, lignes de haute tension, gazoducs, etc.). *Exemple* : dans un problème de construction d'autoroute, les tracés potentiels sont souvent représentés par des entités linéaires, chaque ligne est un tracé possible.
- *Actions polygonales* ou *surfaciques* : Les polygones, qui décrivent les propriétés des entités spatiales en terme de leur forme, voisinage et hiérarchie, sont souvent utilisés pour modéliser les actions potentielles dans les problèmes de planification urbaine et régionale, et en plusieurs problèmes liés à l'utilisation du sol. *Exemple* : dans un problème d'identification et d'aménagement d'une nouvelle zone industrielle, les actions potentielles sont assimilées à des polygones representant les différentes zones candidates.

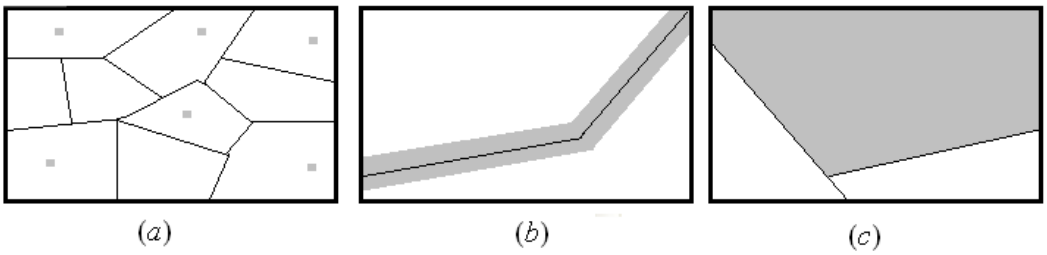


FIG. 2.3 – Ensemble des actions—(a) discret, (b) continu avec un nombre réduit d'actions, et (c) continu avec un nombre très élevé d'actions

Dans plusieurs applications réelles relativement à des problèmes à référence spatiale, nous sommes amenés parfois à définir les actions comme une combinaison de deux ou plusieurs entités atomiques ; ces dernières peuvent être de différentes classes. Par exemple, dans un problème de localisation-affectation d'écoles, les actions peuvent être modélisées par une combinaison d'entités surfaciques et d'entités ponctuelles où les entités ponctuelles représentent les écoles et les entités surfaciques représentent les zones à servir.

Génération des actions spatiales

Lorsque ces actions sont définies de manière explicite, le décideur peut utiliser la représentation cartographique de l'espace de décision pour identifier directement les positions géographiques de ces actions. Il peut également préciser leurs identifients dans la base de données (e.g. les noms de différents sites pour un problème de localisation, les villes de départ et d'arrivée pour un problème d'identification d'un corridor pour la construction d'une autoroute).
Cette stratégie s'applique lorsque le nombre d'actions potentielles est réduit. Remarquons que pour un problème aspatial comportant un ensemble infini d'actions à évaluer, les contraintes sont représentées par de inéquations mathématiques et traitées globalement. Toutefois, ceci n'est pas le cas pour un problème spatial impliquant un ensemble d'actions relativement grand.

On peut traiter les contraintes une à une, et ceci pour raison de "spatialité" (due à la localisation des actions). Par exemple, avec la procédure d'*overlay*, on fixe la dimension spatiale et on fait varier une seule dimension, soit la dimension thématique (ou descriptive). En effet, avec cette technique, l'analyse se fait contrainte par contrainte. D'où, comme conséquence, une forte élimination des actions qui ne répondent pas à ces contraintes.
On peut réduire l'ensemble de départ, continu ou discret, en un ensemble d'actions discrètes en tenant compte de certaines contraintes spatiales (de distance, de proximité, etc.). Par exemple, le site d'installation d'une usine hydroélectrique doit être à proximité d'un cours d'eau ou d'une grande retenue d'eau ; le site d'un barrage doit être éloigné des agglomérations urbaines, etc.

2.4.2 Construction des cartes critères

Notion de critère

Un critère est un facteur de jugement sur la base duquel on mesure et on évalue une action ; il diffère de la notion de variable dans la mesure où un critère est relié aux préférences du décideur alors qu'une variable ne l'est pas nécessairement. Vincke (1992) définit le concept de critère ainsi :

Définition 2.3 *Un* ***critère*** *est une fonction g, définie sur A, qui prend ses valeurs dans un ensemble totalement ordonné, et qui représente les préférences du décideur selon un point de vue.*

Notons que les critères sont parfois appelés *facteurs*. D'autres auteurs, comme Nijkamp et *al*. (1990), utilisent le terme "objectif" pour les problèmes d'évaluation continue et le terme "critère" pour les problèmes discret. Dans une démarche multicritère de "haut vers le bas" (*top-down*), les critères sont définis en terme d'une association entre objectifs et attributs comme nous allons le voir dans la sous-section 2.4.3.
Les critères sont souvent associés à plusieurs paramètres des préférences (e.g. poids, seuils de discrimination, etc.). Tous ces paramètres seront introduits au niveau de la sous-section §2.4.12.
La représentation des points de vue (aspects, facteurs, caractéristiques) au moyen d'une famille $G = \{g_1, g_2, \cdots, g_n\}$ de critères est certainement la partie la plus délicate de la formulation d'un problème de décision (Bouyssou, 1990 ; Vincke, 1992). Peu de travaux, ont été adressés à cette étape. Roy (1985) a proposé une méthodologie conduisant à l'élaboration de G et analysant les variantes qui peuvent se présenter. La famille G de critères doit si possible représenter toutes les facettes du problème tout en évitant les redondances. Dans Roy et Boussyou (1987), les auteurs proposent une définition de *famille cohérente de critères* ainsi que les tests opérationnels permettant de vérifier qu'une famille de critères est cohérente (voir également Roy et Boussyou (1993)). De plus, selon Boussyou (1990), cette famille doit posséder deux qualités importantes : être *lisible*, c'est-à-dire contenir un nombre suffisamment restreint de critères pour qu'il soit possible de raisonner sur cette base et, éventuellement, de modéliser des informations inter et intra-critères nécessaires à la mise en oeuvre d'une procédure d'agrégation et être *opérationnelle*, c'est-à-dire être acceptée comme base de travail pour la suite de l'étude.

Notion de conséquence

Dans une demarche de "bas vers le haut" (*bottom-up*) d'analyse multicritère, la construction d'un critère se base sur une ou plusieurs *conséquences*. Roy (1985) définit le concept de conséquence comme suit :

Définition 2.4 *Une* **conséquence** *d'une action est tout effet ou tout attribut de cette action susceptible d'interférer avec les objectifs ou le système de valeurs d'un acteur du processus de décision en tant qu'élément primaire à partir duquel il élabore, justifie ou transforme ses préférences.*

Dans un contexte d'aide à la décision à référence spatiale, les conséquences peuvent être ponctuelles ou dispersées. La dispersion peut être uniforme (e.g. les effets générés par un accident nucléaire se propagent plus au moins uniformément autour du lieu d'accident) ou non (e.g. les effets d'une inondation varient d'une zone à l'autre selon le type du sol, la pente, le type de végétation, etc.). Les conséquences peuvent aussi varier au cours du temps (e.g. les effets de la radioactivité ne seront perceptibles que longtemps après l'implémentation et dureront plusieurs centaines d'années).

Construction des fonctions critères

Le premier problème rencontré dans la modélisation des critères issus des conséquences dispersées consiste en la nécessité de définir un mécanisme d'agrégation adéquat. Le problème de construction des critères est compliqué par le fait que chaque évaluation peut être ponctuelle ou distributionnelle. Dans le premier cas, on associe à chaque conséquence une valeur unique. Dans le second cas, on fait généralement recourt soit à une représentation stochastique soit à une représentation floue pour associer plusieurs valeurs plausibles à chaque conséquence.
Boussyou (1990) a proposé quelques directives pour la construction des critères. Nous les reprenons très brièvement dans ce qui suit.

Construction d'un critère issu d'une seule conséquence Lorsqu'on néglige les effets de l'incertitude et/ou l'imprecision, il est raisonnable de construire le critère de telle sorte que pour toute action a de A, nous avons :

$$g(a) = c(a)$$

où $c(a)$ est l'évaluation de l'action a par rapport à la conséquence c. Ce critère est simple mais ne permet pas de mesurer l'"intensité de la préférence".
Une autre situation classique concerne le cas où les évaluations des actions par rapport à l'unique conséquence impliquent une meilleure approximation ("best-guess" evaluation) $c(a)$, une évaluation optimiste $c^+(a)$ et une évaluation pessimiste $c^-(a)$. Autrement dit, chaque évaluation est contenue dans un intervalle d'imprécision (non nécessairement symétrique). Dans ce cas, il est également raisonnable d'admettre que $g(a) = c(a)$.
Une troisième situation survient lorsque les évaluations de l'action par rapport à la conséquence sont "distribuées". Dans ce cas, la technique généralement utilisée est celle du "Point Reduction" (cf. Roy, 1985). Elle consiste à définir un mécanisme d'agrégation pour résumer la

distribution en une seule valeur. Si la distribution est probabiliste, il est possible, par exemple d'utiliser, deux critères : un critère mesurant la tendance centrale (valeur espérée mais aussi médiane ou mode) et un critère mesurant la dispersion (variance ou écart-type, semi-variance, etc.). Une autre idée consiste à supposer que la source de distribution est l'existence de différent scénarios et nous pouvons construire un critère par scénario, sans chercher à les agréger dans cette phase.

Construction d'un critère issu de plusieurs conséquences Soit à cause du nombre élevé des conséquences ou parce qu'une technique hiérarchique (e.g. la méthode AHP de Saaty (1980)) est utilisée pour la construction du critère ou encore parce que les décideurs utilisent souvent des concepts basés sur des conséquences multiples, l'analyste est souvent amené à construire des critères issus de plusieurs conséquences. Dans cette situation, il est possible d'utiliser toute procédure d'agrégation permettant d'établir un critère unique. Cependant, la nécessité de tenir compte de la proximité des conséquences et la volonté de construire un modèle simple et transparent, des méthodes simples sont souvent utilisées : agrégation lexicographique, somme pondérée, somme des rangs, ou toute combinaison *ad-hoc* de ces méthodes.

Exemple À titre d'illustration, nous reprenons un exemple proposé également par Bouyssou (1990) pour la construction d'un critère mesurant "l'impact en terme de bruit" dans un problème du choix d'un emplacement pour un nouvel aéroport. Pour construire ce critère, l'analyste se basera probablement sur une estimation du nombre de personnes qui sont affectées par l'implémentation du futur aéroport. Il doit tenir compte, entre autres facteurs, de la proximité à la source de nuisance. L'idée classique consiste à définir un système de "zones de nuisance" et à donner un "poids" (souvent inversement proportionnel à la distance, ou la distance au carré, entre la zone et le site) à chaque zone. Construire le critère implique la combinaison de toutes ces informations en une formule permettant de donner une évaluation globale du site. Plusieurs types de formulation sont possibles (Bouyssou, 1990) :

$$g(s) = \sum_{i=1}^{n} w_i h_i(s)$$

$$g(s) = \sum_{i=1}^{n} w_i h_i(s)(1+\alpha_i)^d$$

$$g(s) = \sum_{k=1}^{m_s} [\sum_{i=1}^{n} w_i h_i(s)(1+\alpha_i(k))^d] P(E_k)$$

où n est le nombre de zones voisinantes le site, w_i est le poids associé à la zone i, $h_i(s)$ est le nombre des habitants de la zone s en début de projet, α_i est le taux d'actualisation annuel de la population pour les prochaines d années, $\alpha_i(k)$ est le même taux pour le scénario E_k ayant une probabilité de $P(E_k)$, et m_s est le nombre de scénarios pour le site s.

Cartes critères

Dans un contexte spatial, les critères d'évaluation sont associés à des entités géographiques et les relations spatiales entre ces entités. Ils peuvent donc être représentés par des cartes cartographiques (Malczewski, 1999). Nous appelons ces dernières *cartes critères*. Une carte critère est composée d'une collection d'unités spatiales, chacune est caractérisée par une valeur unique relative au concept modélisé. Formellement, une carte critère $\mathbf{c_j}$ est définie ainsi :

Définition 2.5 *Une **carte critère** $\mathbf{c_j}$ est l'ensemble $\{(s, g_j(s)) : s \in S_j\}$ où S_j est un ensemble d'unités spatiales et g_j est une fonction critère associée à $\mathbf{c_j}$ et définie comme suit :*

$$\begin{array}{lcccl} g_j & : & S_j & \rightarrow & E \\ & & s & \rightarrow & g_j(s) \end{array}$$

où E est une échelle de mesure ordinale ou cardinale.

Les unités spatiales composant la carte critère peuvent être des pixels, des points, des lignes, ou des polygones. La Figure 2.4 donne la représentation schématique de deux cartes critères. Celle de gauche est une représentation matricielle où les unités spatiales sont des pixels. Celle de droite est une représentation vectorielle où les unités spatiales sont des polygones.

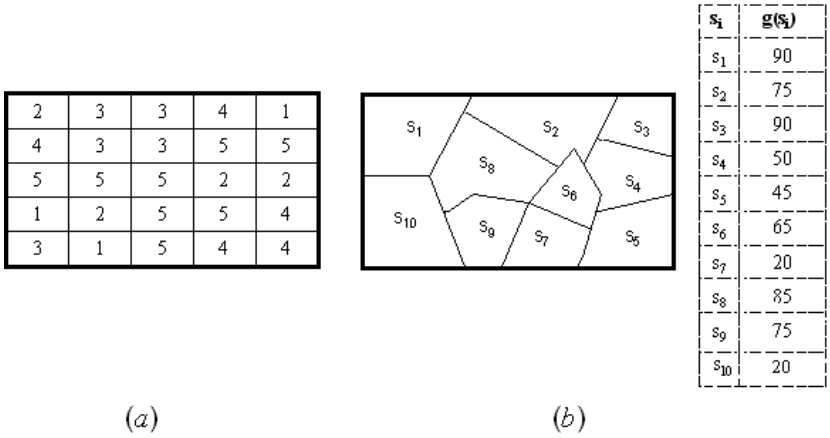


FIG. 2.4 – Deux représentations schématiques d'une carte critère—(a) type *raster*, (b) type vecteur

Il faut distinguer une carte critère d'un simple plan d'information. En effet, une carte critère permet de modéliser les préférences du décideur concernant un concept donné, généralement sans existence physique, alors qu'un plan d'information représente des données réelles. Autrement dit, une carte critère représente de l'information subjective dans le sens où deux personnes différentes peuvent évaluer différemment la même unité spatiale.

Construction des cartes critères

La technologie du SIG est particulièrement adaptée pour la construction des cartes critères. Dans ce sens, Cowen et Shirley (1991) évoquent les possibilités des SIG pour l'aide à la décision, relativement à la localisation d'un site industriel, et soutiennent qu'une fois les couches de données constituant l'infrastructure de base sont créées, les fonctions analytiques des SIG peuvent générer automatiquement plusieurs variables requises. Par exemple, les mesures de distance peuvent être utilisées pour calculer certaines mesures d'accessibilité ; d'autres facteurs, comme la disponibilité de la main d'oeuvre, peuvent être mesurés par l'agrégation de zones de recensement appropriées, relatives à des données socio-économiques. Pour Pereira et Dukstein (1993), "un important avantage en utilisant les SIG pour parfaire une étude multicritère relative à un problème à référence spatiale est la facilité avec laquelle on peut développer les critères d'évaluation basés sur les opérations de voisinage"[9].
Les processus de génération des cartes critères sont souvent représentés sous forme d'un *diagramme de flux* (*flowcharts* en anglais). La Figure 2.5 représente un exemple de diagramme de flux pour la construction d'une carte critère relative à l'"aptitude à l'urbanisation". Elle est inspirée d'un exemple donné dans Braux (1999).

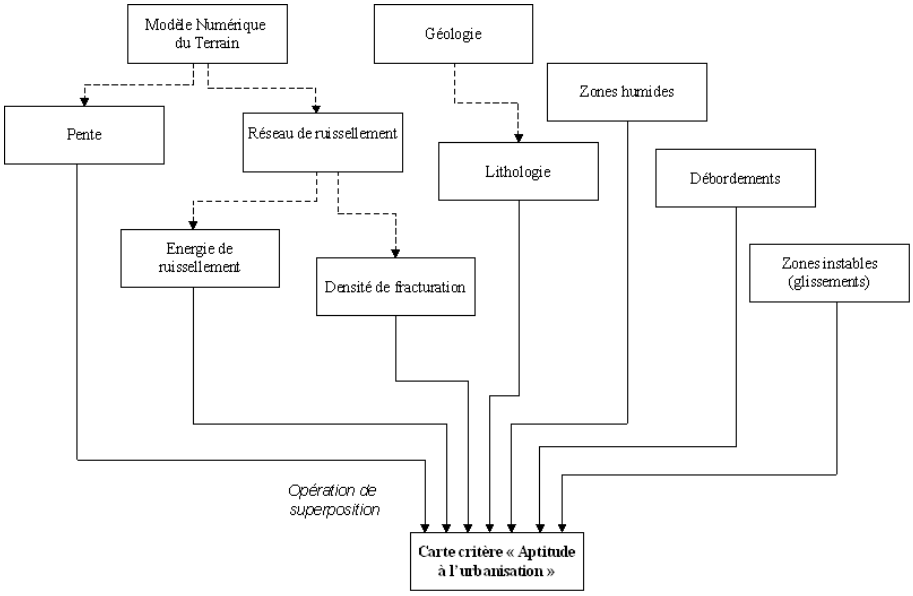


FIG. 2.5 – Exemple d'un diagramme de flux

2.4.3 Définition/Génération des objectifs et des attributs

Dans les méthodes multicritères du critère unique de synthèse, les critères d'évaluation sont souvent modélisés en terme d'objectifs et d'attributs. Un *objectif* est une direction traduisant

[9]Notre traduction de "An important advantage in using a GIS to perform a spatial multiple-criteria decision-making (MCDM) study is the ease with which one can develop evaluation criteria based on neighborhood analysis".

une perspective de changement concernant l'état futur souhaité par le décideur. Un *attribut* est un moyen pour mesurer l'achèvement d'un objectif. La relation entre objectifs et attributs peut être représentée par une structure hiérarchique ayant à son premier niveau l'objectif global qui est "éclaté" en sous-objectifs qui sont à leur tour "éclatés" en sous-sous-objectifs jusqu'à ce que l'on atteigne un niveau mesurable que l'on qualifie d'attributs. La Figure 2.6 donne un exemple, emprunté de Malczewski (1999), relatif à un problème de gestion de forêt dans une zone montagneuse au Japan.

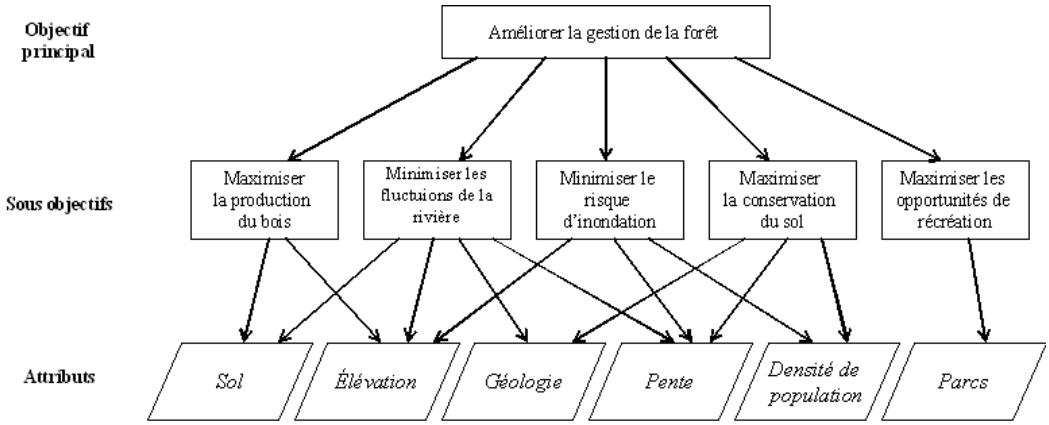


FIG. 2.6 – Exemple d'une structure hiérarchique

Comme les critères, les attributs sont associés à des entités géographiques et les relations spatiales entre ces entités. Ils peuvent donc être représentés par des *cartes attributs*. La construction des cartes attributs est similaire à celle des cartes critères.
Plusieurs auteurs, notamment nord-américains, semblent accorder la même signification aux termes critères et attributs. Pomerol et Barba-Romero (1993) apportent un éclairage intéressant sur la difference subtile entre la notion d'attribut et celle de critère : un attribut est une caractéristique de l'action, ce sera par exemple, le coût d'implémentation, la qualité de paysage, etc. ; si on ajoute à ces attributs un minimum d'information relative aux préférences du décideur, les attributs deviennent alors des critères.

2.4.4 Définition du programme mathématique

Notons d'abords que ce paragraphe est inspiré en grande partie de Vanderpooten (1990a) et Vincke (1992). Dans la formulation continue d'un problème de décision multicritère, on fait souvent appel à la programmation mathématique à objectifs multiples (PMOM) et l'on désigne souvent l'ensemble des *actions admissibles* par le symbole X. Un programme mathématique à objectifs multiples est un problème où il s'agit de trouver un vecteur $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^p$ satisfaisant des contraintes du type

$$h_i(\mathbf{x}) \leq 0, i = 1, 2, \cdots, n,$$

respectant d'éventuelles conditions d'intégrité et maximisant les fonctions objectifs

$$z_j(\mathbf{x}), j = 1, 2, \cdots, m.$$

Un programme mathématique à objectifs multiples est en fait un problème de décision multicritère dans lequel (Vincke, 1992) :

- $A = \{\mathbf{x} : h_i(\mathbf{x}) \leq 0, \forall i\} \subset \mathbf{R}^p$ est l'ensemble des actions.
- $F = \{z_1(\mathbf{x}), z_2(\mathbf{x}), \cdots, z_m(\mathbf{x})\}$ est une famille de critères. Chaque critère est exprimé par une fonction objectif en terme de variables de décision.
- on désire déterminer une "meilleure action".

La forme générale d'un programme mathématique à objectifs multiples est la suivante :

$$\begin{cases} \text{Optimize} \quad [z_1(\mathbf{x}), z_2(\mathbf{x}), \cdots, z_m(\mathbf{x})] \\ h_i(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (i = 1, \cdots, n) \\ \mathbf{x} \in X \end{cases}$$

Le programme mathématique à objectifs multiples est dit *linéaire* si les fonctions $h_i(i = 1, 2, \cdots, n)$ et z_j $(j = 1, 2, \cdots, m)$ dépendent linéairement de $\mathbf{x}$:

$$\begin{cases} \max \mathbf{C}^j\mathbf{x} \quad j = 1, 2, \cdots, m \\ D\mathbf{x} \leq \mathbf{b} \\ \mathbf{x} \geq 0 \end{cases}$$

où $\mathbf{C}^j$, $\mathbf{D}$, et $\mathbf{b}$ sont des matrices de dimensions $1 \times p$, $n \times p$ et $n \times 1$, respectivement.
Les programmes mathématiques à objectifs multiples peuvent être représentés dans l'*espace de décision* (ou *des actions*). Cependant, en pratique on considère souvent l'*espace des critères*. Dans cet espace, chaque action potentielle a est représentée par son vecteur performance $(z_1(a), z_2(a), \cdots, z_m(a))$. La Figure 2.7 présente l'*espace de décision* X à deux dimensions (pour des fins pratiques) et son image dans l'espace de critères, à deux dimensions lui aussi. Notons $Z \subset \mathbf{R}^p$ l'espace des critères et Z_X l'image de X dans Z, i.e., l'ensemble des actions faisables. Un problème multiobjectifs peut être considéré comme la sélection d'une solution de compromis dans Z_X et formulé ainsi :

$$\begin{cases} \text{Optimize} \quad [z_1(\mathbf{x}), z_2(\mathbf{x}), \cdots, z_m(\mathbf{x})] \\ \mathbf{x} \in Z_X \end{cases}$$

Pour résoudre ce problème, il est nécessaire d'utiliser des paramètres de préférence (e.g. poids, niveaux d'aspiration, etc.) pour (Vanderpooten, 1987 ; Vanderpooten, 1990a) : (i) agréger les différents critères et (ii) délimiter un espace des solutions admissibles $Z'_X \subset Z_X$. Notons par Ω le produit Cartésien des valeurs de paramètres de préférence.
L'agrégation des critères fait souvent appel à une *fonction scalarisante* s (*scalarizing function*) : $s : Z_X \times \Omega \rightarrow \mathbf{R}$. La résolution proprement dite consiste à la sélection d'un ensemble de paramètres de préférence $w \in \Omega$ et à l'optimisation de la fonction scalarisante sur Z_X. Les programmes mathématiques à objectifs multiples basés sur des fonctions scalarisantes peuvent s'écrire comme suit :

$$\begin{cases} \text{Optimize} \quad s(\mathbf{g}, w) \\ \mathbf{x} \in Z_X \end{cases}$$

avec $\mathbf{z} = (z_1(\mathbf{x}), z_2(\mathbf{x}), \cdots, z_m(\mathbf{x}))$. Parmi les fonctions scalarisantes classiquement utilisées nous citons les suivantes (Vanderpooten, 1993) :

– Somme pondérée (*weighted sum*) :

$$s(\mathbf{z}, \lambda) = \sum_{j=1}^{m} \lambda_j z_j$$

avec $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_m)$ est le vecteur poids.

– Distance pondérée de Tchebycheff (*weighted Tchebychev norm*) :

$$s(\mathbf{z}, (\lambda, \tilde{\mathbf{z}})) = \max_{j=1,\cdots,m} \{|\lambda_j(\tilde{z_j} - z_j)|\}$$

avec $\tilde{\mathbf{z}} = (\tilde{z}_1, \tilde{z}_2, \cdots, \tilde{z}_m)$ est le point idéal défini tel que $\tilde{z}_j = \max_{Z_X} z_j(\mathbf{x})$.

– Distance pondérée augmentée de Tchebycheff (*augmented weighted Tchebychev norm*) :

$$s(\mathbf{z}, (\lambda, \tilde{\mathbf{z}})) = \max_{j=1,\cdots,m} \{|\lambda_j(\tilde{z_j} - z_j)|\} + \rho \sum_{j=1}^{m} \{|\lambda_j(\tilde{z_j} - z_j)|\} \quad \text{avec} \quad \rho > 0$$

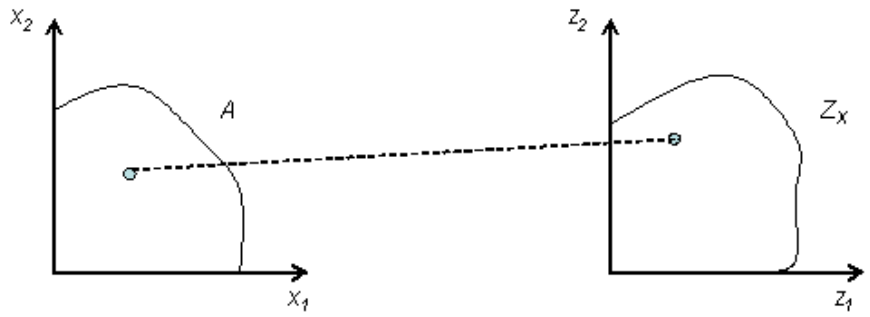


FIG. 2.7 – Espace de décision (gauche) et espace des critères (droite)

En pratique, la fonction de "définition du programme mathématique" permet au décideur/à l'analyste de spécifier le programme mathématique à objectifs multiples à résoudre. Elle correspond à la première étape du schéma général des méthodes interactives présentées à la fin du paragraphe §2.2.2. Les informations qui doivent être fournies sont :

– Les fonctions objectifs z_j $(j = 1, \cdots, m)$,
– Les contraintes h_j $(i = 1, \cdots, n)$,
– Le sens d'optimisation de différentes fonctions objectifs et des contraintes,
– Les paramètres de préférence w, et
– La fonction scalarisante s.

2.4.5 Résolution d'un programme mathématique

Les méthodes interactives impliquent des étapes de calcul et de dialogue entre le décideur/l'analyste et l'ordinateur. Une étape centrale dans ces méthodes consiste en le calcul d'une solution de compromis et sa présentation au décideur. Une solution de compromis est en fait l'image, dans l'espace des critères, d'une action de compromis a.
Par exemple, dans la méthode STEM[10] de Benayoun et *al*. (1971), la solution de compromis se calcule par la résolution du programme mathématique suivant :

$$\begin{cases} \min(\mu - \sum_{j=1}^{n} \varrho_j z_j), \\ \mu \geq \lambda_j(z_j^{**} - z_j), \qquad j = 1, \cdots, m \\ z \in X^h \geq 0 \end{cases}$$

où X^h l'ensemble réduit de solutions à l'itération h, $\lambda_j = \frac{\alpha_j}{\sum_j \alpha_j}$ avec $\alpha_j = \frac{z_j^* - \underline{z}_j}{|z_j^*|}$, $z_j^* = \max_{x \in X^h} g_j(x)$, $\underline{z}_j = \min_{x \in X^h} g_j(x)$, $z_j^{**} = z_j^* + \epsilon_j$, et ϱ_j, ϵ sont des valeurs positives arbitrairement petites.
Cette fonction permet donc de calculer une solution de compromis et de la proposer au décideur. Elle correspond aux trois dernières étapes du schéma général des méthodes interactives présentées à la fin du paragraphe §2.2.2.

2.4.6 Génération du tableau de performance

Cette fonction est destinée à la définition du *tableau de performance*, également appelé *matrice d'évaluation* ou *matrice de jugements* ou encore *matrice de décision*. Le tableau de performance est une matrice $[g_j(a_i))]$ de dimension $n \times m$ où n est le nombre des actions et m le nombre de critères. Chaque ligne i exprime les performances de l'action a_i relativement aux n critères considérés. Chaque colonne j exprime les évaluations de toutes les actions relativement au critère g_j. Une représentation schématique du tableau de performance est donnée dans la Figure 2.8.

Actions potentielles	Critères			
	g_1	g_2	$\cdots$	g_n
a_1	$g_1(a_1)$	$g_2(a_1)$	$\cdots$	$g_n(a_1)$
a_2	$g_1(a_2)$	$g_2(a_2)$	$\cdots$	$g_n(a_2)$
$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$
a_m	$g_1(a_m)$	$g_2(a_m)$	$\cdots$	$g_n(a_m)$

FIG. 2.8 – Représentation schématique du tableau de performance

Selon Roy (1989), les évaluations (de performance, d'impacts, etc.) des actions selon chacun des critères peuvent s'effectuer en ayant recours à divers moyens (des formules analytiques, des instruments de mesure, de jugements, etc.), être plus au moins subjectives et être entachées d'imperfections plus ou moins importantes. Dans un cadre spatial, les performances peuvent être explicitées directement par le décideur/l'analyste ou, dans la plupart des cas, calculées en utilisant les différentes opérations spatiales introduites dans le premier chapitre (cf. §1.3.2).

[10] STEM est la première méthode interactive proposée dans la littérature et qui est très utilisée en pratique.

2.4.7 Quantification

Les évaluations des actions peuvent être quantitatives ou qualitatives. Plusieurs méthodes (pratiquement toutes les méthodes du critère unique de synthèse) exigent à ce que ces évaluations soient quantitatives pour pouvoir comparer les différentes actions entre eux. D'autres méthodes acceptent les deux types d'évaluation (e.g. ELECTRE III). Dans la littérature, il existe quelques méthodes qui sont complètement qualitatives (e.g. Median Ranking Method, AHP). Lorsque le nombre de critères qualitatifs est beaucoup plus important que les critères quantitatifs, ces derniers peuvent être convertit en des critères qualitatifs et une méthode qualitative comme le Median Ranking Method ou AHP peut être utilisée. Autrement, la *quantification* (i.e. affectation des valeurs numériques aux données qualitatives) par l'approche de "mise à l'échelle" (*sclaing*) est la plus utilisée. La fonction de "quantification" prend un tableau de performance est transforme tous les critères qualitatifs en des critères quantitatifs.
L'opération de quantification nécessite la définition d'une échelle ordinale. L'échelle de mesure la plus utilisée est celle de *Likert-type* (Spector, 1992). Cette échelle de mesure est composée approximativement par autant de niveaux favorables que de niveaux défavorables. Un exemple d'échelle à cinq points est la suivante : *très défavorable*, *défavorable*, *neutre*, *favorable*, *très favorable*. D'autres échelles, plus détaillées, à sept ou à neuf points peuvent également être utilisées. La procédure de quantification consiste à construite une échelle de mesure comme celle mentionnée plus haut. Ensuite, pour quantifier l'échelle, on associe à chaque niveau de l'échelle une valeur numérique. Par exemple, on peut associer les nombres 1, 2, 3, 4 ou 5 à l'échelle à cinq niveaux précédente en allant de *très défavorable* à *très favorable*.

2.4.8 Normalisation

Les évaluations des actions peuvent être exprimées sur des échelles de mesure différentes (ordinale, intervalle, ratio). La fonction de "normalisation" est alors utilisée pour *normaliser*, lorsqu'il est nécessaire, les différentes évaluations entre 0 et 1. L'opération de normalisation est nécessaires pour la plupart des méthodes compensatoires (pratiquement toutes les méthodes du critère unique de synthèse). L'opération de *normalisation* permet d'obtenir des échelles comparables permettant les comparaisons inter- et intra-critères. Une procédure de normalisation transforme, pour un critère donné g_j, le vecteur $(g_j(a_1), g_j(a_2), \cdots, g_j(a_m))$ représentant les évaluations par rapport à g_j de n actions en un vecteur $(r_{1j}, r_{2j}, \cdots, r_{mj})$ tel que $0 \leq r_{ij} \leq 1$; $\forall j \in F$ et $i = 1, \cdots, m$.
Il existe différentes techniques de normalisation. La sélection de la méthode à appliquer dans un problème donné dépend essentiellement de la nature des données disponibles. Nous donnons dans ce qui suit la liste des procédures de normalisation les plus utilisées. Les formules données ci-après correspondent au cas où tous les critères sont à maximiser (pour les critères à minimiser, il suffirait de change le signe). Dans toutes ces procédures on part d'un vecteur initial $(g_j(a_1), g_j(a_2), \cdots, g_j(a_m))$ pour obtenir le vecteur normalisé $(r_{1j}, r_{2j}, \cdots, r_{mj})$. Une description plus détaillée de ces procédures est disponible, par exemple, dans Pomerol et Barba-Romero (1993, pp. 66-71).

Procédure 1. Cette procédure de normalisation linéaire est la plus courante. Elle associe à chaque action a_i et pour chaque critère g_j le pourcentage du maximum sur toutes les actions :

$$r_{ij} = \frac{g_j(a_i)}{\max_i g_j(a_i)}, i = 1, \cdots, m; j \in F.$$

Procédure 2. La deuxième procédure est un perfectionnement de la précédente destinée à assurer que les évaluations vont couvrir l'intervalle [0,1], c'est-à-dire, pour chaque critère, la plus mauvaise valeur est 0 et la meilleure 1. Elle associe à chaque action a_i et pour chaque critère g_j le pourcentage de l'étendue de l'échelle (i.e. $\max_i g_j(a_i) - \min_i g_j(a_i)$) :

$$r_{ij} = \frac{[g_j(a_i) - \min_i g_j(a_i)]}{[\max_i g_j(a_i) - \min_i g_j(a_i)]}, i = 1, \cdots, m; j \in F.$$

Procédure 3. Cette troisième procédure est aussi fréquemment utilisée, notamment dans la méthode hiérarchique AHP de Saaty (1980). Elle offre les mêmes avantages que la première procédure en donnant cependant des valeurs plus petites et plus concentrées. Elle associe à chaque action a_i et pour chaque critère g_j le pourcentage de la somme de toutes les évaluations par rapport à g_j :

$$r_{ij} = \frac{g_j(a_i)}{\sum_i g_j(a_i)}, i = 1, \cdots, m; j \in F.$$

Procédure 4. La quatrième méthode offre l'avantage de permettre des comparaisons de vecteurs de norme 1, mais elle a la même concentration que la précédente. Son utilisation dans la pratique est plus rare que les autres. Elle associe à chaque action a_i et pour chaque critère g_j la $i$ème composante du vecteur unitaire :

$$r_{ij} = \frac{g_j(a_i)}{\sqrt{[\sum_i g_j(a_i)^2)]}}, i = 1, \cdots, m; j \in F.$$

2.4.9 Préanalyse de dominance

En l'absence de toute information préférentielle, le seul traitement qu'on peut effectuer sur le tableau de performance est d'éliminer les *actions dominées*. Définissons d'abord la *relation de dominance* (Vincke, 1992) :

Définition 2.6 *Soient deux actions a et b de A ; et une famille de critères F. L'action a* ***domine*** *l'action b par rapport à F, noté $a\Delta b$ si et seulement si :*

$$g_j(a) \geq g_j(b); j \in F,$$

avec au moins une inégalité stricte.

On définit ensuite une action a comme étant *efficace* ou *admissible* ou étant *un optimum de Pareto* ou, parfois, un *point efficace* (de l'anglais *efficient point*) si et seulement si aucune action de A ne la domine :

Définition 2.7 *On dit qu'une action a de A est* ***efficace*** *s'il n'existe pas d'action $b \in A$ telle que $b \Delta a$.*

La relation de dominance est en général une relation très pauvre (peu de couples d'actions la vérifient), voire vide (aucun couple ne la vérifie), pour être utilisée dans un problème multicritère.

2.4.10 Génération des actions "acceptables"

Une *contrainte* (appelée aussi *critère d'admissibilité*) est un facteur permettant de circonscrire et de limiter les actions prises en considération (e.g. le site d'implantation d'une usine doit être à 500 mètres d'une autoroute). Les contraintes sont souvent utilisées dans l'étape de la pré-analyse pour deviser les actions en deux catégories : "*acceptables*" et "*non acceptables*". Une action est acceptable si elle dépasse (ou ne dépasse pas, selon que l'on maximise ou minimise) un minimum (un maximum). Le principe utilisé dans ces méthodes est celui de *satisfaction* (*satisficing*)—appelé aussi *niveau d'aspiration* (*aspiration level*)—de H. Simon (1957). Nous utiliserons la notion de niveau de satisfaction sous la forme d'un *seuil* ou *niveau de satification* pour chaque critère ou à un sous-ensemble à maximiser (la notion s'adapte immédiatement en cas de minimisation).
En pratique, la notion de contrainte est souvent mise en oeuvre via des méthodes multicritères élémentaires. Nous présentons dans la suite de ce paragraphe quatre méthodes couramment utilisées pour générer les actions acceptables. Notons que dans toutes les méthodes présentées ci-après, il est nécessaire que le décideur/l'analyste fournit les différents niveaux de satisfaction. Ces derniers peuvent être quantitatifs ou qualitatifs. Une description plus détaillée de ces méthodes est donnée dans Pomerol et Barba-Romero (1993, pp. 86-90) et Yoon et Hwang (1995, pp. 20-27).

Méthode conjonctive. On définit, pour chaque critère g_j, un niveau $\hat{g_j}$ de satisfaction minimale. Si une action présente dans tous les critères une performance meilleure à ce niveau, alors elle est jugée acceptable ; dans le cas contraire, elle est jugée non acceptable. Formellement, une action a_i est dite acceptable si et seulement si :

$$g_j(a_i) \geq \hat{g_j}, \forall j \in F$$

Un choix plus drastique consiste à éliminer toutes les actions dont le vecteur performance $(g_1(a_i), g_2(a_i), \cdots, g_m(a_i))$ domine le vecteur $(\hat{g_1}, \hat{g_2}, \cdots, \hat{g_m})$.

Méthode disjonctive. Ce modèle est similaire au précédent mais une action est dite acceptable dès qu'elle dépasse au moins un niveau de satisfaction sur un critère. Formellement, une action a_i est dite acceptable si et seulement si :

$$\exists j \in F : g_j(a_i) > \hat{g_j}$$

Ici on se contente donc d'éliminer les actions qui sont en dessous du niveau de satisfaction pour certains critères décisifs.

Méthode d'élimination par aspects. Cette méthode d'élimination par aspects (Elimination By Aspect—EBA) est proposée par Tversky (1972). Pour chacun des critères, le décideur définit certaines caractéristiques (*aspects*) qu'il souhaite voir posséder par la solution retenue et il élimine les actions qui n'ont pas ces caractéristiques. Quand ceci est fait pour un critère, il passe au suivant et il réitère. En d'autres termes, cela consiste à choisir un premier critère, soit g_1, et à fixer son niveau de satisfaction $\hat{g_1}$. Toutes les actions a_i telles que $g_1(a_i) < \hat{g_1}$ sont éliminées. On passe ensuite à un deuxième critère et on fait la même chose et ainsi de suite jusqu'à ce qu'il ne reste plus qu'une action qui est choisie. La procédure complète est la suivante :

1. Ordonner les critères du plus important au moins important. Supposons que g_1 est le plus important critère pour le décideur, g_2 le second plus important, est ainsi de suite. Le moins important critère est alors g_m.
2. Construire $A^1 = \{a_i \in A : g_1(a_i) \geq \hat{g_1}\}$. Si A^1 contient une seule action, alors celle-ci est la meilleure action et la procédure s'arrête.
3. Si A^1 contient plus qu'une action, alors construit $A^2 = \{a_i \in A^1 : g_2(a_i) \geq \hat{g_2}\}$. Si A^2 contient une seule action, alors la procédure s'arrête et cette action est la meilleure.
4. Si A^2 contient plus d'une action, alors considerer le troisième critère et ainsi de suite.

Méthode d'élimination lexicographique. Cette méthode suppose que l'on dispose d'un ordre d'importance sur les critères et que le décideur est prêt à négliger complètement les $(k - 1)$ critères les moins importants si les k premiers lui permettent de conclure. La procédure complète est comme suit :

1. Ordonner les critères du plus important au moins important. Supposons que g_1 est le plus important critère pour le décideur, g_2 le second plus important, est ainsi de suite. Le moins important critère est alors g_m.
2. Construire $A^1 = \{a_i \in A : max_{i=1,\cdots,n} g_j(a_i)\}$. Si A^1 contient une seule action, alors celle-ci est la meilleure action et la procédure s'arrête.
3. Si A^1 contient plus qu'une action, alors construit $A^2 = \{a_i \in A^1 : max_{i=1,\cdots,n} g_j(a_i)\}$. Si A^2 contient une seule action, alors la procédure s'arrête et cette action est la meilleure.
4. Si A^2 contient plus d'une action, alors réitérer le processus jusqu'à soit l'obtention d'un ensemble A^k avec un seul élément, soit tous les critères ont été considérés. Dans ce dernier cas, toutes les actions sont considérées comme équivalentes.

Des raisonnements basés sur la variation interactive des niveaux de satisfaction peuvent être à la base de méthodes d'analyse multicritère avec information progressive (i.e. méthodes interactives). Par exemple, la méthode de choix multicritère PRIAM proposée par Lévine et Pomerol (1986) procède par modification interactive et progressive des niveaux de satisfaction afin de réduire l'ensemble de choix.

2.4.11 Élicitation des préférences

La phase de modélisation des préférences vise à établir un système relationnel de préférence au niveau de chaque critère ou attribut et à déterminer des coefficients d'importance relative de critères/des attributs. La détermination des coefficients d'importance relative est une étape cruciale. Nous avons associé une fonction spécifique à cet effet (c.f. 2.4.12). La fonction d'élicitation des préférences permet au décideur/à l'analyste de spécifier les valeurs des différents paramètres de préférence.
Notons que les deux premiers paragraphes sont tirés de Vincke (1992). Le troisième est extrait de Bouyssou (1990).

Structure de préférence Les préférences du décideur sont souvent modélisées en terme de relations binaires. Nous supposons, dans un premier temps, que, confronté à la comparaison de deux actions a et b, le décideur aura l'une des trois réactions suivantes :

- préférence pour l'une des deux actions,
- indifférence entre les deux actions,
- refus ou impossibilité de comparer.

Nous notons :

- aPb si a est préféré à b (bPa si c'est l'inverse),
- aIb s'il y a indifférence entre a et b,
- aRb s'il y a incomparabilité.

Les relations de préférence (P), d'indifférence (I), et d'incomparabilité (R) sont respectivement les ensembles de couples (a, b) tels que aPb, aIb, aRb. Ce sont les trois relations que l'on trouve dans la plupart des travaux sur la modélisation des préférences. Il est généralement admit que la relation d'indifférence I est reflexive et symétrique, la relation binaire de préférence P est asymétrique, et la relation d'incomparabilité R est irreflexive et symétrique.

Définition 2.8 *Les trois relations (I, P, R) constituent une* structure de préférence *sur l'ensemble des actions A si elles ont les propriétés indiqués précédemment et si, étant donné deux actions a et b de A, une et une seule des situations suivantes est vérifiées : aPb, bPa, aIb, aRb.*

Relation caractéristique d'une structure de préférence Toute structure de préférence peut être entièrement caractérisée par la donnée de la relation définie par :

$$aSb \Leftrightarrow aPb \quad \text{ou} \quad aIb$$

La realtion S est parfois appelée "préférence au sens large" par opposition avec P, relation de préférence stricte.

Différents modèles de préférence La théorie classique de la décision (cf. Fishburn, 1970) ne distingue que deux relations différentes : l'indifférence I et la préférence P qui sont toutes

deux considérées comme transitives. Dans ce modèle classique, il est supposé que pour tout $a, b \in A$:

$$aPb \Leftrightarrow g(a) > g(b) \quad \text{et} \quad aIb \Leftrightarrow g(a) = g(b).$$

où P et I sont les relations binaires de préférence et d'indifférence par rapport au critère g_j. Dans ce modèle, connu par le nom du "vrai-critère", toute différence, aussi petite soit elle, entre les deux évaluations implique une préférence stricte.
Il est cependant, à cause de l'incertitude et l'imprécision inhérentes aux données et les erreurs de mesure, plus raisonnable d'admettre que de "petites" differences $g_j(a) - g_j(b)$ sont compatibles avec une situation d'indifférence entre a et b. Cela mène au modèle du "quasi-critère" suivant :

$$aPb \Leftrightarrow g(a) - g(b) > q \quad \text{et} \quad aIb \Leftrightarrow \mid g(a) - g(b) \mid \leq q.$$

où q, le *seuil d'indifférence*, est la plus grande différence $g(a) - g(b)$ compatible avec une situation d'indifférence. Dans ce modèle, une différence plus grande que q implique une préférence stricte, même si elle est très proche de q. Pour éviter ce changement "brutal" entre une situation d'indifférence et une situation de préférence stricte, il est possible d'introduire une "zone tampon" dans laquelle il y a une situation d'hésitation entre les situations d'indifférence et de préférence stricte. Notons cette hésitation par une relation binaire Q, souvent nommée "préférence faible", on obtient un modèle à deux seuils, un seuil de préférence p et un seuil d'indifference q, nommé "pseudo-critère", suivant :

- $aPb \Leftrightarrow g(a) - g(b) > p$
- $aQb \Leftrightarrow q < g(a) - g(b) \leq p$
- $aIb \Leftrightarrow \mid g(a) - g(b) \mid \leq q$.

Ces seuils peuvent variés selon l'échelle du critère. Dans ce cas, ces seuils sont souvent attachés à l'action la moins préférée. Nous aurons :

- $aPb \Leftrightarrow g(a) - g(b) > p(g(b))$
- $aQb \Leftrightarrow q(g(b)) < g(a) - g(b) \leq p(g(b))$
- $aIb \Leftrightarrow g(a) - g(b) < q(g(b))$ et $g(b) - g(a) \leq q(g(b))$.

Les paramètres de préférence Les méthodes multicritères du type critère unique de synthèse se basent sur de vrai-critères. Les méthodes de surclassement de synthèse considèrent différents types de critères (quasi-critères, pseudo-critères, etc.). Certaines des méthodes multicritères de surclassement de synthèse nécessitent, avant de construire les relations de surclassement, d'introduire des *seuils de discrimination* (indifférence, préférence) et de *veto*, au niveau de chacun des critères, pour modéliser localement les préférences du décideur. Dans les méthodes interactives les paramètres de préférence peuvent prendre la forme d'un ensemble de niveaux d'aspiration, de reservation, etc.
Cette fonction permet au décideur/à l'analyste de spécifier les valeurs de différents paramètres de préférence. Le Tableau 11.7 contient une liste de paramètres de préférence couramment utilisés en aide multicritère à la décision.

Paramètre	Description
Coefficients d'importance relative	Nombres exprimant l'importance des critères pour le décideur
Seuil d'indifférence q_j ($j \in F$)	Représente la plus grande difference $g_j(a) - g_j(b)$ préservant une indifférence entre a et b sur le critère g_j
Seuil de préférence p_j ($j \in F$)	Représente la plus petite différence $g_j(a) - g_j(b)$ compatible avec une préférence en faveur de a sur le critère g_j
Seuil de veto v_j ($j \in F$)	Représente la plus petite différence $g_j(b) - g_j(a)$ incompatible avec aSb
Seuil de coupe λ	Nombre utilisé dans les méthodes multicritères de la famille ELECTRE pour valider la proposition de surclassement
Niveaux d'aspiration (points de référence)	Des valeurs minimales (maximales) définies sur un ou plusieurs critères d'évaluation que toute action doit dépasser (ou ne dépasser, selon que l'on maximise ou minimise) pour qu'elles soit acceptables
Niveaux de *reservation*	Les valeurs minimales sur chaque critère

TAB. 2.3 – Différents paramètres de préférence

2.4.12 Pondération des critères d'évaluation

Dans un problème de décision multicritère, le décideur considère souvent que les critères n'ont pas la même importance. Par exemple, dans un problème d'implantation d'une centrale nucléaire, un critère relatif aux risques radioactifs sur la population avoisinante est beaucoup plus important qu'un critère relatif au coût de construction ou à la distance par rapport à un cours d'eau. La plupart des méthodes multicritères traduisent cette *importance relative* par des nombres, souvent appelés *poids*. Nous désignons par k_j le poids associé au critère g_j. Le rôle de cette fonction est de définir un vecteur de poids $(k_1, k_2, \cdots, k_m)$ associé aux différents critères d'évaluation.

Il faut cependant insister sur le fait que l'interprétation du concept de poids n'est pas toujours immédiate et qu'elle dépend fortement de l'usage qu'on en fait. En effet, la notion d'importance relative est comprise de façons substantiellement différentes par les différentes procédures d'agrégation multicritère. Dans ce contexte, une distinction entre procédures compensatoires et procédures non compensatoires est relativement importante. Dans une approche *compensatoire*[11], comme la méthode MAUT, des compromis (*trade-offs*) ou *taux de substituions* sont utilisés afin de déterminer les valeurs des poids. Dans ce cas, les poids sont en fait des constantes d'échelle[12] (*scaling constants*) nécessaires pour que les fonctions critères soient compensatoires. Donc, ces poids n'ont aucune signification absolue ou intrinsèque et il n'y a aucun sens de leurs associés des valeurs indépendamment des critères (c.f., e.g., Keeney, 1992, pp. 147-148).

Dans l'approche de surclassement de synthèse, la notion d'importance relative a une signification très différente. En effet, le poids d'un critère avec les méthodes de surclassement de

[11]Une méthode est dite compensatoire lorsque les mauvaises évaluations sur un ou plusieurs critères sont compensées par les meilleures évaluations sur les autres critères. La méthode élémentaire de la somme pondérée est un exemple typique des méthodes compensatoires.

[12]Cela implique que si on change l'unité dans laquelle est exprimé un critère, son poids change.

synthèse joue le même rôle qu'un nombre de voix dans une procédure de vote (Vincke, 1992 ; Roy et Bouyssou, 1993 ; Greco, 1997 ; Choo et *al*., 1999).
Plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature pour estimer les "poids" de critères, sans que leurs auteurs s'intéressent toujours à leurs interprétations en fonction de l'usage qui en est fait[13]. D'après Guitouni et *al*. (1999b), il est théoriquement incorrect de spécifier les poids en dehors de la procédure d'agrégation qui sera utilisée, i.e., sans avoir déjà défini le type de la règle d'agrégation mathématique. La liste suivante fournit quelques procédures de pondération (Simos, 1990 ; Mousseau, 1993 ; Pomerol et Barba-Romero, 1993, Chap. 4, pp. 91-119) :

Hiérarchisation des critères (*categorization*). Cette technique demande au décideur de placer les critères dans des catégories telles que : "très important", "moyennement important", "peu important".

Classement des critères du plus important au moins important (*ranking*). Il s'agit de nouveau d'une méthode ordinale. La possibilité de distinguer plus finement de ce que permet un ordre total n'existe pas.

Notation (*rating*). C'est la technique la plus communément utilisée. Il est demandé au décideur de noter sur une échelle de 0 à 10 l'importance qu'il attribue à chaque critère.

Questions sur les rapports d'importance (*ratio questioning*). Des questions de type "quel est le rapport d'importance des critères g_i et g_j ?" sont posées au décideur. Au moins $n-1$ questions doivent être posées. Une variante de cette technique est utilisée dans la méthode AHP de Saaty (1980).

Distribution des poids (*metfessel allocation*). Le décideur dispose de 100 points qu'il doit distribuer aux critères selon leur importance. Une critique qu'on peut adresser à cette technique ainsi que la précédente réside dans le flou qui entoure, pour le décideur, le terme d'"importance".

Taux de substitution (*indifference trade-off*). Des questions de type "combien de $\Delta u_i(g_i)$ seriez-vous prêt de céder pour obtenir $\Delta u_j(g_j)$" sont posées au décideur. Il s'agit alors de résoudre l'ensemble d'équations :

$$\frac{k_i}{k_j} = \frac{\Delta u_j(g_j)}{\Delta u_i(g_i)}$$

2.4.13 Analyse de sensibilité/de robustesse

L'analyste devra examiner, par des *analyses de sensibilité*, la stabilité des résultats obtenus vis-à-vis de la variation des différents paramètres utilisés. Ces analyses de sensibilité servent de base à l'*analyse de robustesse*. Maystre et *al*. (1994, p. 22) définissent l'analyse de sensibilité et l'analyse de robustesse comme suit :

[13] À titre d'exemple, Choo et *al*. (1999) énumèrent 13 interprétations différentes du concept de poids.

Définition 2.9 *L'analyse de sensibilité consiste à répéter l'analyse multicritère originale en faisant varier les valeurs attribuées à l'origine aux différents paramètres de la méthode appliquée, valeurs qui sont souvent empreintes d'un certain arbitraire. Elle vise à définir les paramètres qui conditionnent le plus étroitement la solution choisie, c'est-à-dire où il suffit d'une faible modification pour changer la solution proposée.*

Définition 2.10 *L'analyse de robustesse consiste à déterminer le domaine de variation de certains paramètres dans lequel une recommandation reste stable. Elle sert à fournir au décideur une recommandation synthétique et robuste, qui l'informe quant à la capacité de la solution proposée à resister à des variations entre la réalité et le modèle censé la représenter.*

La technologie SIG est particulièrement utile pour l'analyse de sensibilité spatiale (Allen, 2001). Il existe quelques efforts pour combiner les systèmes SIG-AMC avec des procédures d'analyse de sensibilité (e.g. Lodwick et *al*., 1990 ; Feick et Hall, 2004 ; Gómez-Delgado et Tarantola, 2006). Par exemple, Feick et Hall (2004) commencent par discuter les exigences qui doivent être satisfaites par les méthodes d'analyse de sensibilité destinées à la prise de décision à référence spatiale et proposent une méthodologie générique pour la génération et la visualisation d'indicateurs sevrant de base pour l'analyse de sensibilité de l'importance relative des critères. Ensuite, les auteurs présentent une application de leur méthodologie à un problème de localisation. Ils ont conclu en particulier que les méthodes d'analyse de sensibilité en aide multicritère à la décision à référence spatiale jouent un rôle analogue à celui jouer par les méthodes récentes de *fouille des données géo-spatiales*[14] dans le sens où elles permettent d'"extraire" des informations utiles pour la prise de décision.
Dans une étude préliminaire où 11 critères ont été considérés dans un problème de localisation d'un site d'enfouissement de déchets nocifs, Gómez-Delgado et Tarantola (2006) ont utilisé le module MEC (Multi-Criteria Evaluation) d'IDRISI et deux méthodes d'analyse de sensibilité (Sobol' et E-FAST—voir, e.g., Saltelli et *al*., 1999) pour calculer des indices de sensibilité dans le but d'identifer les critères affectant le plus le résultat de l'analyse multicritère. Les auteurs ont pu identifer trois critères qui à eux seuls, déterminent à 97% le résultat de l'analyse.
L'analyse de robustesse en aide multicritère à la décision est relativement récente (voir, e.g., Roy, 1998 ; Vincke, 1999a ; Vincke, 1999b). À notre connaissance, il n'existe aucun travail sur l'incorporation des méthodes d'analyse de robustesse dans les travaux d'intégration SIG-AMC.

2.4.14 Agrégation

L'aide à la décision vise très souvent à élaborer des recommandations sur lesquelles le décideur s'appuiera pour définir un plan d'action. Dans un contexte multicritère, l'élaboration de recommandation requiert une *procédure d'agrégation multicritère* (PAMC) (Roy et Bouyssou, 1993) permettant de synthétiser les préférences sur chaque critère et contribuer à la définition d'un résultat. Cette fonction permet d'agréger les jugements que chaque critère permet de porter sur chaque action. Elle suppose que le tableau de performance ainsi que les différents paramètres préférentiels ont été déjà définis. Elle suppose également qu'une PAMC a été déjà choisie.

[14] Notre traduction de "*geospatial data mining*".

Les PAMC peuvent être regrouper en trois approches opérationnelles (Roy, 1985) : (i) l'approche du critère unique de synthèse, évacuant toute incomparabilité, (ii) l'approche du surclassement de synthèse, acceptant l'incomparabilité, et (iii) l'approche du jugement local interactif avec itérations essai-erreur[15]. Une idée générale sur les mécanismes d'agrégation dans chaque approche a été introduite dans le premier chapitre (cf. 1.4.4). Nous présentons dans les trois paragraphes suivants les caractéristiques de ces différentes approches.

Approche du critère unique de synthèse Le principe général de cette première approche, d'inspiration américaine, est que le décideur cherche à maximiser une fonction (de valeur, d'utilité) unique agrégeant tous les points de vue qu'il s'agit ensuite d'optimiser. Les travaux relatifs aux méthodes multicritères appartenant à cette approche étudient les conditions d'agrégation, les formes particulières de la fonction agrégeante (additive, multiplicative, mixte,...) et les méthodes de construction de ces fonctions (aussi bien au niveau local que global).
Deux caractéristiques fondamentales de cette approche sont : (i) elle évacue toute situation d'incomparabilité (i.e. le décideur est capable de comparer tout couple d'actions de A), (ii) elle impose la transitivité de l'indifférence. Cela découle du fait que le résultat de l'agrégation est un pré-ordre total (ou complet) sur l'ensemble des actions. Ces deux points constituent en effet les deux distinctions de base par rapport aux méthodes de surclassement de synthèse.
Les principales méthodes appartenant à cette approche sont (cf. 2.2.1) : MAUT, SMART, UTA, TOPSIS, AHP, la technique de *Goal Programming*, etc.

Approche de surclassement de synthèse La deuxième approche, d'inspiration française, vise dans un premier temps à construire des relations binaires partielles, appelées *relations de surclassement* (cf. §1.4.4), pour représenter les préférences du décideur, compte tenu de l'information disponible. Ces relations sont, en général, ni transitives, ni complètes. Dans un deuxième temps, ces relations sont exploitées en vue d'aider à formuler une recommandation qui puisse apporter une réponse au problème de décision. En effet, une relation de surclassement ne permet pas, en général, d'obtenir immédiatement un meilleur compromis ou un rangement des actions, exigeant ainsi une phase d'exploitation.
Les principales méthodes ou familles de méthodes appartenant à cette approche sont (c.f.2.2.1) : ELECTRE, PROMETHEE, ORESTE, QUALIFLEX, etc.

Approche du jugement local interactif Il s'agit de l'agrégation locale et itérative. Le principe de base consiste à accorder la primauté à des jugements locaux, c'est-à-dire ne mettant en jeu qu'un petit nombre d'actions et cela en dehors de toute règle explicite apportant une réponse synthétique au problème d'agrégation des performances ; il s'agit aussi d'expliciter un protocole organisant l'interaction entre d'une part le décideur et d'autre part l'homme d'étude et/ou un ordinateur, ceci en vue de faire émerger la prescription en fonction de la problématique retenue.

[15] Ph. Vincke (1992) les appellent respectivement la théorie de l'utilité multiattribut, (i) les méthodes de surclassement et les méthodes interactives. A. Scharlig (1985) parle des méthodes d'agrégation respectivement complètes, partielles et locales.

Les principales méthodes appartenant à cette troisième approche (cf. 2.2.2) : STEM, point de mire évolutif, cône d'amélioration.

2.4.15 Construction de la prescription

L'objectif de cette fonction est de fournir au décideur, compte tenu de la problématique choisie (cf. §1.4.3) et l'approche d'agrégation adoptée (cf. §2.4.14), une ou plusieurs actions, une affectation des actions à des catégories pré-définies, un rangement des actions, etc. Elle vise à exploiter le modèle de préférence construit sur l'ensemble des actions A au terme de l'étape d'agrégation. Il ne s'agit évidement pas de *montrer* au décideur *la décision* à prendre, comme préconise les auteurs anglophones qui parlent souvent de la *prise de décision* (*decision making*), mais plutôt d'apporter une assistance au décideur dans sa prise de décision, comme préconise les auteurs francophones qui parlent de l'*aide à la décision*. Bernard Roy (1990a) apporte une mise au point intéressante sur cette question théorique.
Dans plusieurs approches, la prescription est directement déduite à partir de l'étape de d'agrégation. C'est le cas lorsque le modèle de préférence est simplement un seul critère. La manière dont ce modèle est utilisé pour l'aide à la décision ne se pose même pas, quelque soit la formulation du problème. C'est également le cas lorsque l'approche d'agrégation utilisée est du type critère unique de synthèse. Cependant, lorsque l'agrégation est basée sur une relation de surclassement, une étape d'exploitation est nécessaire pour établir la prescription.
Vanderpooten (1990) a proposé une formalisation de l'étape de construction de la prescription en aide multicritère à la décision. Nous la reprenons brièvement dans ce qui suit.

2.4.15.1 Construction de la prescription dans le cadre de l'approche interactive

Dans le cadre de l'approche interactive, aucun model formel de préférence est construit. En effet, les méthodes interactives présentent au décideur progressivement et de manière directe des *prescriptions potentielles* qui sont ajustées par des informations préférentielles fournies de manière interactive. Du point de vue technique, les procédures interactives peuvent être considérées comme des procédures de *construction des prescriptions* (Vanderpooten, 1990b). Ils utilisent des concepts et des techniques (basés sur l'optimisation des fonctions scalarisantes—cf. §2.4.4) qui sont très différents de ceux utilisés dans le cadre des approches du critère unique de synthèse ou de surclassement de synthèse.

2.4.15.2 Construction de la prescription dans le cadre de l'approche du critère unique de synthèse

Dans cette approche, le modèle de préférence est une fonction (d'utilité, de valeur) U à valeur réelle ($U : A \rightarrow \mathbf{R}$) qui est par hypothèse transitive et complète. Ces hypothèses, qui sont assez fortes en pratique, autorisent néanmoins une exploitation directe de U pour construire la prescription :

- Pour le cas de $P.\alpha$: sélectionner a^* telle que

$$U(a^*) = \max_{a \in A} U(a)$$

(ou un sous ensemble d'actions dont la valeur est proche de $U(a^*)$).

- Pour le cas de $P.\beta$: définir les catégories en spécifiant les limites qui subdivisent la rangée de variation de U en intervalles et affecter chaque action potentielle a à une catégorie dont l'intervalle qui lui est associé contient $U(a)$.
- Pour le cas $P.\gamma$: construire le pré-ordre complet induit par U sur A.

2.4.15.3 Construction de la prescription dans le cadre de l'approche de surclassement de synthèse

Lorsque le modèle de préférence consiste en des relations de surclassement, une phase d'exploitation est nécessaire afin d'obtenir la prescription demandée. Dans la suite de ce paragraphe, nous présentons quelques solutions pour la construction de la prescription dans le cadre de la problématique $P.\beta$. Elle servira d'introduction à l'étape de classification multicritère (cf. §4.4.1.2) intégrée dans le processus de génération de la carte décisionnelle (cf. §4.3). Ils seront tous deux détaillés au niveau du quatrième chapitre. La construction de la prescription dans le cadre des problématiques du choix ($P.\alpha$) et de rangement ($P.\gamma$) est donnée en Annexe A.
Dans le cadre de la problématique $P.\beta$, l'objectif est de trouver une partition de A en p catégories pré-définies $C_1, C_2, \cdots, C_p$. Il s'agit donc de tester si on peut affecter une action a à une catégorie C_h à travers la comparaison de a avec quelques *actions de référence* (on dit également *fictives*) représentant les limites des catégories. Notons par $B = \{b_1, b_2, \cdots b_p\}$ l'ensemble de ces actions de référence. Ainsi, une action a est affectée à une catégorie C_h si et seulement si :

$$g_j(b_h) > g_j(a) > g_j(b_{h-1})(j = 1, \cdots, m)$$

Les limites des catégories doivent vérifiées certaines conditions de cohérence afin de définir des catégories suffisamment distinctives. Une liste des conditions minimales est :

- $\forall b_h \in C_h, \forall b_{h'} \in C_{h'<h}, \neg(b_{h'} \Delta b_h)$
- $\forall b_h \in C_h, \forall b_{h'} \in C_h, b_{h'} \neq b, \neg(b_{h'} \Delta b_h)$
- $\forall b_{h'} \in C_h, \exists b_h \in C_{h>h'}, \neg(b_h \Delta b_{h'})$

Ces trois conditions sont mutuellement exclusives et peuvent donc être utilisées pour trier les actions. Cependant, le résultat peut ne pas être exhaustive dans le sens où certaines actions ne vérifient aucune conditions. En plus, à cause de l'imprécision inhérente aux problèmes de décision, ces conditions nécessitent à être modifiées. L'utilisation d'une relation de surclassement permet de résoudre ces deux problèmes. Nous présentons dans ce qui suit deux types de procédures d'affectation basée sur une relation de surclassement.

Procédure basée sur l'utilisation d'un arbre de décision Pour affecter une action a à une catégorie C_h, nous pouvons utiliser les règles suivantes :

$$a \in C_h \Leftrightarrow \exists b_h \in B \quad \text{tel que} \quad aS_ib_h \quad \text{ou} \quad \sigma(a, b_h) \geq v_i$$

$$\forall b_h \in B, \neg(aS_ib_h) \Rightarrow a \notin C_h$$

En utilisant ces deux conditions, nous pouvons construire un arbre de décision qui permet d'examiner les différents cas en spécifiant des seuils appropriés pour les différents niveaux de l'arbre.

Procédure basée sur l'utilisation d'une distillation Les procédures de distillation sont particulièrement adaptées à p catégories ordonnées. Chaque catégories C_h est définie en terme d'une limite inférieure b_{h-1} et une limite supérieure b_h ($h = 1, \cdots, p$) où b_0 et b_p sont des limites fictives définies telles que $\forall a \in A$ on a :

$$aSb_0, \neg(b_0Sa), b_pSa, \quad \text{et} \quad \neg(aSb_p)$$

Nous devons par la suite admettre que :

$$aIb_{h-1} \Rightarrow a \in C_h \quad (h = 1, \cdots, p)$$

Puisque les catégories sont ordonnées, les limites doivent vérifiées les deux conditions suivantes :

- $aSb_h \Rightarrow aSb_{h-i} \quad (h = 0, \cdots, p-1)(i = 0, \cdots, h)$
- $b_hSa \Rightarrow b_{h+i}Sa \quad (h = 0, \cdots, p)(i = 0, \cdots, p-h)$

Une condition simple et suffisante pour satisfaire ces deux conditions est :

$$b_h \Delta b_{h-1} (h = 1, \cdots, p)$$

En plus, pour éviter d'avoir des situations ambiguës lorsque aIb_h et aIb_{h-1} se réalisent conjointement, les limites doivent vérifies la condition suivante :

$$aSb_h \Rightarrow \neg(b_{h-1}Sa) \quad (h = 1, \cdots, p-1)$$

Deux types de distillation sont généralement utilisées :

- *Distillation descendante* : si on identifie h telle que aSb_h et $\neg(aSb_{h+1})$, alors $a \in C_{h+1}$. Cela mène à une procédure qui consiste à tester successivement l'assertion aSb_h dans un ordre descendant (de $h = p-1$ à $h = 0$).
- *Distillation ascendant* : si on identifie h telle que b_hSa et $\neg(aSb_h)$, alors, selon la deuxième condition précédente, on peut affecter a soit à C_{h+1} si on a aSb_h ou à C_h si on a $\neg(aSb_h)$. Cela mène à une procédure qui procède par des tests successifs l'assertion b^hSa dans un ordre ascendant (de $h = 0$ à $h = p$).

2.5 Exemple didactique

Pour mieux illustrer la stratégie proposée, nous présentons dans cette section un exemple hypothétique relatif à un problème de localisation. La société impliquée dans cet exemple distribue des produits pétroliers aux différentes stations de service dans une région donnée. Elle

cherche à construire un nouveau dépôt afin de renfoncer son réseau de distribution. Le responsable de la société a identifié deux contraintes qui doivent être satisfaites par toute action potentielle :

- le site doit être dans une zone dont la population est au moins de 50 milles habitants, et
- le nouveau dépôt n'est peut être localisé à proximité d'un autre dépôt existant.

La Figure 11.6 illustre comment ce problème peut être "résolu" en utilisant les fonctions d'évaluation multicritère proposées dans la section précédente. La première étape consiste à utiliser les fonctions standards du SIG afin de générer deux plans d'information : un relatif à la population et un autre contenant les dépôts existants. Ces deux plans d'information sont ensuite superposés en utilisant la fonction F1 ("Définition/Génération des actions") pour générer les sites potentielles. Ensuite, la fonction F10 ("Génération des actions acceptables") est utilisée pour obtenir l'ensemble de sites acceptables. Tous ces sites vérifient simultanément les deux contraintes précédentes.
Dans l'étape suivante, nous pouvons utiliser la fonction F2 ("Construction des cartes critères") afin de générer les différentes cartes critères. Nous supposons que les critères suivants ont été considérés dans cette étude :

- distance par rapport aux dépôts existants (à maximiser),
- nombre de consommateurs potentiels dans un rayon de 150 kilomètres (à maximiser),
- coût d'implémentation (à minimiser), et
- proximité aux réseaux routiers (à maximiser).

Une fois les différentes cartes critères ont été définies, la fonction F12 ("Pondération des critères d'évaluation") peut être utilisée pour définir un vecteur des poids $\mathbf{k} = (k_1, k_2, k_3, k_4)$ associés aux différentes cartes critères. Ensuite, la fonction F6 ("Génération du tableau de performance") peut être utilisée pour déterminer les évaluations de différentes actions potentielles. Le premier critère peut, par exemple, être évalué en terme de la distance par rapport au plus proche dépôt existant. Le deuxième critère peut être évalué simplement en prenant la somme des habitants dans une zone tampon de 150 kilomètres. Le coût d'implantation est fourni directement par le décideur/l'analyste. Le dernier critère peut être évalué comme le nombre de routes dans une zone tampon de 100 kilomètres autour de chaque site potentiel.
Une fois le tableau de performance généré, les fonctions F7 ("Quantification"), F8 ("Normalisation") et F9 ("Préanalyse de dominance") peuvent être, si nécessaire, utilisées pour quantifier les critères qualitatifs, normaliser les évaluations et éliminer les actions dominées.
Si le choix de la procédure d'agrégation multicritère n'a pas été encore fait, alors nous pouvons nous servir du module de choix de la procédure d'agrégation (qui sera détaillé dans le chapitre suivant) pour identifier la méthode la plus appropriée au problème étudié. Éventuellement, on aura besoin de la fonction F11 ("Élicitation des préférences") pour expliciter les différents paramètres préférentiels nécessaires à l'application de la méthode multicritère choisie.
Dans la suite, la fonction F14 ("Agrégation") est utilisée pour évaluer les différentes actions potentielles. La fonction F15 ("Recommandation") peut être utilisée afin d'identifier les sites les mieux appropriés, de ranger ces sites, de les affecter à des catégories préalablement définies, etc. La fonction F14 ("Analyse de sensibilité/de robustesse") peut être utilisée pour tester la stabilité des résultats. La décision finale revient bien sûr au décideur.

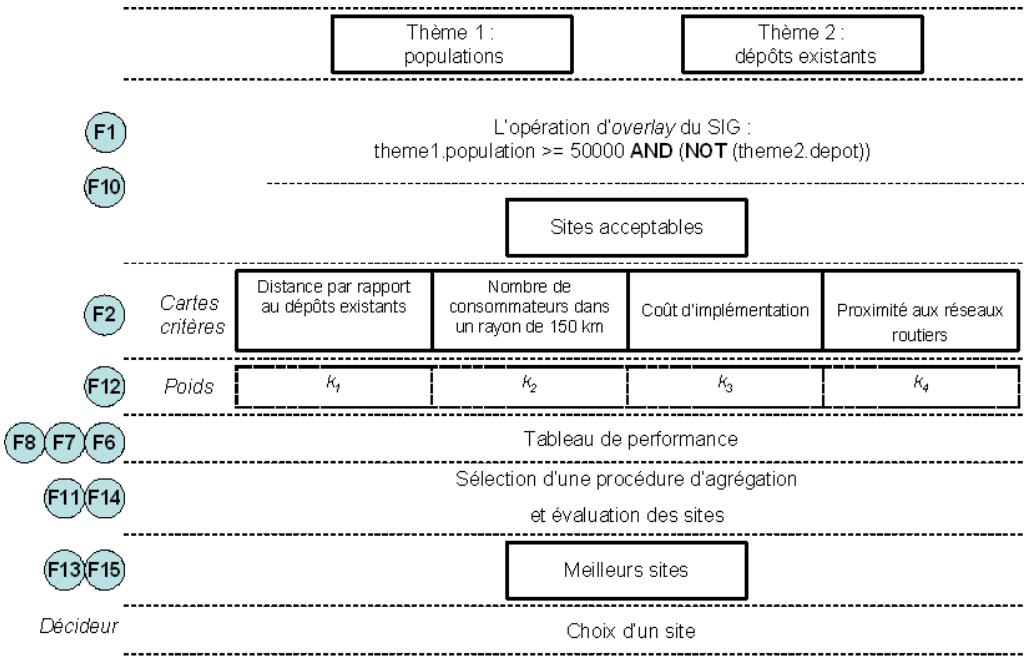


FIG. 2.9 – Exemple illustratif

2.6 Regard sur la stratégie proposée

Les travaux d'intégration SIG-AMC ont été présentés dans le premier chapitre. À notre connaissance, le seul travail similaire (i.e. basé sur l'incorporation des fonctions d'EMC et non pas des méthodes complètes) à celui proposé dans ce chapitre est celui de Jankowski (1995). En effet, Jankowski (1995) a proposé une stratégie pour incorporer quelques fonctions d'EMC (il s'agit de : "*decision table generation*", "*decision maker's preferences enumeration*", "*aggregation procedure selection*" et "*sensitivity analysis*"). Cependant, Jankowski ne considère que les fonctions associées aux méthodes discrètes alors que les méthodes continues peuvent être utiles dans plusieurs problèmes de décision réels. En outre, les fonctions d'EMC proposées par Jankowski sont étroitement calibrées sur cinq méthodes multicritères (AHP, AIM, méthode conjonctive, méthode disjonctive et TOPSIS). En plus, cette stratégie n'était pas implementée dans SIG.
En revanche, la stratégie proposée présente plusieurs avantages :

- Elle permet une intégration complète dans le sens où les fonctions d'évaluation multicritère sont définies de manière générique et peuvent facilement être incorporées dans le SIG ;
- Elle donne la possibilité d'appliquer différentes méthodes multicritères existantes ou même de créer une méthode *ad hoc* adaptée au problème en considération ;
- Elle représente une approche constructive de l'aide à la décision du fait que le décideur/l'analyste se trouve fortement impliquer dans le processus décisionnel ;

- Elle permet une résolution non linéaire du problème de décision : elle n'exige pas un ordre séquentiel sur les différentes étapes du processus de décision ; et
- Elle ne nécessite pas des connaissances approfondies sur les méthodes d'analyse multi-critère.

Par ailleurs, les fonctions décrites ci-haut peuvent être utilisées de façon indépendante. Cependant, certaines fonctions ne peuvent être utilisées avant d'autres simplement parce qu'elles utilisent les résultats de ces fonctions comme entrée. Les graphes dans les Figures 2.10 et 2.11 présentent la succession logique de différentes fonctions pour les méthodes discrètes et les méthodes continues, respectivement. Dans ces figures, les sommets représentent les fonctions d'EMC, les arcs représentent les contraintes logiques de précédence/succession. Les arcs en trait continu représentent des étapes obligatoires pour la quasi-totalité des méthodes. Les autres arcs représentent des étapes qui dépendent de la méthode à implementer et/ou du contexte décisionnel.

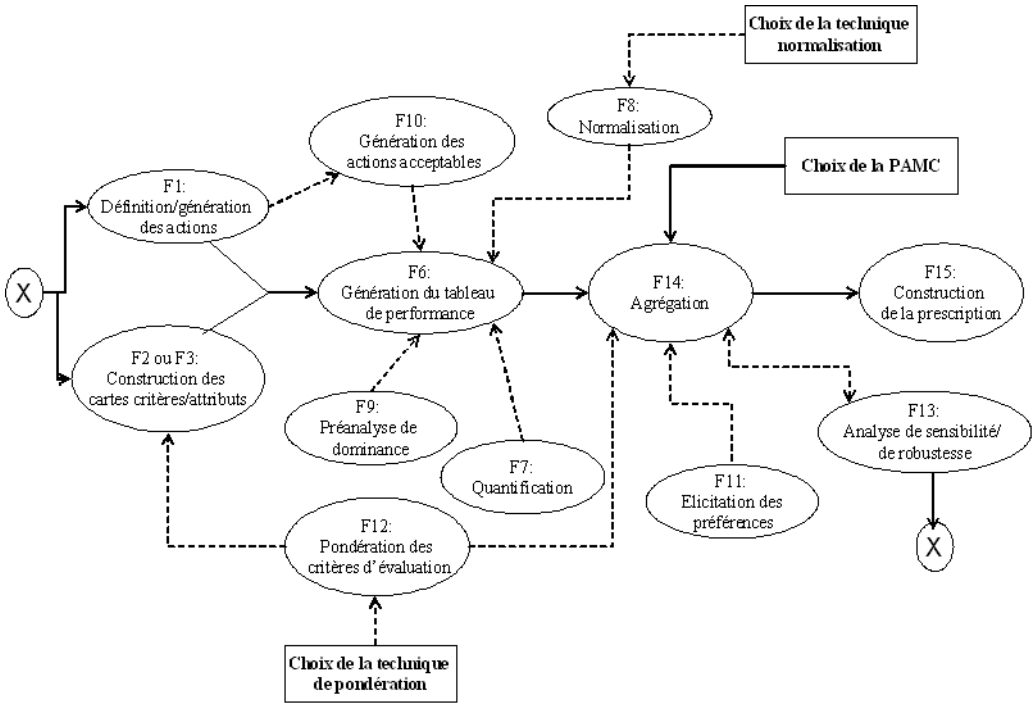


FIG. 2.10 – Relations de précédence/succession pour une méthode discrète

Plusieurs travaux récents se basent sur la technologie COM pour coupler les systèmes SIG avec d'autres logiciels. La technologie COM, Component Object Model, est un standard qui renforce l'interopérabilité entre logiciels en autorisant différents logiciels, éventuellement écrit dans des langages de programmation différents, de communiquer de manière directe[16]. Parmi

[16]Notre traduction de "COM is a standard that enhances software interoperability by allowing different software components, possibly written in different programming languages, to communicate directly" (Microsoft, 1997, 2000).

les applications de la technologie COM dans les SIG, nous citons : Ungerer et Goddchild (2002), Eldrandaly et *al*. (2003), Li et *al*. (2005), et Eldrandaly (2006).
L'article de Ungerer et Goddchild (2002) proposent une stratégie d'intégration du SIG et des fonctionnalités de l'analyse statistique spatiale en se basant sur la technologie COM. La stratégie est illustrée à travers l'incorporation d'un module d'l'interpolation surfacique (*areal interpolation*) dans ArcInfo. Pareillement, Li et *al*. (2005) couplent un système expert construit sur CLIPS, ArcObjects, MATLAB, et un module pour la gestion des prix d' assurance en utilisant la technologie COM. L'interface commune est développée en utilisant Microsoft Visual Basic. Signalons enfin le travail de Eldrandaly et *al*. (2003) où les auteurs utilisent la technologie COM pour coupler un SIG (ArcGIS), un système expert (développé par Visual Rule Studio) et la méthode multicritère AHP (implantée dans Microsoft Excel). L'interface commune est développée en utilisant Microsoft Visual Basic. L'outil développé n'intègre que la méthode AHP, limitant ainsi son champ d'application.

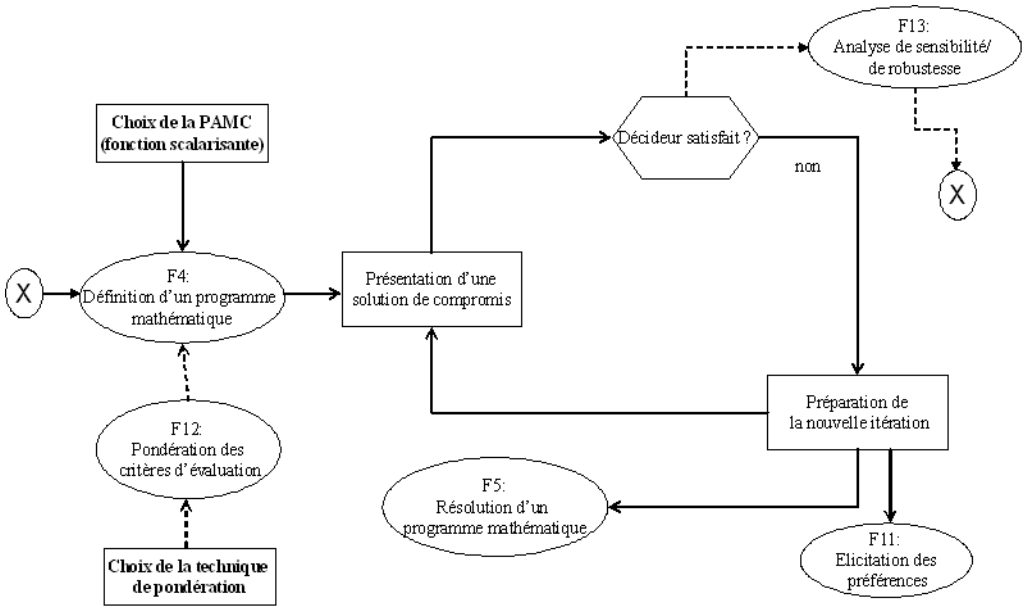


FIG. 2.11 – Relations de précédence/succession pour une méthode continue

Finalement, plusieurs questions peuvent se poser : est-il nécessaire vraiment d'incorporer des fonctionnalités multicritères dans le SIG ? N'est-il pas suffisant d'utiliser différents logiciels d'AMC existants et les coupler de manières indirecte avec le SIG ? pour quoi ne pas utiliser la technologie COM pour coupler le SIG avec les différents logiciels d'AMC ? Notre réponse à toutes ces questions est la suivante : nous pensons que les problèmes de décision à référence spatiale ont une nature multicritère inhérente et de ce fait, tout outil d'aide à la décision destiné à supporter ces problèmes doit contenir les fonctionnalités de base de l'analyse multicritère. Nous pensons également que le fait d'utiliser un ensemble de logiciels conçus différemment et initialement destinés à des contextes d'utilisation différents, ne peut offrir la flexibilité et la souplesse d'un système intégré SIG-AMC où les fonctionnalités d'analyse multicritère sont activées comme toute autre fonction standard du SIG.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une stratégie d'intégration SIG-AMC. Cette stratégie permet de répondre aux deux premières limites des travaux d'intégration SIG-AMC identifiées à la fin du premier chapitre : (i) elle permet une *intégration complète* dans le sens où les fonctions d'évaluation multicritère sont définies de manière générique et indépendante, et peuvent facilement être incorporées dans le SIG ; et (ii) elle donne la possibilité d'*appliquer différentes méthodes multicritères* existantes ou même de créer des méthodes *ad hoc* adaptées au problème en considération.
Disposer d'un grand nombre de méthodes d'AMC au sein du SIG permet de renfoncer les potentialités analytiques de celui-ci et d'étendre son champ d'application en aide à la décision à référence spatiale. Néanmoins, un nouveau problème apparaît : comment choisir la méthode à appliquer dans un problème donné. Pour pallier ce problème, nous proposons dans le chapitre suivant un module à base de règles destiné à assister le décideur/l'analyste lors du choix de la méthode à appliquer dans un problème donné.

Chapitre 3

Module à base de règles pour le choix de la procédure d'agrégation

Le choix de la procédure d'agrégation multicritère est une étape cruciale dans toute démarche d'aide multicritère à la décision. Ce constat se confirme dans un cadre spatial où les problèmes traités sont souvent de nature complexe et ayant des enjeux et impacts plus importants. Nous distinguons quatre approches pour appréhender le problème du choix de la procédure d'agrégation : (i) choix *ad hoc* ou non assisté, (ii) utilisation d'un arbre de classification, (iii) utilisation d'une méthode multicritère ou (iv) utilisation d'un système expert (ou d'un système informatisé d'aide à la décision). Dans le cadre de cette thèse nous avons opté pour cette dernière solution qui nous pensons se justifie mieux dans une perspective d'intégration SIG-AMC. Plus spécifiquement, ce chapitre présentera un module à base de règles destiné à supporter le décideur/l'analyste lors du choix de la procédure d'agrégation dans un cadre d'aide multicritère à la décision à référence spatiale. Le développement de ce module nécessite (i) la caractérisation (a) des méthodes multicritères, (b) du décideur et (c) des problèmes de décision à référence spatiale ; (ii) l'identification et la quantification des connaissances sur les méthodes multicritères ; et (iii) l'établissement d'une correspondance entre les trois éléments évoqués dans (i). Le résultat est une collection de règles. En s'appuyant sur la base de connaissances et selon les spécificités du problème étudié, le module utilisera la collection de règles pour proposer au décideur la ou les méthodes les plus appropriées à ce problème.

3.1 Introduction

On peut recenser un très grand nombre de méthodes multicritères, ce qui peut être vu comme une force ou une faiblesse (Bouyssou et *al.*, 1993). Bana e Costa et *al.*, (1997) justifient le grand nombre de méthodes multicritères proposées dans la littérature par (i) la grande diversité des origines scientifiques des pionniers de l'analyse multicritère, et (ii) la diversité des applications réelles. Ce grand éventail de méthodes a permis d'étendre le champ d'application des méthodes multicritères[1] mais au même temps a généré un autre problème : celui du choix

[1]Qui reste quand même faible par rapport aux potentialités de l'analyse multicritère. A cet égard, Guitouni et *al.* (1999a) qualifient le succès rencontré dans les différentes applications de l'analyse multicritère d'"assez mitigé".

de la méthode à appliquer dans un problème spécifique. L'importance du problème du choix de la méthode multicritère a été soulevée par différents auteurs et démontrée dans plusieurs cas pratiques (e.g. Evans, 1984 ; Jelassi, 1987 ; Hobbs et *al*., 1992 ; Ozernoy, 1992, 1997 ; Hobbs et Meier, 1994 ; Guitouni, 1998 ; Cao et Brustein, 1999 ; Guitouni et *al*., 1999b ; Laaribi, 2000 ; Lahdelma et *al*., 2000 ; Lu et *al*., 2000 ; Caillet, 2003 ; Liu et *al*., 2003 ; Opricovic et Tzeng, In press). Nous reviendrons sur l'importance et la nécessité de l'opération du choix de la procédure d'agrégation multicritère dans la section suivante.

Par ailleurs, nous partageons l'avis de plusieurs auteurs (e.g. Ozerny, 1992 ; Laaribi, 1994, Al-Shemmeri et *al*., 1997 ; Guitoni et Martel, 1998 ; Guitoni et *al*., 1999a ; Laaribi, 2000 ; Malczewski, 2004) qui considèrent que le choix d'une méthode multicritère pour un problème donné est un problème multicritère en soi puisque les critères utilisés pour la sélection sont conflictuels par nature. Ozerny (1992) ajoute également que le problème du choix de "la meilleure" méthode ne peut être résolu par une bonne structuration du problème, ni par le développement d'une méthode "parfaite". Une formalisation rigoureuse et systématique du problème de choix s'avère donc nécessaire.

Une remarque importante à évoquer à ce niveau est la suivante. Plusieurs auteurs (e.g. Hobbs et *al*., 1992 ; Ozerny, 1992 ; Liu et *al*., 2003) parlent du problème du choix de la *méthode* (ou *modèle*) *multicritère* alors que d'autres (e.g. Guitoni et Martel, 1998 ; Guitoni et *al*., 1999a ; Laaribi, 2000) parlent plutôt du problème du choix de *la procédure d'agrégation multicritère* (PAMC). Dans la suite de ce chapitre nous utiliserons les deux expressions indifféremment pour les deux raisons suivantes : (i) dans la littérature on utilise fréquemment la dénomination PAMC pour désigner à la fois une méthode multicritère et la procédure d'agrégation qui lui est associée (Guitouni et *al*., 1999b), (ii) le terme PAMC désigne souvent l'étape technique et plus spécifiquement celle de l'agrégation de la méthode multicritère. Selon nous, cette étape est la plus distinctive entre méthodes multicritères.

Dans la littérature, nous distinguons quatre approches pour traiter le problème du choix de la PAMC : (i) choix *ad hoc* ou non *assisté*, (ii) utilisation d'un arbre de classification, (iii) utilisation d'une méthode multicritère, ou (iv) utilisation d'un système expert ou d'un système informatisé d'aide à la décision (SIAD). Dans le cadre de cette thèse nous avons opté pour cette dernière approche. Nous pensons que dans une perspective d'intégration SIG-AMC, cette dernière approche se justifie mieux étant donné le grand nombre de méthodes qui sont actuellement disponibles, la grande diversité des problèmes auxquels les SIG sont appelés à faire face, et la diversité des domaines et disciplines auxquels appartenait les intervenants dans le territoire.

Dans la section suivante, nous listons quelques arguments montrant la nécessité et l'importance de la formalisation du problème de choix de la PAMC. Dans la section 3, nous présentons l'état de l'art concernant ce problème. Dans la section 4 nous introduisons le principe de la solution proposée. Dans la section 5 nous identifions les caractéristiques des problèmes de décision à référence spatiale, le décideur et les méthodes d'AMC. Dans la section 6 nous donnons une description conceptuelle du système (en cours de développement). Nous terminons le chapitre, en section 7, par une étude comparative par rapport à quelques travaux récents.

3.2 Nécessité et importance du choix de la PAMC

En essayant de répondre à la question "Plusieurs PAMC : est-ce une nécessité ?", Guitoni et *al*. (1999b) ont établi une correspondance entre les informations d'entrée (*input*) des différentes PAMC et les résultats (*output*) que ces dernières pourraient produire de sorte que chaque couple (*input,output*) représente une classe de problèmes décisionnels. Ils ont observé que les PAMC sont suffisamment différentes pour ne pas se retrouver toutes dans les mêmes cellules de la matrice (*input,output*). Les auteurs ont conclu que disposer de plusieurs PAMC est une nécessité et ont expliqué ce résultat par la grande diversité des situations décisionnelles. Dans ce sens Ozernoy (1992) affirme que différentes méthodes multicritères sont et seront nécessaires puisque, selon lui, (i) il existe différents types de problèmes qui nécessitent différentes approches pour leur résolution et (ii) quelque soit la nature de l'information préférentielle nécessaire pour appliquer une méthode hypothétique "parfaite", il existerait des décideurs qui ne peuvent pas fournir une telle information.
Ceci constitue, en soi, un élément en faveur de la nécessité d'une approche systématique pour traiter le problème du choix de la PAMC. Zanakis et *al*. (1998) indiquent deux raisons pour confirmer l'importance d'une formalisation systématique du problème de choix de la PAMC : (i) la grande diversité des techniques disponibles de complexité différente prête à confusion les utilisateurs potentiels quand au choix de la méthode, et (ii) différentes méthodes peuvent paraître adéquates pour un problème particulier mettant le décideur face au problème du choix de la méthode la plus appropriée. Ozernoy (1992) va plus loin en remarquant que le choix de "la meilleure" méthode est un problème aussi important que celui de la structuration de la situation décisionnelle. Quant à Al-Shemmeri et *al*. (1997), ils remarquent que le problème du choix de la PAMC n'était pas pris en consideration au début du développement de l'AMC mais actuellement, le grand nombre de méthodes existantes prêtent à confusion les utilisateurs potentiels quant au choix de la méthode à appliquer.
Pour Lu et *al*. (2000), le fait que les méthodes de prise de décision à objectifs multiples sont utilisées essentiellement dans un cadre académique et le nombre réduit des décideurs effectifs qui utilisent ces méthodes (Angehrn et Jelassi, 1994), revient, entre autre, aux différents modèles mathématiques et processus de résolution utilisés dans ces méthodes, compliquant, pour des utilisateurs souvent non familiarisés avec ces méthodes, le choix du la méthode à appliquer. Tout ces éléments montrent la nécessite d'une approche formelle pour traiter le problème de choix de la méthode multicritère.

3.3 État de l'art sur le problème de choix de la PAMC

Comparativement au nombre considérable de travaux de recherche accomplis dans le domaine de l'analyse multicritère, il y a relativement peu d'études qui ont été entreprises pour le problème du choix de la PAMC (Laaribi, 2000).
La nécessité de comparer les différentes méthodes multicritères et l'importance du problème de choix de la PAMC sont probablement reconnues pour la première fois par MacCrimmon (1973). Ce dernier a proposé une taxonomie des méthodes multicritères qui sont alors groupées selon leur structure (*multiattribute* ou *multiobjective*), leur nature compensatoire ou non

et selon la nature et le type de l'information à obtenir auprès du décideur. L'auteur a également développé un diagramme de spécification (*specification chart*) sous forme d'une arborescence permettant d'assister le décideur lors du choix de la PAMC.
Hwang et Masud (1979) ont développé une classification (sous forme d'un diagramme en arbre similaire à celui de MacCrimmon) de vingt méthodes multiobjectifs en six groupes en se basant sur le moment où l'information préférentielle est articulée (pas d'articulation, a priori, progressive ou a posteriori) et le type de l'information (cardinale vs ordinale ; explicite vs implicite).
Une classification des méthodes discrètes similaire à la précédente a été proposée dans Hwang et Yoon (1981). Dix-sept méthodes discrètes sont alors classées en sept groupes selon le type et la nature de l'information à obtenir du décideur. Les auteurs ont présenté également un ensemble de règles de choix sous forme d'une arborescence. Pour identifier la ou les méthodes les plus appropriées, le décideur doit répondre à une série de questions concernant le problème considéré (e.g. identification d'une seule solution ou toutes les solutions), la réponse à chaque question permet (i) soit d'orienter la recherche vers un groupe particulier de méthodes, (ii) soit d'identifier une méthode particulière.
Le *model choice algorithm* de Gershon (1981) se base sur 27 critères de sélection qui sont classés en quatre groupes : (i) *critères obligatoires* (prise en compte de critères qualitatifs, possibilité d'utilisation de la méthode pour la prise de décision dynamique), (ii) *critères non-obligatoires* (e.g. comparaison directe, rangement cardinal), (iii) *critères techniques* (e.g. consistence des résultats, prise de décision de groupe) et (iv) *critères propres à l'application* (e.g. nombre d'objectifs, nombre de contraintes). Le modèle construit un tableau de performance où les lignes correspondent aux différents critères et les colonnes aux différentes méthodes disponibles. Ensuite, un sous ensemble de ces critères qui sont appropriés au problème sont identifiés et les différentes méthodes disponibles, sont évaluées par rapport à ces critères. Puis les critères sont pondérés selon leur pertinence pour le choix. Enfin, la technique de *Compromise Programming* est appliquée sur ce tableau pour identifer la méthode la plus proche de la solution idéale. La plus importante critique qu'on peut adresser à cette technique c'est le fait qu'elle utilise une méthode multicritère pour le problème de choix, chose qui a été déconseillée par plusieurs chercheurs comme nous l'avons mentionné dans l'introduction.
Deason (1984) (cité et présenté dans Al-Schemmeri et *al*., 1997) a proposé un modèle, nommé *model selection paradigm*, basé sur un ensemble de déscripteurs (e.g. un ensemble fini d'actions, des actions continues, recherche d'un rangement ordinal sur les actions, disponibilité du décideur) qui caractérisent les problèmes de décision multicritère. Pour un problème particulier, un sous-ensemble de ces déscripteurs est d'abord sélectionné pour décrire la situation décisionnelle. Ensuite, les déscripteurs identifiés sont utilisés séquentiellement pour "filtrer" les différentes techniques disponibles en utilisant des *templates de filtrage* (*screening templates*) ; chaque template correspond à un "déscripteur". Si à l'issu de cette étape il reste plus d'une méthode, alors d'autres critères de sélection comme par exemple la facilité d'utilisation, l'interprétation de paramètres (i.e. est-ce que les paramètres ont une signification concrete pour le problème de décision) et la stabilité des résultats sont utilisés afin d'identifier une seule méthode.
Janssen et *al*. (1984) ont développé un cadre méthodologique pour l'application des méthodes d'évaluation relatives à des problèmes d'environnement. Ce cadre est basé sur une typologie de problèmes environnementaux (qui sont alors groupés selon trois dimensions : les profils d'ac-

tivités, les impacts causés par ces activités et la nature de la structure de décision en relation avec ces activités) et sur une classification des conditions d'utilisation (au nombre de 17) des méthodes d'évaluation multicritère. Ce qui caractérise cette méthodologie est le grand nombre de conditions à vérifier ; ce qui peut rendre son application difficile.
Gershon et Duckstein (1984) ont utilisé la technique du *Compromise Programming* afin d'identifier une PAMC. Le problème de choix est alors considéré comme un problème multicritère, où les techniques multicritères constituent les actions que l'on évalue sur la base d'un ensemble de critères relatifs aux caractéristiques du problème, des techniques, du décideur et de l'analyste. Cette procédure de sélection a été appliquée à un problème de planification d'un bassin de rivière (comme cas discret) et à un problème de planification de resources minières (comme cas continu). Notons que cette technique bien qu'elle a été appliquée à deux problèmes à référence spatiale, elle ne s'adresse pas particulièrement aux problèmes décisionnels à référence spatiale.
Le *model selection process*, proposé par Tecle (1988), consiste à identifier un ensemble de méthodes potentielles et à les évaluer par rapport à 49 critères de sélection classés en quatre groupes : (i) caractéristiques décrivant le problème de décision (e.g. capacité à choisir à partir d'un ensemble fini d'actions, nombre de variables), (ii) caractéristiques décrivant le décideur ou l'analyste (e.g. prise de décision individuelle ou de groupe, volonté de cooperation du décideur), (iii) caractéristiques décrivant les techniques (e.g. flexibilité, facilité d'utilisation) et (iv) caractéristiques décrivant la solution à obtenir (type de non-dominance de la solution, nombre de solutions à obtenir à chaque itération). La procédure commence par construire une matrice d'évaluation en mettant les critères de choix en lignes et les différentes techniques en colonnes. Ensuite, un sous ensemble de critères de choix est identifié et un poids est affecté à chaque critère de ce sous-ensemble. Enfin la méthode de *Compromise Programming* est utilisée pour identifier la méthode la plus appropriée (celle la plus proche de la solution idéale). Récemment, la procédure de Tecle (1988) a été implantée par Al-Shemeri et *al*. (1997) mais en appliquant PROMETHEE à l'étape du choix au lieu de la technique de *Compromise Programming* utilisée dans la version originale. À part le nombre élevé de critères, cette procédure est critiquée surtout pour l'utilisation d'une technique multicritère pour comparer les différentes techniques.
Teghem et *al*. (1989) proposent un SIAD interactive, nommé CHOICE, pour le choix de la méthode à utiliser dans un problème particulier. Dans la première partie de cet article, les auteurs identifient les caractéristiques principales de différentes méthodes et développent les différentes règles de sélection. Ensuite, ils utilisent ces règles pour quantifier et comparer plusieurs méthodes connues. Enfin, les auteurs traduisent les règles précédentes sous forme d'un arbre de décision. Ce dernier a été utilisé comme base pour le développement du SIAD .
L'expérimentation de Hobbs et *al*. (1992) a eu pour cadre le U.S. Army Corps of Engineers, où le personnel de planification des resources en eau a été appelé à comparer un ensemble de méthodes multicritères appliquées à un problème d'alimentation en eau potable. Les méthodes évaluées incluent le *Goal programming*, ELECTRE I, MAUT (additives et multiplicatives) et trois techniques pour choisir les poids[2]. Hobbs et *al*. (1992) ont conclu que "les décisions sont plus ou moins sensibles aussi bien à la méthode utilisée qu'à celui qui l'utilise". Cela contredit

[2]Il s'agit de la méthode de notation direct (*direct rating*) (cf. §2.4.12), la méthode de *taux de substitution* (*indifference tradeoff*) (cf. §2.4.12) et la méthode AHP de Saaty (1980).

le résultat d'une étude similaire effectuée par Goicoechea et *al*. (1992) en concluant que "les rangements ne sont pas affectés par le choix du décideur ni par le choix de la méthode". Zanakis et *al*. (1998) justifient cette différence par le fait que les personnes impliquées dans la première étude sont des professionnels alors qu'il s'agit d'étudiants dans la deuxième.
Ozernoy (1992) propose un Système Expert destiné à assister le décideur/l'analyste dans son choix systématique de la méthode multicritère dans un problème donné. On note deux différences par rapport à notre travail : d'une part, les méthodes considérées, et, d'autre part, le contexte considéré. En effet, le système développé par Ozernoy inclut une cinquantaine de méthodes discrètes alors que nous nous intéressons aussi bien aux méthodes discrètes qu'aux méthodes continues. En plus, le travail de Ozernoy (1992) est d'ordre général et ne s'adresse pas à un contexte spatial et encore moins à une perspective d'intégration SIG-AMC.
Duckstein (1992) a utilisé une méthodologie similaire à celle de Gershon et Duckstein (1984) pour un problème de gestion de resources forestières.
Tecle et Duckstein (1992) ont proposé une formulation multicritère du problème du choix de la PAMC à utiliser dans un problème de gestion de ressources forestiers. La procédure commence par identifier un ensemble de techniques susceptibles d'être utilisées et les évaluer par rapport à quatre ensembles de critères : (i) critères relatifs au problème de décision, (ii) critères relatifs au décideur/l'analyste, (iii) critères techniques, et (iv) critères relatifs aux résultats souhaités. Les 15 techniques identifiées sont alors évaluées en terme de 24 critères et rangées selon leur pertinence pour le problème considéré.
Yoon et Hwang (1995) proposent une version révisée de la taxonomie établie par Hawng et Yoon (1981). Dans cette nouvelle version, les auteurs commencent par classer 13 méthodes par rapport au type de l'information à obtenir auprès du décideur (aucune information vs information sur l'environnement vs information sur les attributs). Ensuite, la nature de cette information (pessimiste vs optimiste ; information de base vs ordinale vs cardinale) est utilisée pour classer les méthodes en 6 groupes.
Laaribi et *al*. (1996) ont proposé un modèle à trois phases qui procède par élimination jusqu'à l'identification de la PAMC la plus appropriée : (i) identification des caractéristiques[3] du problème de décision à référence spatiale considéré ; (ii) identification des caractéristiques[4] des PAMC. Il s'agit d'établir une correspondance entre les caractéristiques du problème décisionnel identifiées dans la première étape et les conditions d'utilisation des PAMC. Le résultat de cette correspondance sont les caractéristiques des PAMC qui sont appropriées au problème décisionnel ; et (iii) sélection de(s) PAMC adéquate(s). La sélection proprement dite se fait en deux temps : (a) d'abord un sous-ensemble de PAMC est identifié en se basant sur une version simplifiée de l'arborescence de classification proposée par Teghem et *al*. (1989), (b) ensuite

[3]En terme de type de problématique (choix d'une seule action, choix d'un sous ensemble, affectation, rangement ou description), la nature de l'ensemble d'actions potentielles (discret (vectoriel), ou grand nombre (*raster*)) la nature des informations à obtenir [échelle de mesure (nominal, ordinal, interval ou ratio) et disponibilité et nature (déterministe, non déterministe)], et les types des résultats de l'évaluation [étendue d'impact (ponctuelle, local, régional ou national) et le degré de fiabilité de l'information (excellent ou moyen).

[4]En terme de type de problématique (choix, tri ou rangement), de la nature de l'ensemble des actions potentielles, (discret ou continu), la nature de l'information à obtenir [concernant les critères (ordinal ou cardinal), information intracritère (fonction de valeur, pouvoir discriminant des critères), et information intercritères (connue explicite, connue partiellement, inconnue], et les types des résultats de l'évaluation [type de résultat (ponctuel ou distributionnel) et la prise en compte de l'imprécision (oui ou non).

une PAMC particulière est choisie en se basant sur les caractéristiques intrinsèques à l'utilisation d'une PAMC.
Al-Shemmeri et *al*. (1997) ont implémenté trois modèles[5] afin de choisir la méthode la plus appropriée à appliquer dans un problème de choix parmi différents projets de développement des ressources en eau. Dans les trois cas, c'est toujours la méthode PROMETHEE qui vient en tête. Les auteurs ont conclu leur papier en insistant sur la nécessité d'une analyse systématique pour identifier la méthode la plus adéquate dans un problème donné.
Guitouni et Martel (1998) (voir également Guitouni (1998)) proposent un cadre conceptuel qui a servi de base pour l'articulation d'un certain nombre de règles généraux (7 au total) pour le choix de la méthode multicritère. Le papier présente également une étude comparative de plusieurs PAMC connues. Selon les auteurs, ce travail constitue la première étape d'une approche méthodologique pour le choix d'une méthode multicritère. Le cadre proposé a été repris dans Guitouni et *al*. (1999b, 2000) pour construire un cadre de référence pour le choix de la PAMC.
Poh (1998) propose un système à base de connaissances pour la prise de décision multicritère. Onze méthodes d'analyse multicritère—dont TOPSIS, ELECTRE, AHP, elimination par aspects—ont été intégrées dans le système. Ce dernier incorpore également un module à base de règles facilitant le choix de la méthode à appliquer compte tenu des caractéristiques du problème étudié. Le système supporte trois types de guidage destinés aux utilisateurs débutants, intermédiaires ou expérimentés.
Quaddus et *al*. (1999) présentent la conception et le développement d'un sous-système à base de règles destiné à assurer un guidage intelligent lors du choix de la méthode à objectifs multiples à appliquer dans un problème donné. Ce sous-système est intégré dans un SIAD, nommé IMODSS (intelligent multiple objective decision support system), construit en utilisant le shell de système expert CLIPS, est destiné à la prise de décision à objectifs multiples. Le système incorpore sept méthodes multiobjectifs dont la méthode STEM de Benayoun et *al*. (1971), et les méthodes de Zionts et Walleninus (1976) et de Steuer (1977).
Lu et *al*. (2000) explorent la possibilité d'incorporer un système de "guidage intelligent" dans les systèmes d'aide à la décision pour les problèmes à objectifs multiples (Decision Support Systems under Multiple Objectives (MODSS)) et le développement d'un cadre pour concevoir un système à base de règles pour le choix d'une méthode de prise de décision multi-objectifs. Les auteurs présentent également le prototype qui a été développé sur la base de ce cadre.
Caillet (2003) a présenté une étude comparative de nombreuses méthodes multicritères discrètes (qui sont ELECTRE I, III et IV, PROMETHEE I et II, MAUT, AHP, MACBETH et la somme pondérée) dans le but d'en choisir une en vue d'une application en analyse de cycle de vie. Pour ce faire, l'auteur a utilisé les logiciels de ces différentes méthodes à des données réelles. L'auteur a conclut son rapport par remarquer que chaque problème a une méthode adaptée et que, s'il fallait choisir une méthode applicable à tous, ca sera PROMETHEE. Il justifie ce choix par la facilité de son logiciel, sa nature non-compensatoire et surtout pour son aspect polyvalent. L'auteur a également précisé qu'il faut se méfier de la simplicité de plusieurs méthodes comme la somme pondéré, MAUT, et éventuellement MACBTH qui, selon lui, recèlent des "pièges cachés".

[5] Il s'agit de *model selection paradigm* de Deason (1984), *model choice algorithm* de Gershon (1988) et *model selection process* de Tecle (1988).

3.4 Principe de la solution proposée

Les facteurs qui influencent le choix de la PAMC peuvent être divisés en trois groupes : (i) facteurs relatifs au problème de décision à référence spatiale considéré, (ii) facteurs relatifs au décideur, et (iii) facteurs relatifs aux PAMC. De ce fait, la recherche de la PAMC la plus appropriée peut être considérée comme une recherche des meilleurs arguments supportant la correspondance entre (Ozernoy, 1992) :

- les caractéristiques des problèmes de décision à référence spatiale,
- les caractéristiques du décideur, et
- les caractéristiques des PAMC

L'objectif donc est de construire un système qui permettra au décideur de relier ces éléments et d'établir cette correspondance. La solution adoptée dans le cadre de cette thèse consiste en le développement d'un module à base de règles. Le schéma général du module est donné dans la Figure 3.1. Nous avons suivi les étapes suivantes pour le développement de ce module :

1. La caractérisation des problèmes de décision à référence spatiale, du décideur et des méthodes d'AMC.
2. L'identification et la quantification des connaissances sur les méthodes d'AMC. Pour établir ces caractéristiques nous nous sommes basés sur la littérature disponible.
3. l'établissement d'une correspondance entre les trois éléments cités en 1 (i.e. les problèmes de décision à référence spatiale, le décideur et les méthodes d'AMC). Le résultat est une collection de règles.
4. l'utilisation du système.

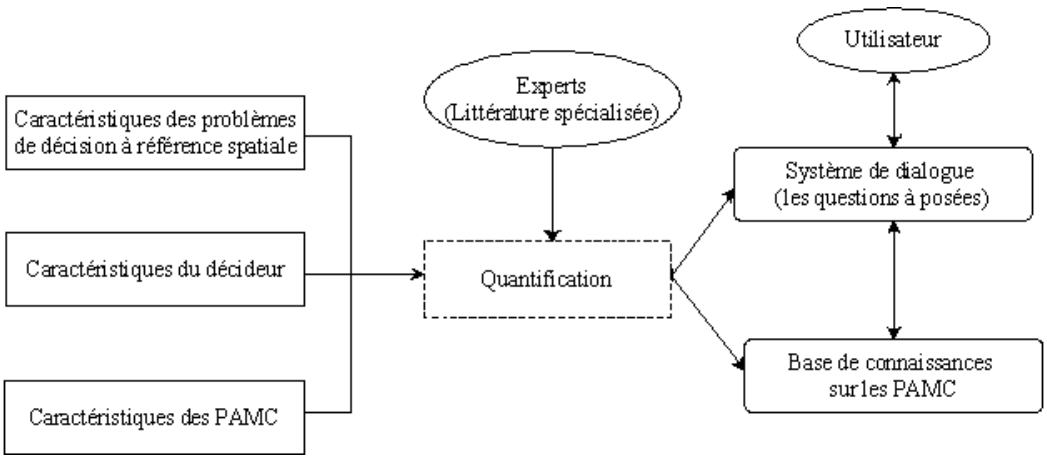


FIG. 3.1 – Principe de la solution proposée

Il est important que l'ensemble des caractéristiques soit complet (i.e. permet de décrire de manière adéquate la situation décisionnelle) et opérationnel (i.e. le décideur peut quantifier la situation décisionnelle avec un minimum d'effort). Il faut également que cette liste soit ni très

longue nécessitant un nombre élevé de questions, ni très réduite ne permettant pas de départager entre les différentes PAMC.
Nous considérons qu'une méthode multicritère est la plus appropriée si (Hobbs et *al.*, 1992 ; Ozernoy, 1992) :

- le décideur est conscient et accepte les hypothèses et la rationalité derrière la méthode.
- le décideur peut fournir, sans un effort cognitif important, les informations préférentielles nécessaires à l'application de la méthode.
- l'application de la méthode produit le résultat souhaité par le décideur.

3.5 Caractérisation de la situation décisionnelle

Dans cette section, nous identifions les caractéristiques des problèmes de décision à référence spatiale, du décideur et des méthodes d'analyse multicritère.

3.5.1 Caractérisation des problèmes de décision à référence spatiale

Dans cette sous-section, nous présentons les différentes caractéristiques des problèmes de décision à référence spatiale que nous jugeons pertinents pour le choix de la procédure d'agrégation multicritère à appliquer dans un problème donné. Une description sommaire de ces caractéristiques est donnée dans la Figure 3.2. Pour les identifications de ces caractéristiques, nous nous sommes basés sur la littérature disponible et en particulier : Ozernoy (1992), Martel (1995), Laaribi et *al*. (1996), Quaddus et *al*. (1999), Guitouni et Martel (1999a), Laaribi (2000), et Lu et *al*. (2000).

3.5.1.1 Type de problématique

La notion de problématique a été définie dans le premier chapitre (cf. §1.4.3) où nous avons distingué les quatre problématiques de base en aide multicritère à la décision. Ces problématiques restent également valables dans un contexte spatial.

La problématique du choix Dans une situation de choix, plusieurs cas sont possibles, selon que l'on cherche à identifier :

- une seule action non dominée qui soit la meilleure possible,
- un sous-ensemble d'actions non dominées parmi lesquelles le décideur est appelé à choisir,
- l'ensemble de toutes les actions non dominées.

Selon les multiples cas rapportés dans la littérature (e.g. Roy et Bouyssou, 1993), le deuxième cas est le plus fréquent dans un contexte spatial. Cela s'explique par la diversité des intervenants dans les problèmes de décision à référence spatiale où on cherche généralement un sous ensemble de solutions non-dominées qui seront soumises à des auditions publiques, souvent pour des raisons politiques.

1. Type de problématique
    (a) Choix
        i. Une seule action non dominée
        ii. Un sous-ensemble d'actions non dominées
        iii. Toutes les actions non dominées
    (b) Rangement
    (c) Tri
    (d) Description
    (e) Autres
2. Type de formulation
    (a) Modèle du type «A, A, E»
    (b) Modèle du type «A, F, E»
    (c) Modèle à la AHP
    (d) Autres modèles
3. Caractéristiques des actions
    (a) Nature de l'ensemble des actions
        i. Ensemble avec un nombre réduit d'éléments
        ii. Ensemble avec un nombre modéré d'éléments
        iii. Ensemble avec un grand nombre d'éléments
    (b) Type de définition
        i. Spécification explicite
        ii. Spécification implicite
    (c) Représentation des actions potentielles
        i. Actions ponctuelles
        ii. Actions linéaires
        iii. Actions surfaciques
        iv. Complexes
    (d) Technique de construction
        i. Par des objets géographiques ponctuels, linéaires ou surfaciques
        ii. Par des unités spatiales
    (e) Existence de contraintes
        i. Aucune
        ii. Peu
        iii. Assez peu
        iv. Beaucoup
4. Nombre de critères/d'attributs
    (a) Peu
    (b) Assez peu
    (c) Beaucoup
5. Nature de l'information sur les critères/attributs
    (a) Type de l'information
        i. Information de type déterministe
        ii. Information de type probabiliste
        iii. Information de type flou
        iv. Information de type mixte
    (b) Niveaux de mesure
        i. Niveau de mesure nominal
        ii. Niveau de mesure ordinal
        iii. Niveau de mesure interval
        iv. Niveau de mesure ratio
6. Type des résultats de l'évaluation
    (a) Formes de mesure de l'impact
        i. Par rapport à la dimension spatiale
            A. Ponctuelle ou locale
            B. Régionale ou nationale
        ii. Par rapport à la dimensions temporelle
            A. Ponctuelle
            B. Dispersée
    (b) Degré de fiabilité de l'information
        i. Faible
        ii. Moyen
        iii. Excellent

FIG. 3.2 – Caractéristiques des problèmes de décision à référence spatiale

La problématique du rangement Malgré qu'elle nécessite généralement une information abondante et de bonne qualité, cette problématique est souvent choisie par les décideurs pour la richesse de ses résultats : elle permet d'établir un ordre partiel ou complet sur l'ensemble des actions.

La problématique du tri Cette problématique se prête bien aux problèmes d'affectation biophysiques sur le territoire et dont la classification est pré-établie. En particulier, elle est souvent utilisée (de manière implicite) dans les problèmes d'utilisation du sol.

La problématique de description Il n'existe pas encore de méthodes multicritères pour traiter ce type de problématique. Nous l'avons inclue puisqu'elle nous semble, tout comme Laaribi (2000), intéressante pour les problèmes de décision à référence spatiale lorsque les décisions sont de type scénario (i.e. une série de décisions dispersées dans le temps). Elle est également utile lorsqu'il s'agit d'évaluer une situation existante et non pas des actions potentielles comme nous l'avons déjà remarqué dans le premier chapitre (cf. §1.4.3).

Autres problématiques Il peut s'agir ici de cas particuliers (e.g. tri préliminaire non compensatoire (*screening sorting*)) ou d'une combinaison (e.g. choix successive P.$\alpha \times k$) des problématiques précédentes. Il peut également s'agir de nouvelles problématiques comme celle "de rejet" proposée par Bana e Costa (1996). Cette option peut également servir dans des situations où il n'est pas encore possible, à cause de l'état de l'avancement dans le processus décisionnel par exemple, d'identifer une problématique particulière parmi les problématiques précédentes.

3.5.1.2 Type de formulation

Vansnick (1990) remarque que les deux écoles de l'aide à la décision, l'*école américaine* et l'*école française*, se base sur le même modèle de décision, désigné par : «A, A, E», pour l'application de leurs méthodes. Plusieurs auteurs (e.g. Banville et *al*., 1997 ; Guitouni et Martel, 1998 ; Guitouni et *al*., 1999a) remarquent que ce modèle est incomplet et ne représente que partiellement la situation décisionnelle. Guitouni et Martel (1998) réclament l'extension de ce modèle en considérant d'autres types de formulation comme par exemple un modèle de type «$\cdots A - A/F - E \cdots$» ou de type «$A - F - E - M$»[6]. Par ailleurs, la méthode AHP demande une structuration du problème de manière hiérarchique (similaire mais différente de celle demandée par une méthode de type MAUT où la liaison entre objectifs et attributs est explicite). De ce fait un modèle a part est à envisager. En effet, l'analyse selon le processus hiérarchique AHP de Saaty (1980) ne suit pas exactement cette formulation. Dans la structure hiérarchique, les actions occupent le dernier niveau de la hiérarchie, mais elles sont traitées exactement comme les éléments des autres niveaux à l'aide de comparaisons par paire. Pour toutes ces raisons, nous distinguons les quatre possibilités de formulation suivantes :

– **Modèle de type «**A, A, E**»** où le premier A est l'ensemble des actions potentielles, le deuxième A l'ensemble des attributs et E le tableau de performance. Ce premier modèle

[6] M représente les éléments nécessaires à la modélisation de préférence.

correspond à l'école américaine où les critères sont construits par une association entre objectifs et attributs.

- **Modèle de type «**A, F, E**»** où A est l'ensemble des actions potentielles, F une famille cohérente de critères et E le tableau de performance. Ce deuxième modèle correspond à l'école française où les critères sont des regroupements des axes de signification.
- **Modèle à la AHP** Ce modèle s'applique lorsque le problème est défini en terme d'une structure hiérarchique ou en réseau similaire à la méthode AHP. Il peut également correspondre à la méthode SMART, qui, comme la méthode AHP, est plus concernée par des évaluations "holistiques" de l'ensemble des actions par rapport aux différents attributs qui peuvent être dérivées de façon hiérarchique plutôt qu'une liaison explicite entre points de vue et attributs.
- **Autres modèles** Cette dernière possibilité englobe tous les cas où les trois premiers modèles ne s'appliquent pas.

La raison de cette décomposition est la suivante : il n'est pas raisonnable de proposer au décideur une méthode particulière basée sur une philosophie différente de la manière dont le problème est structuré. C'est le cas par exemple lorsqu'on propose une méthode de type ELECTRE à un problème de décision où une structuration en hiérarchie[7] à la AHP se prête mieux.

3.5.1.3 Caractéristiques des actions

Nature de l'ensemble des actions L'espace est de nature continue mais on a pris l'habitude de le discrétiser. Cette discrétisation est certe accompagnée par une perte d'information mais elle est justifiée par au moins les deux raisons suivantes : (i) une représentation discrète est plus facile à représenter et à traiter par ordinateur, et (ii) une représentation discrète est généralement suffisante en pratique et il n'est pas sûr qu'une représentation plus exacte donnera des résultats meilleurs. Selon la résolution adoptée pour la discrétisation, la cardinalité de l'ensemble des actions peut varier de quelques éléments à un grand nombre d'éléments. Étant donné que la frontière entre peu d'elements et grand nombre d'éléments n'est pas définie de manière exacte, nous proposons les trois types d'ensembles suivants :

- **Ensemble avec un nombre réduit d'éléments**. Une telle discrétisation correspond très souvent pour les données à référence spatiale à une structure vectorielle.
- **Ensemble avec un nombre modéré d'éléments**. Cet ensemble de cardinalité intermédiaire correspond au cas où l'espace géographique est composé d'une structure polygonale. Cela correspond au concept de la carte décisionnelle que nous allons introduire dans le chapitre suivant et qui permet de réduire le nombre des actions potentielles.
- **Ensemble avec un grand nombre d'éléments**. Cet ensemble correspond à des phénomènes continus dans l'espace et peut convenir à une structure matricielle des données à référence spatiale.

[7] Soit parce que le problème lui-même est de nature hiérarchique (e.g. découpage administrative), soit parce que le décideur est plus à l'aise avec cette manière de structurer le problème.

Type de définition Comme nous l'avons déjà mentionné dans le niveau du chapitre précédent, la composante spatiale d'une action spatiale peut être spécifiée de deux manières différentes (cf. §2.4.1) :

- Spécification explicite
- Spécification implicite

Une definition explicite demande généralement moins de calcul et moins d'effort cognitif de la part du décideur.

Représentation des actions potentielles Nous distinguons les quatre types de modélisation suivants (cf. §2.4.1) :

- Actions ponctuelles
- Actions linéaires
- Actions surfaciques
- Actions complexes

Cette caractéristique est utile dans le sens où elle permet d'avoir une idée approximative sur le nombre d'actions à évaluer. Une représentation ponctuelle génère généralement un nombre plus important d'actions que les représentations linéaires ou polygonales. Les actions complexes demandent la prise en compte de plusieurs relations topologiques et nécessitent donc plus de calcul et de traitement.

Technique de construction des actions Deux techniques de constructions sont possibles :

- Construction par des objets géographiques ponctuels, linéaires ou surfaciques.
- Construction par des unités spatiales.

Le premier cas correspond à l'approche classique. Le deuxième correspond à une modélisation des actions par une collection d'unités spatiales comme nous allons le voir dans le chapitre suivant (c.f. §4.4.2.1, §4.5 et §4.6). La construction des actions par une collection d'unités spatiales génère un nombre relativement modéré d'actions potentielles ce qui permet d'orienter la recherche vers les méthodes discrètes du critère unique de synthèse ou de surclassement de synthèse. Autrement, les méthodes du critère unique de synthèse sont plus appropriées.

Existence des contraintes Il se peut que dans certains problèmes décisionnels, le décideur/l'analyste souhaite exclure les actions qui présentent certains attributs (ou sens propriétés) indésirables. Cette information peut être utile dans le sens où les contraintes (ou critères d'admissibilité) permettent de réduire de façon significative le nombre d'actions à évaluer et à comparer. Nous retiendrons les valeurs suivantes pour cette caractéristique : (i) aucune, (ii) peu, (iii) assez peu, et (iv) beaucoup.

3.5.1.4 Nombre de critères/d'attributs

Selon l'étude comparative effectuée par Zanakis et *al*. (1998), les performances des méthodes multicritères varient en fonction du nombre de critères ou d'attributs pris en compte. Un

nombre plus grand de critères/d'attributs implique évidemment plus de calcul et donc plus de temps, un facteur important pour le choix de la PAMC. Un nombre élevé de critères/d'attributs est contraignant surtout pour les méthodes de surclassement de synthèse qui, en général, demandent beaucoup plus de calcul que les méthodes du critère unique de synthèse. Nous retiendrons les valeurs suivantes pour cette caractéristique : (i) peu, (ii) assez peu, et (iii) beaucoup.

3.5.1.5 Nature de l'information sur les critères/attributs

Moshkovich et *al*. (1998) ont comparé les résultats donnés, et donc l'information qui en est extraite, par les méthodes multicritères SMART et ZAPROS appliquées dans un problème de choix de candidats pour un poste vacant. Ils ont conclu que les données en entrée influencent le résultat final plus que les préférences. Dans un problème de décision à référence spatiale, l'information est multi-sources et multi-échelles. Il convient donc de bien examiner en profondeur la nature de cette information. Deux éléments importants pour caractériser l'information dans un contexte de prise de décision à référence spatiale : types de l'information et niveaux de mesure.

Types de l'information L'information disponible peut être déterministe (ou certaine) ou non déterministe. Nous pouvons distinguer deux types de non-déterminisme : probabiliste et flou. Il se peut également qu'un problème de décision fait intervenir de l'information déterministe et de l'information non-déterministe. Nous pouvons donc distinguer quatre catégories :

- Information de type déterministe (e.g. superficie d'une zone),
- Information de type probabiliste (e.g. l'information sur les précipitations),
- Information de type flou (e.g. le risque de crue peut être qualifié par des termes linguistiques de type "faible", "moyen", "élevé"),
- Information mixte (e.g. la probabilité qu'un glissement de terrain "important" se produit dans une zone donnée est de 50%).

Niveaux de mesure Quatre niveaux de mesure sont généralement utilisés :

Niveau de mesure nominal. Dans ce type de mesure, les valeurs prises par les propriétés sont des codes ou des noms, exprimant un aspect qualitatif sans référence à une hiérarchie. La seule opération mathématique possible entre les valeurs d'une même propriété de deux objets différents est l'*égalité* ($=$). *Exemple* : appartenance à une même zone.

Niveau de mesure ordinal. Dans ce type de niveau de mesure, les valeurs prises par les propriétés sont également des codes ou des noms mais exprimant des différences de degré et non de quantité. Dans ce cas, il y a une échelle linéaire mais non normée. Les opérations mathématiques possibles sont celles de la comparaison : *égal à*, *inférieur à* ($<$), *plus grand que* ($>$). *Exemple* : classification des routes : communales, régionales, nationales.

Niveau de mesure intervalle. Les valeurs prises par les propriétés dans ce type de niveau de mesure sont des quantités numériques. Ces quantités expriment des différences en termes de positions définies en relation l'une par rapport à l'autre sur une échelle linéaire et calibrée, mais sans référence à une origine fixe. Dans ce cas, le résultat obtenu dépend de l'unité utilisée. Les

opérations mathématiques permises sont, en plus des opérations précédentes, l'addition ($+$), la soustraction ($-$) et la multiplication par une constante. *Exemple* : la température d'un corps en ^{o}C.

Niveau de mesure ratio. Les valeurs prises par les propriétés dans ce type de niveau de mesure sont des quantités numériques définies sur une échelle linéaire calibrée avec un référentiel absolu, où le zéro signifie absence de quantité. Contrairement à l'échelle intervalle, les mesures sont utilisées pour quantifier des rapports et non des différences, et le résultat obtenu ne dépend pas de l'unité utilisée. Les opérations possibles en plus des précédentes sont la multiplication ($\times$) et la division ($\div$). *Exemples* : âge d'une bâtisse ; population d'une ville ; distance entre deux villes.

La représentation des objets ou des phénomènes à référence spatiale par des valeurs numériques constitue une caractéristique majeure des données à référence spatiale (Laaribi, 2000) puisqu'elle offre une meilleure flexibilité et une plus grande précision (Tomlin, 1990). Il est important de remarquer que ces valeurs concernent les propriétés et non pas les entités géographiques elles même (Malczewski, 1999). Par exemple, on peut mesurer des propriétés comme l'âge, l'emploie et le revenu d'une population et non pas la population elle même.

3.5.1.6 Types des résultats de l'évaluation

Deux facteurs concernant l'évaluation des actions doivent d'être pris en compte lors du choix de la PAMC : la forme de mesure des impacts engendrés par la mise en exécution des actions et le degré de fiabilité de l'information.

Formes de mesure de l'impact La mise en exécution d'une action spatiale engendrera des impacts (dommages et/ou bénéfices) qui peuvent être localisés ou dispersés aussi bien dans l'espace que dans le temps. La mesure de ces impacts peut alors prendre diverses formes, selon qu'on s'intéresse à la dimension spatiale, temporelle ou spatio-temporelle :

Par rapport à la dimension spatiale La mesure de l'impact spatial peut prendre deux formes :

- *ponctuelle* ou *locale* : elle correspond aux impacts qui sont caractérisés par une étendue très limitée et dont le résultat peut être représenté, sans une grande perte d'information, par une valeur ponctuelle. *Exemple* : effets engendrés par une décharge de déchets toxiques ; population d'une ville.
- *régionale* ou *nationale* : elle correspond aux impacts dispersés dans l'espace et dont la représentation cartographique est très illustrative, voire nécessaire. *Exemple* : plan de zones, contamination de nappes souterraines, inondations ; pollution de l'air, effets de l'implantation d'une autoroute.

Par rapport à la dimension temporelle Deux formes sont possibles :

– *ponctuelle* : elle correspond à une valeur unique qui se rapporte généralement à des attributs plus au moins non-évolutifs (e.g. appartenance administrative d'une commune, etc.).
– *dispersée* : elle correspond à une série de valeurs dispersées dans le temps et qui permettent de retracer l'évolution spatiale et/ou temporelle d'un objet ou d'un phénomène spatial.

Degré de fiabilité de l'information Les données (i.e. mesures) doivent généralement subir une série de transformations (e.g. agrégation, interpolation) afin d'en extraire des informations utiles pour la prise de décision. Ces transformations s'accompagnent inévitablement par une perte d'information pouvant nuire au processus décisionnel (Malczewski, 1996). La mesure de cette perte d'information permet de déterminer un *degré de fiabilité*[8]. Le degré de fiabilité représente en quelque sorte la qualité de l'information et sa pertinence pour la prise de décision. Vu les inévitables imprécisions qui peuvent affecter les mesures, il serait plus prudent de traduire le degré de fiabilité en terme d'intervalle de confiance et être jugé comme *excellent*, *moyen* ou *faible*. Dans le premier cas les transformations n'ont pas altéré l'information de manière significative. Ceci pourrait convenir, par exemple, lorsque les données relatives à des phénomènes qui se produisent sur de petits territoires sont transformées à travers plusieurs niveaux d'agrégation. Dans le dernier cas, l'altération est très significative et, généralement, l'information obtenue ne sera pas utilisée pour la prise de décision. Dans le cas intermédiaire l'altération est relativement significative sans toute fois dépasser un ceratin seuil au-delà duquel l'information n'est plus fiable. Ceci pourrait se produire, par exemple, pour les phénomènes associés à la densité de la population, où l'objet résultant de l'agrégation ne correspond pas à l'unité de recensement.

3.5.2 Caractérisation du décideur

Dans la suite de cette sous-section, nous établissons une série de caractéristiques relatives au décideur. La Figure 3.3 présente une description sommaire de ces caractéristiques. Ces dernières sont inspirées des travaux de : Tecle (1988), Hobbs et *al*. (1992), Ozernoy (1992), Quaddus et *al*. (1999), et Lu et *al*. (2000).

Acceptation des hypothèses de la méthode Toute méthode a un ensemble d'hypothèses qui doivent être vérifiées pour pouvoir l'appliquer. Cette caractéristique mesure le niveau d'acceptation de ces hypothèses par le décideur. Trois situations possibles :

– Hypothèses non acceptées
– Hypothèses plus au moins acceptées
– Hypothèses acceptées

[8]Par exemple, ce degré peut s'exprimer proportionnellement au carré de la différence $z - z'$, où z est la vraie valeur de la variable mesurée sur le terrain et z' la valeur estimée obtenue à partir de la base de données pour les distributions continues (Dumolard, 1999).

Effort cognitif nécessaire pour articuler les préférences Cette caractéristique mesure la capacité du décideur à fournir les informations préférentielles demandées par la méthode. L'effort peut être :

- Faible : le décideur peut facilement expliciter les informations demandées.
- Moyen : le décideur arrive, avec un effort relativement important, à expliciter les informations demandées.
- Élevé : le décideur trouve des difficultés pour expliciter les informations demandées.

Nombre de décideurs La décision peut concerner une seul personne ou un groupe de plusieurs personnes. Dans le deuxième cas, les décideurs peuvent être coopératifs ou non. Trois cas possibles :

- Un seul décideur
- Multiple coopératif
- Multiple non coopératif

Disponibilité du décideur Cette caractéristique mesure la disponibilité du décideur surtout en terme du temps qu'il peut fournir. La disponibilité du décideur est critique, essentiellement pour le choix d'une méthode interactive. En effet, ces méthodes nécessitent une implication importante du décideur tout au long du processus de résolution. Trois cas sont possibles :

- Non disponible
- Plus au moins disponible
- Disponible

Niveau de coopération du décideur Cette caractéristique mesure la motivation du décideur et son degré de coopération. L'analyste est plus apte à juger le niveau de coopération du décideur et peut ainsi décider si le décideur est :

- Non coopératif
- Assez coopératif
- Très coopératif

Connaissances du décideur en aide multicritère à la décision Probablement, ce critère est le plus important pour le choix de la procédure d'agrégation multicritère. Les connaissances du décideur dans le domaine de l'aide à la décision en générale, et de différentes méthodes d'AMC en particulier, lui facilite considérablement le choix de la méthode la plus appropriée à son problème. Les connaissances du décideur en aide multicritère à la décision peuvent être qualifiées par :

- Limités à très limités
- Moyennes
- Bonnes à excellentes

1. Acceptation des hypothèses de la méthode
   (a) Hypothèses non acceptées
   (b) Hypothèses plus au moins acceptées
   (c) Hypothèses acceptées
2. Effort cognitif nécessaire pour articuler les préférences
   (a) Faible
   (b) Modéré
   (c) Élevé
3. Nombre de décideurs
   (a) Un seul décideur
   (b) Multiple coopératif
   (c) Multiple non coopératif
4. Disponibilité du décideur
   (a) Non disponible
   (b) Plus au moins disponible
   (c) Disponible
5. Niveau de coopération du décideur
   (a) Non coopératif
   (b) Assez coopératif
   (c) Très coopératif
6. Connaissances du décideur en aide multicritère à la décision
   – Limités à très limités
   – Moyennes
   – Bonnes à excellentes
7. Familiarité du décideur avec les critères/attributes
   (a) Aucune approche
   (b) L'approche "top-down"
   (c) L'approche "bottom-up"
   (d) Les deux approches

FIG. 3.3 – Caractéristiques du décideur

Familiarité du décideur avec les critères/attributs Le décideur peut être familiarisé avec :

- Aucune approche
- L'approche "top-down"
- L'approche "bottom-up"
- Les deux approches

Les approches "top-down" de R. Keeney et "bottom-up" de B. Roy relatives à la formulation multicritère d'un problème de décision ont été introduites dans le premier chapitre (cf. §1.4.5).

3.5.3 Caractérisation des méthodes d'analyse multicritère

Pour identifier les caractéristiques de différentes méthodes d'analyse multicritère, nous nous sommes basés sur la littérature disponible : Hwang et *al*. (1980), Hwang et Yoon (1981), Evans (1984), Javalgi et Jain (1988), Teghem et *al*. (1989), Forman (1990), Roy (1990), Vanderpooten (1990a), Zimmermann (1990), Ozernoy (1992), Vincke (1992), Vanderpooten (1993), Maystre et *al*. (1994), Yoon et Hwang (1995), Al-Shemmeri et *al*. (1997), Guitouni (1998), Guitouni et Martel (1998), Poh (1998), Salminen et *al*. (1998), Guitouni et *al*. (1999a), Guitouni et *al*. (1999b), Miettinen et Mäkelä (1999), Quaddus et *al*. (1999), Raju et Pillali (1999), Guitouni et *al*. (2000), Laarbi (2000), Lahdelma et *al*. (2000), Lu et *al*. (2000), Quaddus et Williams (2000), Chen et *al*. (2002), et Caillet (2003). Pour une meilleure lisibilité, ces caractéristiques ont été classées en quatre groupes : (i) caractéristiques communes aux différentes méthodes multicritères, (ii) caractéristiques des méthodes discrètes, (iii) caractéristiques des méthodes continues, et (iv) caractéristiques des méthodes interactives. Notons enfin que plusieurs de ces caractéristiques ont été soit utilisées dans la caractérisation des problèmes de décision à référence spatiale (c.f. §3.5.1), soit introduites dans les chapitres précédents. Pour éviter les redondances, ces notions ne seront pas redéfinies dans cette sous-section.

3.5.3.1 Caractéristiques communes aux différentes méthodes d'analyse multicritère

Ces caractéristiques ne sont pas spécifiques à une catégorie de méthodes et peuvent être utiles pour orienter la recherche vers une famille particulière de méthodes. La liste des caractéristiques est reportée dans la Figure 3.4.

Nature de l'ensemble des actions La description du problème conduit à définir l'ensemble des actions. La cardinalité de cet ensemble constitue un paramètre important pour discriminer entre les méthodes multicritères. Cette caractéristique peut prendre deux valeurs :

- finie lorsque la méthode suppose un ensemble limité d'actions,
- infinie lorsque la méthode est appropriée pour un nombre très grand voire infini.

Le premier cas correspond généralement aux méthodes discrètes, le deuxième plutôt aux méthodes continues qui sont utilisables lorsque l'ensemble des actions est défini de façon indirecte via un ensemble de contraintes explicites.

Type de problématique de décision Les méthodes multicritères existantes font face essentiellement à trois problématiques : choix, tri et rangement. Mais pour les raisons évoquées dans le premier chapitre (cf. §1.4.3), nous ajoutons également la problématique de description.

Prise en compte de l'incertitude et de l'imprécision Il y a des méthodes qui tolèrent une imprécision dans l'information et d'autres qui l'acceptent moins ou pas de tout. Trois situations sont possibles :

– non : pour les méthodes qui n'acceptent aucun type d'incertitude ou d'imprécision.
– partiellement : pour les méthodes qui acceptent l'incertitude ou l'imprécision sur quelques éléments.
– oui : pour les méthodes qui acceptent l'incertitude et l'imprécision sur toutes les informations en entrée ou en sortie.

---

1. Nature de l'ensemble des actions (CC-1)
   (a) Nombre fini d'actions
   (b) Nombre très grand à infini d'actions
2. Type de problématique de décision (CC-2)
   (a) Choix
   (b) Tri
   (c) Rangement
   (d) Description
3. Prise en compte de l'incertitude et de l'imprécision (CC-3)
   (a) Non
   (b) Partiellement
   (c) Oui
4. Moment d'articulation des préférences (CC-4)
   (a) Articulation a priori
   (b) Articulation progressive
   (c) Articulation a posteriori

FIG. 3.4 – Caractéristiques communes aux méthodes d'analyse multicritère

Moment d'articulation des préférences Une distinction de base entre les méthodes d'AMC est entre l'*articulation a priori*, l'*articulation progressive* et *l'articulation a posteriori* des préférences. Les méthodes d'articulation *a priori* des préférences nécessitent, comme entrée, l'introduction des paramètres de préférence. Ensuite, ces paramètres seront "assemblés" en utilisant une procédure mathématique d'agrégation. Il est important de noter que ce processus doit inclure des analyses de sensibilité. Les méthodes multicritères discrètes utilisent ce type d'articulation. Les méthodes de la deuxième catégorie sont souvent qualifiée de *méthodes interactives*, dans le sens de l'interaction avec le décideur. Les méthodes d'articulation *a posteriori* sont concernées par la recherche de toutes les (ou la plupart de) solutions efficaces et de les présenter au décideur afin d'en choisir une, souvent de manière arbitraire. Les méthodes multicritères continues utilisent l'articulation progressive ou l'articulation *a posteriori*.

3.5.3.2 Caractéristiques des méthodes discrètes

Une description sommaire des caractéristiques des méthodes multicritères discrètes est donnée dans la Figure 3.5.

Nature des données admissibles C'est en fait les niveaux des échelles de mesure des données qui peuvent être nominal, ordinal, intervalle ou ratio. Ces différentes échelles de mesure ont été déjà introduites dans le paragraphe §3.5.1.5.

Caractéristiques des données admissibles Les résultats de l'évaluation constituent un élément particulièrement important pour les procédures d'agrégation et conditionnent fortement le choix d'une procédure adéquate. Ils concernent l'étape de réalisation de l'évaluation de chaque action selon chaque critère. Nous retenons les deux cas suivants :

- ponctuel : l'évaluation d'une action individuelle a selon un critère g est représentée par un point dans l'espace R, c'est-à-dire par un nombre unique ; ce type de résultat convient à l'information déterministe, ou
- distributionnel : l'évaluation d'une action individuelle est représentée par une distribution (discrète ou continue) ; ce type de résultat convient à l'information non déterministe comme, par exemple, une fonction relative aux précipitations.

Nature de l'information sur les actions Le mode d'articulation des préférences joue un rôle important sur le résultat du processus décisionnel. Les différents modes utilisés en analyse multicritère sont :

- compromis (*tradeoff*),
- loterie,
- notation directe, et
- comparaison par paire (essentiellement pour les méthodes de type AHP ou MACBETH).

Nature de l'information à obtenir sur les critères L'information sur les critères peut être de différents types :

- cardinal (ou quantitatif) comme par exemple le coût de construction de l'autoroute, la superficie de la zone de construction.
- ordinal (ou qualitatif) comme par exemple le niveau de service d'une ligne de métro, le niveau d'intégration de l'ouvrage dans le paysage.
- mixte.

Information intra-critères Les informations intra-critères peuvent prendre trois formes :

- *fonction de valeur* : lorsque le décideur doit définir une fonction d'utilité (essentiellement dans les méthodes de la famille MAUT) ou une fonction de distance (par exemple, les méthodes de Zeleny (1973) ou du *Goal Programming*).
- *pouvoir discriminatoire des critères* : c'est l'utilisation ou non des seuils pour nuancer la préférence au niveau local (de chaque critère). En effet, la notion de critère est très liée

1. Nature des données admissibles (CDM-1)
   (a) Nominale
   (b) Ordinale
   (c) Intervalle
   (d) Ratio
2. Caractéristiques des données admissibles (CDM-2)
   (a) Données ponctuelles
   (b) Données représentées par des distributions
3. Nature de l'information sur les actions (CDM-3)
   (a) Compromis
   (b) Loterie
   (c) Notation directe
   (d) Comparaison par paire
4. Nature de l'information à obtenir sur les critères (CDM-4)
   (a) Cardinale
   (b) Ordinale
   (c) Mixte
5. Information intra-critères (CDM-5)
   (a) Fonction de valeur/d'utilité
   (b) pouvoir discriminatoire (CDM-6)
      i. Seuil d'indifférence
      ii. Seuil de préférence
   (c) Utilisation de veto
6. Information inter-critères (CDM-7)
   (a) Explicite
   (b) Implicite
   (c) Non applicable
7. Logique compensatoire (CDM-8)
   (a) Compensation totale
   (b) Compensation partielle
   (c) Non-compensation

FIG. 3.5 – Caractéristiques des méthodes multicritères discrètes

à la perception qu'en fait le décideur : si la structure de préférence sous-jacente est une structure de pré-ordre total (modèle traditional), il s'agit de "vrai-critère", si on introduit un seuil d'indifférence, on parle de "quasi-critère" et si on introduit la relation de préférence faible, la structure de préférence sous-jacente est une structure de pseudo-ordre

(modèles à 2 seuils avec des conditions sur les seuils) ; on parle alors de "pseudo-critère" (cf. §2.4.11 pour la définition de ces différentes structures de préférence). Deux types de seuil de discrimination sont couramment utilisés dans les méthodes de surclassement de synthèse : *seuil d'indifférence* et *seuil de préférence*.
– *seuil de veto* : utilisé par plusieurs méthodes de surclassement de synthèse pour mesurer le degré d'opposition d'un critère à une hypothèse de surclassement.

Information inter-critères Un grand nombre de méthodes multicritères nécessitent que le décideur exprime l'importance relative qu'il accorde à ces critères. Ces coefficients d'importance relative ont différentes interprétations selon les méthodes et les écoles d'AMC (cf. Rogers et Bruen, 1998 ; Choo et *al*., 1999). Dans certaines situations, il peut s'avérer difficile d'expliciter l'importance relative des critères, ou même parfois d'établir une relation d'ordre entre eux. Dans ce travail, nous considérons les manières suivantes pour exprimer l'information inter-critères :

– *Explicite* : Plusieurs méthodes exigent une définition explicite des coefficients d'importance des critères. C'est généralement le cas avec les méthodes de surclassement de synthèse et les méthodes de type MAUT (e.g. ELECTRE III, Weighted Sum, EVAMIX, MAUT). Ces méthodes supposent que le décideur est capable d'expliciter l'importance relative des critères et de leur attribuer des valeurs numériques.
– *Implicite* : Certaines méthodes (e.g. ORESTE, REGIME) permettent aux décideurs d'exprimer les coefficients d'importance relative de manière indirecte par l'établissement d'une relation d'ordre (ou de pré-ordre) total entre les critères. Par exemple, on dira que le critère g_j est trois fois plus important que le critère g_i et que ce dernier est aussi important qu'un autre critère g_k.
– *Non applicable* : Plusieurs méthodes multicritères (e.g. la méthode lexicographique, ELECTRE IV, NAIADE) ne nécessitent pas la détermination des coefficients d'importance relative. Ces méthodes sont particulièrement utiles lorsqu'on ne dispose pas d'information de nature à permettre au décideur d'attributer des poids aux critères.

Logique compensatoire Trois cas sont possibles (Guitouni, 1998, pp.142-143) :

– *compensation totale* : c'est l'acceptation de l'hypothèse de la compensation absolue. Ce qui se traduit par le fait qu'une bonne évaluation sur un sous-ensemble de critères contrebalance une mauvaise évaluation sur un autre sous-ensemble. On fait intervenir dans ce cas des taux de substitution entre les critères. La somme pondérée est une méthode totalement compensatoire.
– *compensation partielle* : dans certaines situations décisionnelles, on peut accepter une certaine forme de compensation. Les méthodes partiellement compensatoires tiennent compte, en général, de l'incomparabilité et/ou des nuances de préférences. Parmi les méthodes partiellement compensatoires, nous citons MAUT, AHP, ELECTRE III.
– *non-compensation* : les méthodes totalement non-compensatoires n'autorisent pas l'effet de compensation entre les critères. Toutefois, dans la littérature, il n'existe quasiment presque pas de méthodes non-compensatoires (Vansnick, 1986), à l'exception des procédures lexicographiques, conjonctives, disjonctives.

3.5.3.3 Caractérisation des méthodes continues

Nous présentons d'abord les caractéristiques communes aux différentes méthodes continues. Ensuite, nous identifions les caractéristiques relatives aux méthodes interactives.

Caractéristiques communes aux méthodes continues

Types de variables de décisions Deux cas sont possibles :
- Toutes les variables sont continues
- Au moins quelques variables sont discrètes

---

1. Types de variables de décisions (CCM-1)
   (a) Toutes les variables sont continues
   (b) Au moins quelques variables sont discrètes
2. Fonctions objectifs et contraintes (CCM-2)
   (a) Toutes linéaires
   (b) Au moins une fonction objectif ou une contrainte est non-linéaire
3. Moment d'articulation des préférences (CCM-3)
   (a) Articulation progressive
   (b) Articulation a posteriori
4. Nombre de calculs (CCM-4)
   (a) Très peu
   (b) Peu
   (c) Assez peu
   (d) Beaucoup
5. Nature des solutions à obtenir (CCM-5)
   (a) Un sous ensemble des solutions efficaces
   (b) Toutes les solutions efficaces
6. Processus de résolution (CCM-6)
   (a) Programmation linéaire
   (b) Goal programming
   (c) Utilisation des points de référence

FIG. 3.6 – Caractéristiques communes aux méthodes continues

Fonctions objectifs et contraintes Deux cas sont possibles :
- Toutes les objectifs et les contraintes sont linéaires

– Au moins une fonction objectif ou une contrainte est non-linéaire

Moment d'articulation des préférences Comme mentionné précédemment, l'articulation des préférences avec les méthodes continues peut être *progressive* ou *a posteriori*.

Nombre de calculs Le nombre de calculs demandés par une méthode continue peut être qualifié par :
– Très peu
– peu
– Assez peu
– Beaucoup

Nature des solutions à obtenir Quelques méthodes produisent un sous-ensemble de solutions efficaces (e.g. la méthode *Interactive Sequential Goal Programming* de Masud et Hwang (1981)) alors que d'autres produisent toutes les solutions efficaces (e.g. la méthode *Interactive Multiple Objective Linear Programming Procedure* de Steuer (1977)).

Processus de résolution Le processus de résolution dans le cadre d'une méthode continue peut faire appel :

– à la programmation linéaire,
– à la technique du *goal programming*, ou
– à l'utilisation des points de référence,

Caractéristiques des méthodes interactives

Type de conception Les méthodes interactive peuvent être classées en deux grandes catégories suivant qu'elles se placent dans un perspective d'*apprentissage* ou de *recherche d'une solution* (Vincke, 1992 ; Vanderpooten, 1993). Chronologiquement, on constate une évolution des méthodes orientée recherche (e.g. STEM de Benayoun et *al*. (1971)) vers celle orientée apprentissage (e.g. Roy, 1976 ; Korhonen et Laaksso, 1986). Les méthodes les plus récentes combinent les deux aspects (e.g. Zionts et Wallenius, 1976 ; Steuer et Choo, 1983).

Hypothèses sur les préférences du décideur Deux situations peuvent se produire :

– Le décideur est supposé être consistent avec une structure de préférence pré-définie, souvent spécifiée en terme d'une fonction d'utilité ou de valeur. En plus, cette structure est supposée stable.
– Aucune hypothèse est émise quand à la structure de préférence du décideur qui peut être plus au moins formalisée—ou pas du tout—au début du processus de résolution. De plus, cette structure peut évoluer dans le temps.

Hypothèses sur le comportement du décideur Le décideur est supposé se comporter soit en consistence avec une structure de préférence stable et pré-définie, soit de façon totalement arbitraire. Dans le premier cas, il ne peut pas exprimer de l'information qui contredit la structure de préférence et les informations qui l'a déjà fourni. En particulier, il ne peut pas changer ses préférences au cours du temps. Dans le second cas, il n'est gouverné que par son désir à atteindre la solution de son problème. Néanmoins, il est totalement libre de donner n'importe quels jugements. En particulier, il peut changer ses préférences au cours du temps.

Type d'exploration L'exploration de l'ensemble des solutions peut être dirigé par :

- la procédure : Cette exploration est définie de façon à ce qu'elle fournie, à chaque itération, une solution de compromis au moins aussi bonne que la précédente (ici la structure de préférence est supposée stable). L'objectif de la procédure est de construire un processus qui converge.
- le décideur : l'exploration est basée sur une stratégie d'essai-erreur.
- la procédure et le décideur : l'exploration est normalement assurée par la procédure mais le décideur peut intervenir à tout moment pour prendre le control.

Type de dialogue Le dialogue décideur/procédure peut être :

- *Rigide* : contrôler par la procédure et consiste en une série de questions permettant d'obtenir les informations demandées par la procédure.
- *Libre* : contrôler par le décideur.
- *Flexible* : diriger soit par le décideur lorsque ce dernier veut exprimer de l'information préférentielle ou contrôler l'exploration ou par la procédure lorsque le décideur ne sait pas comment conduire l'exploration.

Convergence mathématique Notons que la convergence a un sens que dans une perspective prescriptive d'aide multicritère à la décision. Il est souvent admit que les méthodes interactives sont avant tout un processus d'apprentissage (*learning process*), où le "feedback" doit être autorisé ; c'est-à-dire, dans certaines itérations, les conclusions ne sont pas considérées comme définitives mais plutôt sujettes à des révisions durant le processus constructif (Bana e Cosata et *al*., 1997). Dans ce contexte, la convergence au sens mathématique est peu utile en pratique (Vanderpoten et Vincke, 1989 ; Steuer et *al*., 1996).

Nombre de questions au décideur Il est évidement plus avantageux de disposer d'un maximum d'informations. Par contre, il ne faut pas perdre de vue que l'objectif principal est d'aider le décideur, et non la méthode. Un nombre réduit de questions sera donc préférable. Mais au même temps il faut savoir que la qualité de la solution de compromis retenue en fin du processus dépendra du nombre de questions posées. Pour qualifier cette caractéristiques, nous retiendrons les cas suivants : *peu*, *assez peu*, *beaucoup*.

Difficulté des questions En pratique, les informations qualitatives sont préférées aux quantitatives : d'abord parce que le décideur est souvent incapable de fournir ces dernières et

1. Type de conception (CIM-1)
   - Orientée recherche d'une solution
   - Orientée apprentissage
   - Orientée recherche et apprentissage
2. Hypothèse sur les préférences du décideur (CIM-2)
   (a) Existence d'une fonction d'utilité/de valeur
   (b) Aucune hypothèse
3. Hypothèse sur le comportement du décideur (CIM-3)
   (a) Consistent par rapport à la structure de préférence
   (b) Libre
4. Type d'exploration (CIM-4)
   (a) Guidée par la procédure
   (b) Guidée par le décideur
   (c) Guidée par la procédure et le décideur
5. Type de dialogue (CIM-5)
   (a) Rigide
   (b) Libre
   (c) Flexible
6. Convergence mathématique (CIM-6)
   (a) Oui
   (b) Non
7. Nombre de questions au décideur (CIM-7)
   (a) Peu
   (b) Assez peu
   (c) Beaucoup
8. Difficulté des questions (CIM-8)
   (a) Simples
   (b) Assez simples
   (c) Assez difficiles
   (d) Difficiles
9. Exploitation de l'information préférentielle (CIM-9)
   (a) L'information est toujours valide
   (b) Retenir la dernière information fournie
   (c) Retenir l'information qui ne contredit pas la dernière information fournie
10. Règle d'arrêt (CIM-10)
    (a) Par la procédure
    (b) Par le décideur
11. Résultat final (CIM-11)
    (a) Un optimum local
    (b) La solution retenue par le décideur
    (c) La solution retenue par le décideur mais renforcée par la procédure

FIG. 3.7 – Caractéristiques des méthodes interactives

ensuite parce qu'il est inutile d'exiger des réponses précises. Les questions à poser au décideur peuvent être qualifiées par : *simples, assez simples, assez difficiles, difficiles*.

Exploitation de l'information préférentielle Trois situations concernant l'information préférentielle fournie par le décideur à chaque itération sont possibles :

- L'information est toujours valide
- Retenir la dernière information fournie
- Retenir l'information qui ne contredit pas la dernière information fournie

Règle d'arrêt et résultat final L'exploration de l'ensemble de solutions efficaces peut être arrêtée par la procédure ou par le décideur. Mais en pratique, trois cas sont possibles :

- Lorsque l'exploration est arrêtée par la procédure, la décision finale est généralement un optimum local. Cependant, l'intérêt de cette solution dépend étroitement des hypothèses concernant les préférences du décideur.
- Lorsque l'exploration est arrêtée par le décideur, ce dernier est convaincu, compte tenu de ses préférences, que la solution proposée est satisfaisante. Cependant, il n'existe aucune garantie formelle concernant l'optimalité et l'intérêt de la solution retenue.
- Dans certaines cas, l'exploration est arrêtée par le décideur mais la procédure essaie (i) soit de renforcer la solution finale retenue par le décideur, (ii) soit de déclencher une nouvelle exploration.

3.6 Description conceptuelle du module

3.6.1 Quantification des méthodes multicritères et de la situation décisionnelle

Pour la quantification des méthodes multicritères considérées dans ce travail de recherche, nous nous sommes basés sur la littérature disponible dont les principales références ont été citées dans le premier chapitre (au début du paragraphe §1.4) et au début du paragraphe §3.5.3 du présent chapitre.
La quantification d'une situation de décision particulière est accomplit par une série de questions qui seront posées au décideur successivement jusqu'à l'identification d'une méthode appropriée à son problème. Ces caractéristiques concernent le problème de décision considéré et le décideur lui même.

3.6.2 Conception des questions et représentation des réponses

Notons d'abord que pour faciliter cette présentation, nous avons codifié les caractéristiques relatives aux problème de décision à référence spatiale (cf. Tableau 3.2) et au décideur (cf. Tableau 3.1).

No.	Caractéristique
C-PB-1	Type de problématique
C-PB-2	Type de formulation
C-PB-3	Nature de l'ensemble des actions
C-PB-4	Type de définition des actions
C-PB-5	Représentation des actions potentielles
C-PB-6	Technique de construction
C-PB-7	Existence des contraintes
C-PB-8	Nombre de critères/d'attributs
C-PB-9	Type de l'information sur les critères/attributs
C-PB-10	Niveaux de mesure de l'information sur les critères/attributs
C-PB-11	Formes de mesure de l'impact par rapport à la dimension spatiale
C-PB-12	Formes de mesure de l'impact par rapport à la dimension temporelle
C-PB-13	Degré de fiabilité de l'information

TAB. 3.1 – Liste des caractéristiques relatives aux problèmes de décision à référence spatiale

No.	Caractéristique
C-DM-1	Acceptation des hypothèses de la méthode
C-DM-2	Effort cognitif nécessaire pour articuler les préférences
C-DM-3	Nombre de décideurs
C-DM-4	Disponibilité du décideur
C-DM-5	Niveau de coopération du décideur
C-DM-6	Niveau des connaissances du décideur en aide multicritère à la décision
C-DM-7	Familiarité du décideur avec les critères/attributs

TAB. 3.2 – Liste des caractéristiques relatives au décideur

En se basant sur les caractéristiques générales des problèmes de décision à référence spatiale (cf. §3.5.1) et celles du décideur (cf. §3.5.2), nous avons établi deux groupes de questions :

- des questions relatives aux problèmes de décision à référence spatiale, et
- des questions relatives au décideur.

La liste de différentes questions pour les deux groupes sont données dans les Tableaux 3.3 et 3.4. Ces questions seront alors posées au décideur en commençant par celles relatives au problème de décision. Pour réduire l'effort cognitif du décideur, chaque question est accompagnée par la liste de réponses possibles et d'une échelle ordinale sur laquelle le décideur doit spécifier le poids qu'il/elle accorde à la question posée. Les poids seront utilisés pour établir la correspondance entre les caractéristiques de la situation décisionnelle et celles des méthodes d'AMC comme nous allons voir dans le paragraphe suivant (§3.6.3). Le décideur doit ainsi fournir la réponse qu'il/elle juge adéquate et le poids associé à cette question. La relation entre questions, réponses et caractéristiques des problèmes de décision à référence spatiale est donnée dans le Tableau B.2 ; celle entre questions, réponses et caractéristiques du décideur est donnée dans le Tableau B.1.

No.	Question
Q-PB-1	Quelle est la problématique de votre problème ?
Q-PB-2	Quel est le type de formulation de votre problème ?
Q-PB-3	Quelle est la nature de l'ensemble des actions ?
Q-PB-4	Quel est le type de définition des actions ?
Q-PB-5	Comment les actions sont elles représentées ?
Q-PB-6	Quelle est la technique de construction des actions ?
Q-PB-7	Le problème nécessite-il la définition de contraintes ?
Q-PB-8	Quel est le nombre de critères/d'attributs ?
Q-PB-9	Quel est le type de l'information sur les critères/attributs ?
Q-PB-10	Quelle est la nature de l'échelle de mesure de l'information sur les critères/attributs ?
Q-PB-11	Quelle est la forme de mesure de l'impact par rapport à la dimension spatiale ?
Q-PB-12	Quelle est la forme de mesure de l'impact par rapport à la dimension temporelle ?
Q-PB-13	Quel est le degré de fiabilité de l'information ?

TAB. 3.3 – Questions relatives aux caractéristiques des problèmes de décision à référence spatiale

No.	Question
Q-DM-1	Acceptiez-vous les hypothèses de la méthode ?
Q-DM-2	Comment qualifiez-vous l'effort cognitif nécessaire pour articuler les préférences ?
Q-DM-3	Quel est le nombre de décideurs ?
Q-DM-4	Comment qualifiez-vous la disponibilité du décideur ?
Q-DM-5	Quel est le niveau de coopération du décideur ?
Q-DM-6	Comment qualifiez-vous le niveau des connaissances du décideur en aide multicritère à la décision ?
Q-DM-7	Avec quel type de modélisation êtes-vous familiarisé ?

TAB. 3.4 – Questions relatives aux caractéristiques du décideur

3.6.3 Stratégie pour l'identification de la méthode

Les réponses aux questions précédentes seront utilisées pour identifer la méthode la plus appropriée. L'idéal est de trouver une méthode qui correspond de manière complète aux caractéristiques du problème et du décideur. Cependant, il n'existe pas en général une correspondance complète entre les réponses et les caractéristiques d'une méthode particulière. Pour résoudre ce problème, nous proposons la stratégie illustrée par la Figure 3.8. Il s'agit d'utiliser les poids fournis par le décideur afin d'identifier la méthode qui soit la plus proche aux réponses proposées par le décideur. Le processus commence d'abord par chercher une méthode qui soit complètement en accord avec les caractéristiques fournies par le décideur. Si une telle méthode n'est pas trouvée, alors la caractéristique la moins importante est ignorée et le système cherche à nouveau une méthode en utilisant les caractéristiques restantes. Et ainsi de suite jusqu'à l'identification d'une méthode adéquate.

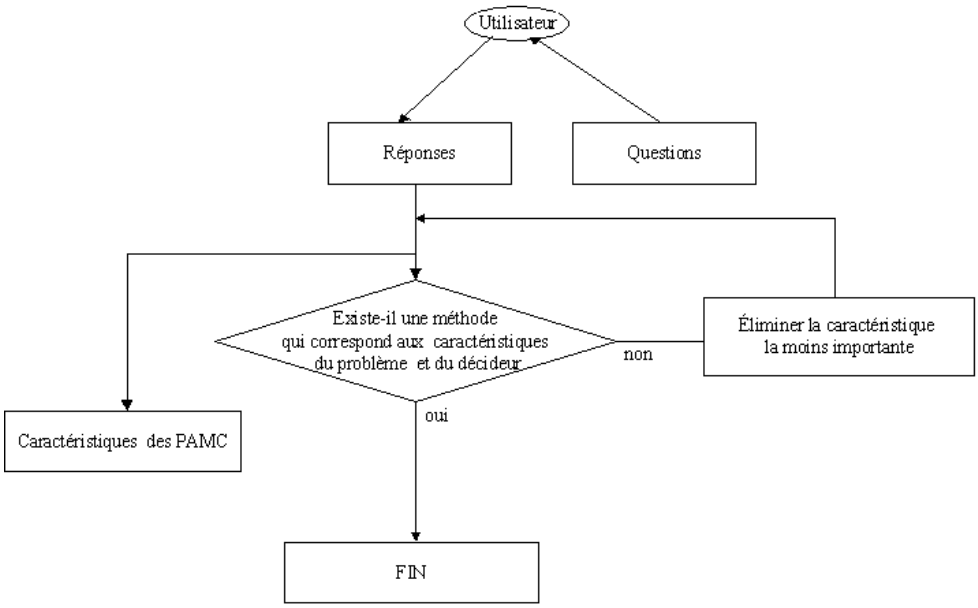


FIG. 3.8 – Stratégie pour la recherche de la méthode la plus appropriée

3.6.4 Conception et construction de la base des connaissances

La première étape pour la construction de la base des connaissances consiste en l'identification et l'acquisition des connaissances sur les PAMC. Ensuite, ces connaissances doivent être traduites sous forme de règles et de faits pour être utilisables par le moteur d'inférence.

Représentation des connaissances sur les PAMC

Il existe différentes techniques de représentation des connaissances : réseaux sémantiques (*semantic nets*), *frames*, logique (*logic*) et règles (*rules*). La méthode la plus utilisée est celle basée sur l'utilisation des règles. Cette représentation consiste en des connaissances factuelles (*faits*) et des règles de type **IF-THEN**, également connues sous le nom de *règles de production* (*production rules*). L'avantage de base de cette technique de représentation est la modularité des règles, et l'uniformité et la simplicité de l'interprétation (Ozernoy, 1992 ; Poh, 1998). Dans le cadre de cette thèse nous avons opté pour une représentation par règles.
La base de connaissances est construite donc par une collection de faits définissant les connaissances sur les différentes PAMC et une collection de règles qui seront utilisées pour l'identification de la méthode la plus appropriée.

Définition des faits Les faits sont un moyen de base pour représenter les connaissances dans les systèmes à base de connaissances. Ils représentent une unité fondamentale des données utilisées par les règles. Chaque fait représente une collection d'informations relatives à une

méthode ou à d'autres éléments (e.g. questions, réponses, relations question-réponse, etc.) qui sont nécessaires pour le fonctionnement du moteur d'inférence.
Les connaissances sur les différentes méthodes ont été subdivisées en quatre groupes de faits "General", "Discrete", "Continuous" et "Interactive". D'autres groupes de faits ont été également définis :

- "Response" : reliant les réponses de chaque question aux faits que le moteur d'inférence doit traiter.
- "Characteristic-Question" : reliant chaque caractéristique à la question qui lui est associée.
- "Question-Question" : reliant une question à une autre question qui doit la suivre selon la réponse du décideur.

Il est également nécessaire de définir un ensemble de faits permettant de relier les faits appartenant au même groupe ("Fact-Class") et un dernier groupe de faits pour initialiser le processus d'inférence, introduire des données et fournir les résultats.
Les connaissances sont ensuite représentées en utilisant les constructeurs "**def-facts**" et "**def-templates**". Le constructeur "**def-templates**" permet de définir un groupe d'attributs de manière similaire à la notion d'enregistrement en base de données relationnelles. Dans la suite, nous présentons quelques exemples de ces faits. Notons que dans ces exemples nous avons utilisé la syntaxe de JESS[9] (avec quelques petites modifications pour une meilleure présentation).

Groupe de faits "General" Ce groupe permet de décrire les caractéristiques communes aux méthodes multicritères. La Figure 3.9 présente un exemple de définition d'un fait relatif à la méthode ELECTRE TRI. Les symboles CC-1,$\cdots$, CC-4 dans cette figure renvoient aux caractéristiques communes aux méthodes multicritères (cf. Figure 3.4).

```
(deffacts method
          (Method (M-No 7)
              (Name ELECTRE-TRI)
              (CC-1 fini)
              (CC-2 tri)
              (CC-3 partiellement)
              (CC-4 a-priori)
          )
)
```

FIG. 3.9 – Définition d'un fait du groupe "General"

Groupe de faits "Discrete" Ce groupe contient les faits relatifs aux méthodes discrètes. La Figure 3.10 en donne un exemple relatif à la méthode PROMETHEE I. Les symboles CDM-

[9]JESS, *Java Expert System Shell for the Java Plateform*, est un langage de script écrit entièrement en Java de Sun Microsystem.

1,$\cdots$, CDM-8 dans cette figure renvoient aux caractéristiques des méthodes discrètes (cf. Figure 3.5).

```
(deffacts method
          (Method (M-No 9)
              (Name PROMETHEE-I)
              (CDM-1 ratio)
              (CDM-2 ponctuelles)
              (CDM-3 comparaison)
              (CDM-4 cardinale)
              (CDM-5 pouvoir-discriminatoire)
              (CDM-6 indifference)
              (CDM-7 explicite)
              (CDM-8 partielle)
          )
)
```

FIG. 3.10 – Définition d'un fait du groupe "Discrete"

Groupe de faits "Continuous" Ce groupe contient les faits relatifs aux méthodes continues. La Figure 3.11 présente un exemple relatif à la méthode STEM. Les symboles CCM-1,$\cdots$, CCM-6 renvoient aux caractéristiques des méthodes continues données dans la Figure 3.6.

```
(deffacts method
          (Method (M-No 17)
              (Name STEM)
              (CCM-1 continues)
              (CCM-2 linéaires)
              (CCM-3 progressive)
              (CCM-4 peu)
              (CCM-5 un sous ensemble)
              (CCM-6 point-de-référence)
          )
)
```

FIG. 3.11 – Définition d'un fait du groupe "Continuous"

Groupe de faits "Interactive" Ce groupe contient les faits relatifs aux méthodes interactives. La Figure 3.12 présente un exemple relatif à la méthode de Zionts et Wallenius (1976). Les symboles CIM-1,$\cdots$, CIM-11 renvoient aux caractéristiques des méthodes interactives données dans la Figure 3.7.

```
(deffacts method
          (Method (M-No 18))
              (Name Zionts-Wallenius)
              (CIM-1 recherche et apprentissage)
              (CIM-2 fonction d'utilité)
              (CIM-3 libre)
              (CIM-4 guidée par la procédure)
              (CIM-5 rigide)
              (CIM-6 oui)
              (CIM-7 beaucoup)
              (CIM-8 assez difficiles)
              (CIM-9 toujours valide)
              (CIM-10 procédure)
              (CIM-11 optimum local)
          )
)
```

FIG. 3.12 – Définition d'un fait du groupe "Interactive"

Groupe de faits "Response" Ce groupe représente un ensemble de faits reliant chaque question aux faits qui doivent être considérés pour la recherche de la méthode appropriée. La Figure 3.13 présente un exemple.

```
(deftemplate Response
          (field Question
              (type INTEGER)
              (default ?NONE
          )
          (field Answer
              (type INTEGER)
              (default 0
          )
)
```

FIG. 3.13 – Définition d'un fait du groupe "Response"

Groupe de faits "Characteristic-Question" Ce groupe est un ensemble de faits reliant chaque caractéristique à la question qui lui est associée. La Figure 3.14 présente un exemple.

```
(deftemplate Char-to-Question
          (field char
              (type SYMBOL)
              (default ?NONE
          )
          (field Question-No
              (type INTEGER)
              (default ?NONE
          )
)
```

FIG. 3.14 – Définition d'un fait du groupe "Characteristic-Question"

Groupe de faits "Question-Question" Ce groupe est un ensemble de faits reliant chaque question à la question suivante. La Figure 3.15 présente un exemple.

```
(deftemplate Next-Question
          (field Question-No
              (type INTEGER)
              (default ?NONE
          )
          (field Question-No
              (type INTEGER)
              (default ?NONE
          )
)
```

FIG. 3.15 – Définition d'un fait du groupe "Question-Question"

Groupe de faits "Fact-Class" Ce groupe est un ensemble de faits reliant chaque fait à un groupe de faits. La Figure 3.16 présente un exemple.

```
(deftemplate Fact-to-Class
          (field fact
              (type SYMBOL)
              (default ?NONE
          )
          (field Class-No
              (type INTEGER)
              (default ?NONE
          )
)
```

FIG. 3.16 – Définition d'un fait du groupe "Fact-Class"

Fait "Initialize" Ce fait permet d'initialiser le nombre de méthodes

```
(deftemplate nb-of-methods
          (slot nb-of-methods
              (type INTEGER)
              (default 0)
          )
)
```

FIG. 3.17 – Définition du fait "Initialize"

Définition des règles La correspondance entre les caractéristiques de la situation décisionnelle (i.e. celles des problèmes de décision à référence spatiale et du décideur) et celle des méthodes d'AMC est traduit sous forme d'une ensemble de règles de production. Un exemple de règle de production est le suivant :

```
(defrule rule 1
 (Method (M-No 7)
   (C-PB-1 ?tri)
   (C-PB-2 ?AFE)
   (C-PB-3 ?ensemble avec nombre réduit)
   (C-PB-4 ?explicite)
   (C-PB-5 ?surfaciques)
   (C-PB-6 ?unités spatiales)
   (C-PB-7 ?peu)
   (C-PB-8 ?beaucoup)
   (C-PB-9 ?déterministe)
   (C-PB-10 ?ordinal)
   (C-PB-11 ?régional)
   (C-PB-12 ?ponctuelle)
   (C-PB-13 ?moyen)
   (C-DM-1 ?acceptées)
   (C-DM-2 ?moyen)
   (C-DM-3 ?un seul)
   (C-DM-4 ?non disponible)
   (C-DM-5 ?assez coopératif)
   (C-DM-6 ?moyennes)
   (C-DM-7 ?bottom-up)
 => (printout outfile "ELECTRE-TRI")
)
```

FIG. 3.18 – Un exemple d'une règle de production

Nous avons également incorporé plusieurs autres règles permettant d'assister le système dans la résolution des conflits. Par exemple, la règle qui informe le décideur qu'une méthode a été trouvée est prioritaire sur toutes les autres règles. Nous donnons dans la suite de ce paragraphe un extrait de ces règles.

Règle "Get-Question" Cette règle permet d'extraire le numéro de la question et le numéro de ses réponses.

```
(defrule get-question
          (declare (salience 10))
          ?v1 <- (Question (Number ?num1))
          (test (neq ?num -1))
=>
          (retract ?v1)
          (bind ?response (quest ?num1))
          (assert (Response (Question ?num1) (Answer ?response)))
)
```

FIG. 3.19 – Règle "Get-Question"

Règle d'initialisation Cette règle permet l'initialisation des variables auxquelles on a recours pour le déclenchement des autres règles tel que le nombre des méthodes introduites dans la base des faits.

```
(defrule init
          (declare (salience 55))
=>
          (assert(nb-methodes ?nbm)) )
```

FIG. 3.20 – Règle d'initialisation

Règle de génération du résultat final Cette règle permet l'affichage de la (ou les) méthode(s) proposée(s) par le système.

```
(defrule resultatfinal
          (declare (salience 0))
          (method(nom ?m))
=>
          (printout t "Méthode proposée : ?m) )
```

FIG. 3.21 – Règle de génération du résultat final

3.7 Regard sur l'approche adoptée

Nous avons mentionné dans la section introductive de ce chapitre qu'il existe quatre approches pour traiter le problème du choix de la PAMC : (i) choix *ad hoc* ou non *assisté*, (ii) utilisation d'un arbre de classification, (iii) utilisation d'une méthode multicritère, et (iv) utilisation d'un système expert ou d'un SIAD.

La première approche est de loin la plus utilisée en pratique. Elle se base simplement sur le principe que le choix est guidé par les connaissances, souvent limitées, du décideur dans le domaine de l'analyse multicritère. Cependant, Ozernoy (1992) affirme que le problème du choix de la PAMC ne peut être résolu de manière adéquate qu'à travers une formalisation appropriée. Dans tous les cas, nous pensons que, quelque soit la formalisation adoptée, elle mènera en général à des choix plus défendables qu'une approche informelle et intuitive.
L'approche basée sur un arbre de classification vient en second lieu du point de vue utilisation. Elle se base sur le développement d'une structure hiérarchique où chaque noeud représente une question, un fait, ou une recommandation (i.e. une méthode ou un groupe de méthodes). Pour identifier une méthode, le décideur doit répondre successivement à une série de questions en allant du noeud racine jusqu'à atteindre un noeud correspondant à une recommandation. Cette approche a été adoptée par plusieurs auteurs dont Yoon et Hwang (1995) et Laaribi et *al*. (1996). Cependant, elle présente plusieurs limites (Ozernoy, 1992 ; Zanakis et *al*., 1998) : (i) elle n'est pas pratique lorsque le nombre de méthodes et/ou le nombre de critères de sélection deviennent importants ; (ii) elle ne permet pas de traiter les situations où le décideur ne peut pas répondre à la question relative à un noeud particulier ; (iii) la recommandation de cette approche n'est pas généralement une seule méthode mais plutôt un groupe de méthodes ; et (iv) les arbres de classification servent souvent comme outils d'élimination.
L'approche basée sur l'utilisation d'une méthode multicritère a été adoptée par quelques auteurs (e.g. Gershon, 1981 ; Gershon et Duckstein, 1984 ; Tecle, 1988 ; Al-Shemeri et *al*., 1997). Dans cette approche, le problème de choix est formulé comme un problème multicritère où les actions sont les différentes méthodes multicritères et les critères sont les différents facteurs de sélection. La critique principale qu'on peut adresser à cette approche est relative au choix de la méthode à utiliser pour évaluer les autres méthodes. Afin d'éviter le cercle vicieux, plusieurs auteurs (e.g. Guittoni et *al*., 1999a ; Laaribi, 2000) ont déconseillé cette approche. Guittoni et *al*., (1999a), par exemple, remarquent que l'utilisation d'une approche multicritère pour le problème de choix demandera l'évaluation des différentes méthodes multicritères (en tant qu'actions potentielles) par rapport aux critères de sélection, c'est que ne pas une tâche facile.
L'approche basée sur l'utilisation d'un système expert ou d'un SIAD est la plus récente du point de vue utilisation pratique. En réalité, il n'existe pas un consensus dans la communauté de l'analyse multicritère sur la nécessité d'un système expert. Certains chercheurs pensent qu'un tel système n'est justifié en aucun cas, étant donné que le problème du choix de la PAMC peut être résolu de manière simple par un arbre de classification. D'autres pensent que le problème de choix est assez complexe pour qu'il soit traiter par un système expert. Néanmoins, la nécessité d'un système expert pour une analyse systématique du problème de choix a été reconnue depuis la fin des années 1980 (e.g. Jelassi, 1987 ; Ozernoy, 1992 ; Quaddus, 1997 ; Poh, 1998 ; Lu et *al*., 1999, 2000).
Parmi les travaux basés sur l'utilisation d'un système expert, celui de Ozernoy (1992) semble être le plus significatif. Cependant, Ozernoy ne considère qu'une cinquantaine des méthodes discrètes. Plus récemment, Poh (1998) propose un SIAD contentant dix-sept méthodes discrètes. Quant à Lu et *al*. (1999) et Lu et *al*. (2000), ils ne considèrent qu'une dizaine de méthodes continues. Par rapport à notre travail, aucun de ces travaux n'est dédié explicitement au contexte spatial. En plus, notre solution considère aussi bien les méthodes discrètes que conti-

nues. Notons néanmoins que le principe général de tous ces travaux, y compris le notre, est le même. Les différences principales concernent les méthodes considérées et l'ordre d'application de critères de sélection.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé un modèle à base de règles pour le choix de la procédure d'agrégation à utiliser dans un problème donné. Le module est en cours d'implémentation. Nous pensons que la solution proposée dans ce chapitre permet de répondre à la troisième limite de travaux d'intégration SIG-AMC. Dans le chapitre qui suit, nous proposons une solution pour appréhender la quatrième limite relative à l'utilisation de méthodes de surclassement de synthèse dans le SIG.

Chapitre 4

Méthodologie pour la cartographie décisionnelle multicritère

Les méthodes multicritères de surclassement de synthèse sont généralement mieux adaptées à l'aspect ordinal des problèmes de décision à référence spatiale. Cependant, ces méthodes ont reçu peu d'attention dans les travaux d'intégration SIG-AMC. Ce constat s'explique essentiellement par le fait que ces méthodes sont sujettes à des "limitations informatiques" par rapport au nombre d'actions. Ce chapitre propose une approche pour générer ces actions basée sur une subdivision planaire du domaine d'étude obtenue par la combinaison d'un ensemble de cartes critères. Le résultat est un ensemble d'unités spatiales homogènes et disjointes. Ces unités sont évaluées sur une échelle de mesure ordinale et affectées, en ne tenant compte que des caractéristiques intrinsèques de chaque action, à un ensemble de catégories pré-définies en utilisant la méthode de classification multicritère ELECTRE TRI. Les actions atomiques ponctuelles, linéaires ou surfaciques seront alors construites comme une unité spatiale individuelle, une collection d'unités spatiales adjacentes linéairement ou une collection d'unités spatiales contiguës, respectivement. Ceci permet de réduire considérablement le nombre d'actions et de rendre possible l'utilisation des méthodes multicritères de surclassement de synthèse. Le chapitre propose également des solutions pour modéliser des actions composées.deux actions atomiques.

4.1 Introduction

La plupart des travaux d'intégration SIG-AMC s'orientent vers l'incorporation des méthodes multicritères du critère unique de synthèse dans les SIG (e.g. Dai et *al*., 2001 ; Araujo et Mecedo, 2002). Ces méthodes dominent encore et peu de travaux ont été réalisés (e.g. Joerin et Musy, 2000 ; Pereira, 2001 ; Martin et *al*., 2003 ; Marinoni, 2005, 2006) pour l'incorporation des méthodes multicritères de surclassement de synthèse. Pourtant, ces dernières sont plus adaptées aux problèmes de décision spatiaux (Malczewski, 1999 ; Joerin et *al*., 2001 ; Malczewski, 2004 ; Marinoni, 2006) puisqu'elles :

- permettent de considérer des critères d'évaluation qualitatifs (en plus des critères qualitatifs) pour lesquels les échelles intervalle ou ratio de préférences n'ont aucun sens.
- permettent de considérer des critères d'évaluation avec des échelles hétérogènes qui sont difficiles à coder en une seule échelle.
- minimisent les compensations entre les critères d'évaluation.
- requièrent peu d'informations de la part du décideur.

Les trois premiers points sont cités par Roy et Bouyssou (1993). Le dernier point est cité par Malczewski (1999). Joerin et Musy (2000) ajoutent que les méthodes de surclassement de synthèse sont bien adaptées aux problèmes de gestion du territoire dans lesquels les différentes alternatives d'action sont assez souvent incomparables puisque'elles sont fondamentalement très différentes. Mais l'inconvenient (d'ordre pratique et technique) majeur des méthodes de surclassement de synthèse—excepté celles consacrées aux problèmes de classement multicritère qui ne tiennent compte que des aspects intrinsèques de chaque action pour les affecter à des catégories pré-définies—est qu'elles ne sont pas adaptées aux problèmes impliquant un grand nombre (ou un nombre infini) d'actions. En effet, plusieurs auteurs (e.g. Eastman et *al.*, 1993, Pereira et Duckstein, 1993 ; Jankowski, 1995 ; Tkach et Simonovic, 1997 ; Joerin et Musy, 2000 ; Joerin et *al.*, 2001 ; Marinoni, 2005-2006) ont remarqué que ces méthodes sont peu pratiques pour les problèmes de gestion du territoire puisqu'elles sont sujettes aux problèmes de "limitations informatiques" (notre traduction du terme "computational limitations") par rapport au nombre d'actions (Marinoni, 2006). Cela est dû au fait que la majorité de ces méthodes nécessitent une comparaison par paire entre toutes les actions. Aerts et Heuvelink (2002) vont plus loin en affirmant que toutes les méthodes multicritères, aussi bien discrètes que continues, sont confrontées aux problèmes de "limitations informatiques". Nous pensons également qu'un nombre élevé d'actions est pénalisant pour toutes les méthodes multicritères mais ce problème se manifeste beaucoup plus rapidement (dès que le nombre d'actions dépasse une dizaine) avec les méthodes de surclassement de synthèse que les autres méthodes. Ce constat explique en grande partie le fait que, comparativement aux méthodes du type critère unique de synthèse, les méthodes de surclassement de synthèse ont reçu peu d'attention dans le travaux d'intégration SIG-AMC.

Dans ce chapitre, nous proposons une approche pour générer les actions potentielles basée sur une subdivision planaire, qu'on appellera *carte décisionnelle* (ou *decision map* en anglais) du domaine d'étude. La subdivision planaire est obtenue par combinaison d'un ensemble de cartes critères. Le résultat est un ensemble d'unités spatiales (des objets polygonaux) homogènes et disjointes. Ces unités sont évaluées sur une échelle de mesure ordinale et affectées à un ensemble de catégories pré-définies en utilisant la méthode de classification multicritère ELECTRE TRI. Les actions ponctuelles, linéaires ou surfaciques seront respectivement construites comme une unité spatiale individuelle, une collection d'unités spatiales adjacentes linéairement ou une collection d'unités spatiales contiguës. Ceci permettra de réduire considérablement le nombre d'actions à comparer et rendre ainsi possible l'utilisation des méthodes multicritères de surclassement de synthèse.

Les solutions proposées pour la génération des actions potentielles atomiques (i.e. ponctuelles, linéaires ou surfaciques) font usage d'algorithmes bien établis issus de la théorie de graphe.

Ces solutions sont également exploitées pour la génération d'actions composées, i.e., constituées de deux ou plusieurs actions atomiques. Notons néanmoins que les solutions proposées pour la génération des actions composées supposent que le problème de décision est décomposable en plusieurs sous-problèmes, chacun impliquera un seul type d'action.
La suite du chapitre est structurée comme suit. Dans la section 2, nous introduisons quelques relations topologiques qui sont nécessaires pour la construction des actions potentielles. Dans la section 3, nous définissons le concept de la carte décisionnelle. Dans la section 4, nous détaillons la méthodologie proposée. Deux phases seront alors distinguées : (i) une première phase dédiée à la construction d'une carte décisionnelle, et (ii) une deuxième phase destinée à l'exploitation de cette carte pour la génération des actions potentielles et pour l'évaluation multicritère. Dans les sections 5 et 6, nous présentons les solutions proposées pour la génération des actions atomiques (Section 5) et complexes (Section 6). Dans la Section 7, nous comparons notre approche à quelques travaux récents et nous introduisons quelques extensions possibles du concept de la carte décisionnelle.

4.2 Quelques relations topologiques

Nous considérons uniquement les objets ponctuels, linéaires et polygonaux de $\mathbf{R}^2$. Dans le reste du chapitre, les lettres P, L, et Q sont utilisés pour indiquer un point, une ligne et un polygone, qui sont définis comme suit :

- un *objet polygonal* (ou *surfacique*) Q est un ensemble ouvert de dimensions 2 de points de $\mathbf{R}^2$ avec un intérieur Q° simplement connexe (*simply connected interior*) (i.e. sans trou) et une frontière ∂Q simplement connexe (*simply connected boundary*).
- un *objet linéaire* L est un ensemble formé de points de dimension 1 dans $\mathbf{R}^2$ sans auto-intersection (*self-intersection*) et de deux points extrémités. La frontière ∂L de L est un ensemble contenant les deux points extrémités de la ligne et son intérieur L° est l'ensemble des autres points.
- un *objet ponctuel* P est un ensemble de dimension 0 d'un élément unique de $\mathbf{R}^2$. L'intérieur P° du point P est le point lui même et sa frontière est vide (i.e. $\partial P = \emptyset$).

Ci-dessous, le symbole γ peut représenter indifféremment un des trois types d'objets spatiaux. Dans la suite, nous proposons quelques relations topologiques qui sont nécessaires pour la construction des actions potentielles. Il existe plusieurs propositions de classification des relations topologiques spatiales (voir, e.g., Clementini et Di Felice (1995) pour une étude comparative de quelques méthodes de classification). Ces classifications sont basées sur les intersections des frontières, intérieures et extérieurs des objets spatiaux. Nous présentons quelques méthodes dans la suite de cette section.
Pullar et Egenhofer (1988) sont à l'origine de la méthode 4IM (4-Intersection Method) pour la classification des relations topologiques entre intervalles de dimension 1 dans $\mathbf{R}^1$. Dans cette méthode, la classification des relations topologiques est basée sur l'intersection des frontières, intérieurs et extérieurs de deux objets γ_1 et γ_2. En éliminant les combinaisons impossibles (e.g.

$\partial Q_1 \cap \partial Q_2 \neq \emptyset$ et $Q_1^\circ \cap Q_2^\circ = \emptyset$) et en considérant uniquement une paire des relations réciproques (e.g. $\partial Q_1 \cap \partial Q_2 \Leftrightarrow \partial Q_2 \cap \partial Q_1$), la méthode 4IM génère 37 relations distinctes et mutuellement exclusives entre les objets.
Egenhofer et Franzona (1991) proposent une extension de la méthode 4IM nommée 9IM (9-Intersection Method) en considérant, en plus des intérieurs et frontiers, les extérieures des objets spatiaux. La méthode 9IM conduit à 68 cas possibles et non-redondants. Une version récente de cette méthode est fournie dans Li (2006) où l'auteur distingue pas moins de 521 relations possibles entre différents objets spatiaux dont seulement 43 sont réalisables. Selon le même auteur, la méthode 9IM est probablement la plus utilisée dans le SIG.
Clementini et *al*. (1993) décrivent la méthode DEM (Dimension Extended Method) qui prend en compte la *dimension* des intersections. La méthode DEM conduit à 52 cas possibles et non-redondants. Clementini et *al*. (1993) introduisent également la méthode CBM (Calculus-Based Method) qui prend en compte la *dimension* des intersections. Ces auteurs fournissent des définitions formelles des cinq relations topologiques (qui sont `touch`, `in`, `cross`, `overlap`, et `disjoint`) et des opérateurs pour extraire la frontière des objets spatiaux. Ils ont également démontré que ces opérateurs sont mutuellement exclusifs et qu'ils constituent une couverture totale de toutes les relations topologiques possibles. Ces opérations sont suffisantes pour la construction des actions spatiales que nous proposons. Dans ce qui suit, nous rappelons la définition des relations topologiques établies dans la méthode CBM. Signalons auparavant que plusieurs autres méthodes sont disponibles dans la littérature (voir e.g. Randell et *al*., 1992 ; Li et Ying, 2003-2004 ; Schneider et Behr, 2005). Ici, nous avons choisi la méthode CBM d'abord pour sa simplicité et ensuite parce qu'elle est suffisante pour introduire les solutions proposées pour la génération des actions potentielles.

Définition 4.1 *La relation* `touch` *s'applique à tous les groupes excepté point/point :*

$$(\gamma_1, \texttt{touch}, \gamma_2) \Leftrightarrow (\gamma_1^\circ \cap \gamma_2^\circ = \emptyset) \wedge (\gamma_1 \cap \gamma_2 \neq \emptyset)$$

Définition 4.2 *La relation* `in` *s'applique à tous les groupes :*

$$(\gamma_1, \texttt{in}, \gamma_2) \Leftrightarrow (\gamma_1 \cap \gamma_2 = \gamma_1) \wedge (\gamma_1^\circ \cap \gamma_2^\circ \neq \emptyset)$$

Définition 4.3 *La relation* `cross` *s'applique aux groupes ligne/ligne et ligne/surface :*

$$(L_1, \texttt{cross}, L_2) \Leftrightarrow (L_1 \cap L_2 \neq \emptyset) \wedge (dim(L_1 \cap L_2) = 0)$$
$$(L, \texttt{cross}, Q) \Leftrightarrow (L \cap Q \neq \emptyset) \wedge (L \cap Q \neq L)$$

Définition 4.4 *La relation* `overlap` *s'applique aux groupes surface/surface et ligne/ligne :*

$$(\gamma_1, \texttt{overlap}, \gamma_2) \Leftrightarrow (dim(\gamma_1^\circ) = dim(\gamma_2^\circ) = dim(\gamma_1^\circ \cap \gamma_2^\circ))$$
$$\wedge(\gamma_1 \cap \gamma_2 \neq \gamma_1) \wedge (\gamma_1 \cap \gamma_2 \neq \gamma_2)$$

Définition 4.5 *La relation* `disjoint` *s'applique à tous les groupes :*

$$(\gamma_1, \texttt{disjoint}, \gamma_2) \Leftrightarrow (\gamma_1 \cap \gamma_2 = \emptyset))$$

Dans le but d'améliorer l'utilisation des relations ci-dessus, Clementini et *al*. (1993) ont défini des opérateurs capables d'extraire les frontières des objets surfaciques et linéaires. L'opérateur `b` lorsqu'il est appliqué à un objet surfacique Q, retourne la ligne circulaire de ∂Q. Les opérateurs `f` et `t`, lorsqu'ils sont appliqués à un objet linéaire L, renvoient les deux extrémités de L.

4.3 Concept de la carte décisionnelle

Dans cette section nous donnons une définition formelle du concept de la carte décisionnelle. Les différentes étapes nécessaires pour la générer seront détaillées dans la section suivante. Nous commençons par introduire quelques notations.
Soit Ψ un domaine représentant le territoire d'étude et **G**=$\{\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \cdots \mathbf{c}_m\}$ un ensemble de m cartes critères polygonales définies sur Ψ. Soit U un ensemble d'unités spatiales issue de l'intersection des cartes critères de **G**. Concrètement, U se présente comme une subdivision planaire de Ψ composée d'un ensemble d'unités spatiales homogènes et disjointes résultant de l'intersection des frontières des objets spatiaux contenus dans les différentes cartes critères.
Soit E une échelle de mesure ordinale dont les échelons définissent un ensemble de p catégories ordonnées $C_1, C_2, \cdots, C_p$. Nous notons par e_i l'évaluation de la catégorie C_i sur E. Nous supposons également que $e_i \succ e_j$, $\forall i > j$ $(i, j = 1 \cdots p)$. Soit $\Gamma_w : U \rightarrow E$ un modèle de classification multicritère qui permet d'affecter chaque unité spatiale u de U à une et une seule catégorie sur E. Nous écrivons $\Gamma_w(u) = e_i$ pour dire que l'unité spatiale u est affectée à la catégorie C_i. L'indice w associé au modèle de classification multicritère Γ_w représente l'ensemble des paramètres préférentiels nécessaires à l'application de Γ_w.
La carte obtenue par l'application de Γ_w sur U peut être décrite mathématiquement par l'ensemble $\{(u, \Gamma_w)) : u \in U\}$. Nous appelons le couple $\mathbf{M} = (U, \Gamma_w)$ carte décisionnelle. Formellement, une carte décisionnelle est définie ainsi :

Définition 4.6 *Une **carte décisionnelle** $\mathbf{M}$ est l'ensemble $\{(u, \Gamma_\omega(u)) : u \in U, \omega \in \Omega\}$, où U est un ensemble d'unités spatiales homogènes et Γ_ω est un modèle de classification multicritère défini comme suit :*

$$\begin{array}{llll} \Gamma_\omega & : & U & \rightarrow & E \\ & & u & \rightarrow & \Gamma_\omega[g_1(u), \cdots, g_m(u)] \end{array}$$

où :

- $g_j(u)$ *: est la performance de l'unité spatiale u par rapport au critère $g_j \in G$ associée à la carte critère $\mathbf{c}_j \in \mathbf{G}$ ($j = 1, \cdots, m$).*
- Ω *: est l'espace des valeurs possibles des paramètres de préférences $\tau = (\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_v)$ associés à Γ_ω. τ_i est le paramètre de préférence d'ordre i dans τ. L'ordre de ces paramètres n'a aucune importance pratique ou théorique.*
- $\omega \in \Omega$ *: une instance dans Ω représentant un vecteur des valeurs des paramètres de préférence.*

Pour qu'une crate décisionnelle $\mathbf{M}$ soit utilisable, il faut que les unités spatiales qui la composent soient disjointes et que ensemble, ces unités constituent $\mathbf{M}$. Soit $I = \{1, 2, \cdots, n\}$ l'ensemble des indices des unités spatiales qui composent $\mathbf{M}$. Alors, deux conditions doivent être vérifiées :

$$\mathbf{M} = \bigcup_{i \in I} u_i, \quad \text{et} \quad u_i^\circ \cap u_j^\circ = \emptyset, \forall i, j \in I \wedge i \neq j.$$

La première condition assure que la partition est totale. La seconde assure que les unités spatiales sont disjointes. De plus, de façon générale, on supposera que les évaluations des unités spatiales adjacentes (i.e. partageant au moins une frontière) sont distinctes, c'est à dire :

$$\partial u_i \cap \partial u_j \neq \emptyset \Leftrightarrow \Gamma_w(u_i) \neq \Gamma_w(u_j), \forall i, j \in I \quad \text{et} \quad i \neq j.$$

Il se peut que dans quelques problèmes de décision à référence spatiale, les frontières d'une ou plusieurs unités spatiales coincident avec celles d'une ou plusieurs infrastructures naturales (e.g. une rivière) ou artificielles (e.g. autoroute). Dans ce cas, le décideur peut souhaiter considérer que deux unités spatiales u_i et u_j, qui partagent une frontière commune (i.e. $\partial u_i \cap \partial u_j \neq \emptyset$)[1] et qui ont la même évaluation (i.e. $\Gamma_w(u_i) = \Gamma_w(u_j)$), comme deux unités distinctes. Intuitivement, ceci nécessite l'intervention du décideur. Ceci contredit le postulat énoncé plus haut mais peut être toléré pour une meilleure flexibilité. Dans la suite, on suppose que toutes les conditions précédentes sont vérifiées.

Par ailleurs, il est important de remarquer que les cartes critères doivent être de type polygonal. Cependant, en pratique, les données en entrée peuvent être un semi de points (*sample data points*), des cartes *raster*, de courbes de niveaux, de modèles numériques de terrain (MNT), etc. Il est nécessaire de transformer toutes les cartes non polygonales en des cartes polygonales. Par example, un semi de points peut être transformé en un TIN (*Triangulated Irregular Network*) dans lequel les triangles sont obtenus en joignant les points voisins deux à deux ou des courbes de niveaux peuvent être transformées en une carte polygonale en utilisant une *triangulation* sous contrainte de Delaunay (*Constrained Delaunay triangulation*) ou encore un MNT peut être transformé en une carte thématique (*thematic map*) par un *thematic slicing*. Pour plus de détails sur la notion de carte géographique, sa représentation mathématique et sur les opérations de transformation, nous renvoyons le lecteur intéressé aux références suivantes : Câmara et *al*. (1994), Floriani et *al*. (1999), et Chrisman (2002, chap. 9, p. 217).

Notons que la construction d'une carte décisionnelle nécessite la subdivision du domaine d'étude en unités spatiales homogènes. La description du territoire comme un ensemble de zones homogènes n'est pas nouveau en aménagement du territoire (Joerin et *al*., 2001). Dans la modélisation cartographique classique, ces zones sont souvent définies via les circonscriptions de recensement (*census tracts*) ou par les frontières administrative ou politique (voir, e.g., Can, 1992). Mais nous pensons comme dans Joerin (1998) (voir également Joerin et Musy (2000), et

[1] D'après la première condition, on sait que $u_i^\circ \cap u_j^\circ = \emptyset$. Il n'est pas donc nécessaire d'ajouter cette condition pour s'assurer que le segment en commun entre u_i et u_j est bien une frontière et ne se résulte pas d'une intersection entre les frontières de deux unités spatiales.

Joerin et *al*. (2001)) que la subdivision initiale du territoire en unités homogènes (Joerin utilise le terme "zone" au lieu d'"unité spatiale") doit tenir compte et respecter les frontières naturelles (forêt, cours d'eau) et artificielles (autoroutes, parcs, bâtiments). Nous pensons également qu'il est important d'intégrer dans la définition d'une unité homogène les aspects économique, social, fiscal, historique, environmental, etc. Ce fait est bien pris en considération dans notre carte décisionnelle et dans toutes les approches basées sur l'utilisation de l'analyse multicritère.

4.4 Méthodologie proposée

Le schéma général de la méthodologie proposée est illustré dans la Figure 4.1. Cette méthodologie est composée de deux phases. La première phase est consacrée à la construction d'une carte décisionnelle. La deuxième phase quant à elle, a pour but d'utiliser la carte décisionnelle obtenue au terme de la première phase pour la génération des actions et pour l'évaluation multicritère. Un aspect important de la méthodologie proposée est que les actions potentielles ne sont pas pré-définies mais elles sont générées sur la base de la carte décisionnelle comme on verra plus tard. Autrement, uniquement les étapes 2 et 3 de la seconde phase sont nécessaires.

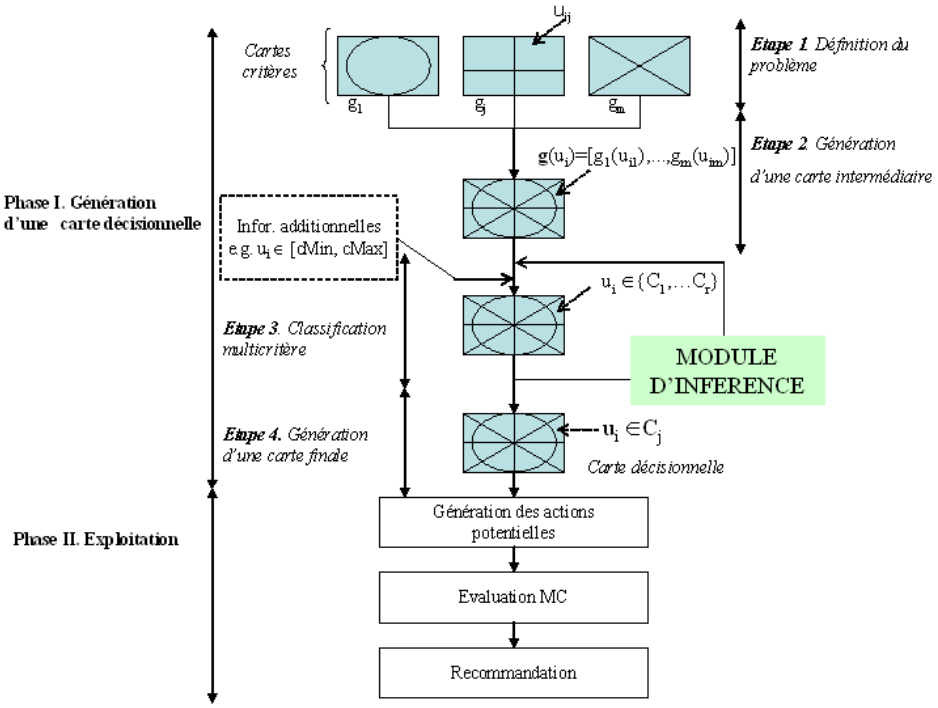


FIG. 4.1 – Schéma général de la méthodologie proposée

4.4.1 Phase I : Construction d'une carte décisionnelle

L'objectif de cette première phase est la génération d'une carte décisionnelle. Notons qu'une version initiale du concept de la carte décisionnelle ainsi qu'un exemple d'application ont été présentés dans Chakhar et *al*. (2005). Cette phase comporte quatre étapes (voir Figure 4.1) : (i) définition du problème, (ii) génération d'une carte intermédiaire, (iii) classification multicritère et (iv) groupement des unités spatiales adjacentes ayant la même évaluation. La première étape consiste en la génération de l'ensemble des cartes critères. Elle ne sera pas abordée ici puisque le problème de génération de cartes critères a été déjà abordé dans le deuxième chapitre (cf. §2.4.2). Les deuxième et quatrième étapes seront introduites dans le paragraphe suivant. La troisième étape, relative à la classification multicritère, sera mentionnée dans le paragraphe suivant mais présentée de manière détaillée dans 4.4.1.2.
Nous pouvons schématiser le processus de génération d'une carte décisionnelle par la Figure 4.2. La figure contient quelques fonctions et symboles qui ne sont pas encore définis. Ils seront introduits au fur et à mesure dans ce qui suit. Notons simplement que MAP-ALGEBRA désigne les différentes opérations de l'Algèbre des cartes utilisées ici pour la génération des cartes critères. La figure indique également les quatre étapes mentionnées au début de cette sous-section avec pour chacune l'entrée (*input*), la sortie (*output*) et la fonction/algorithme utilisé(e) pour passer de l'entrée à la sortie.

$$\Psi \xrightarrow[\substack{\textit{Étape 1 :}\\ \textit{Définition du problème}}]{\texttt{MAP}-\texttt{ALGEBRA}} \mathbf{F} \xrightarrow[\substack{\textit{Étape 2 :}\\ \textit{Génération d'une}\\ \textit{carte intermédiaire}}]{\oplus} \mathbf{I} \xrightarrow[\substack{\textit{Étape 3 :}\\ \textit{Classification multicritère}}]{\Gamma_w} \mathbf{M'} \xrightarrow[\substack{\textit{Étape 4 :}\\ \textit{Groupement}}]{\Lambda} \mathbf{M}$$

FIG. 4.2 – Représentation schématique du processus de génération d'une carte décisionnelle

4.4.1.1 Construction de la subdivision planaire

Nous avons défini au niveau du chapitre 2 (cf. §2.4.2) une *carte critère* comme une collection d'objets spatiaux : $\mathbf{c}\{(s, g(s) : s \in S\}$ avec g est la fonction critère associée avec la carte critère **c** et S est l'ensemble d'objets spatiaux composant **c**. Dans la suite on suppose que S est un ensemble de polygones que nous appelons *unités spatiales*. Rappelons que, comme nous l'avons déjà mentionné dans §4.3, les cartes non polygonales doivent être transformées en cartes polygonales en utilisant différentes opérations de transformation (cf. §4.3). Nous avons également désigné l'ensemble de cartes critères considérées dans un problème donné par **G** et l'ensemble de fonctions critères associées à ces cartes par G. Dans la suite, on suppose que la cardinalité de ces deux ensembles est m, i.e., $\mathbf{G} = \{\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \cdots \mathbf{c}_m\}$ et $G = \{g_1, g_2, \cdots, g_m\}$.
La construction d'une carte décisionnelle nécessite la superposition de l'ensemble de cartes critères de **G**. L'opération de superposition (ou *overlay*) des cartes est supportée par la plupart des SIG commerciaux. Il existe plusieurs variantes de cette opération. La variante utilisée

dans ce document est l'opération *union* que nous désignons par $\oplus$. Le résultat de cette opération est une nouvelle carte composée d'un nouvel ensemble d'unités spatiales U' qui résultent de l'intersection des frontières des objets géographiques contenus dans les différentes cartes critères :

$$\begin{array}{lcll} \oplus & : & \mathbf{F} & \rightarrow & U' \\ & & \mathbf{c}_1 \times \mathbf{c}_2 \cdots \times \mathbf{c}_m & \rightarrow & \bigvee_{i=1}^{m} S_i \end{array}$$

L'opérateur $\bigvee$ renvoi l'ensemble d'unités spatiales issues de l'intersection des frontières des objets spatiaux contenus dans $S_1, S_2, \cdots, S_m$. La Figure 4.3 présente une représentation schématique de cette opération. Nous avons associé à chacune des cartes en entrée (*carte-A* et *carte-B*) dans cette figure une table (au sens base de données rationnelle) contenant les identifients des unités spatiales (attributes *id-A* et *id-B*) et un attribut descriptif (attributes *Attr-*A et et *Att-B*). La carte de droite (*carte-C*) est le résultat de l'union de deux cartes de gauches. Il est à noter que la table associée à cette nouvelle carte contient à la fois les deux attributs *Attr-*A et et *Att-B*.

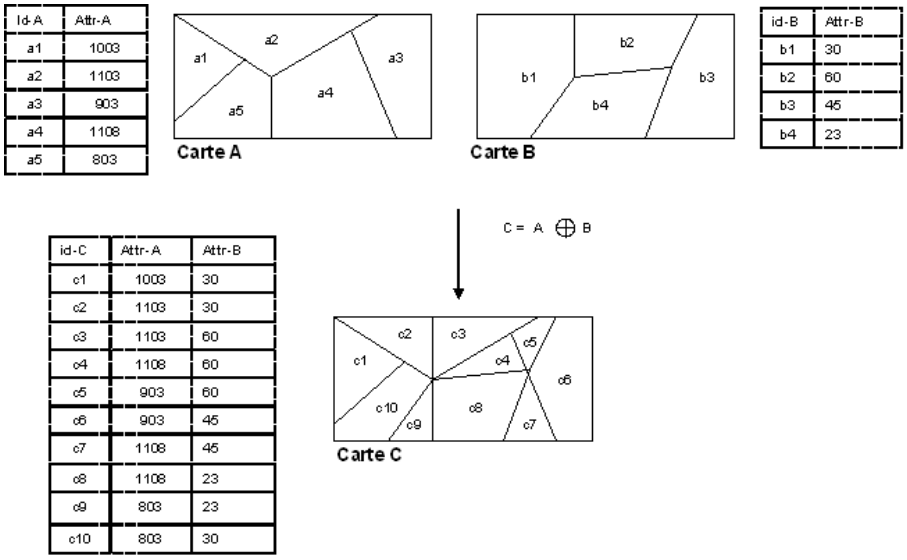


FIG. 4.3 – Représentation schématique de l'opération d'union

La carte obtenue par l'application de $\oplus$ sur **G** peut être décrite par l'ensemble $\{(u, \mathbf{g}(u))) : u \in U'\}$ avec $\mathbf{g}(u) = (g_1, g_2, \cdots, g_m)$. Ce dernier représente les évaluations de l'unité spatiale u par rapport aux critères $g_1, g_2, \cdots, g_m$ associés aux cartes critères de **G**. Nous appelons le couple $\mathbf{I} = (U', \mathbf{g})$ carte intermédiaire. Formellement, une carte intermédiaire est définie ainsi :

Définition 4.7 *Une* ***carte intermédiaire*** **I** *est l'ensemble* $\{(u, \boldsymbol{g}(u)) : u \in U'\}$ *où* $\boldsymbol{g}(u) = \{g_1(u), g_2(u), \cdots, g_m(u)\}$. *C'est-à-dire une carte où chaque unité spatiale est associée à un vecteur de* m *évaluations relatives aux* m *critères d'évaluations.*

Il faut aussi noter que l'opération de superposition peut générer des polygones "parasites" (*silver polygons*) qui doivent être éliminés. Les solutions généralement utilisées consistent soit à incorporer les polygons "parasites" aux polygones dont l'évaluation est la plus proche, soit à les incorporer aux polygones adjacents ayant la plus grande taille.
Jusqu'à présent, le processus de génération d'une carte décisionnelle est similaire à celui utilisé dans la modélisation cartographique (cf. §4.7.1). Les différences entre l'approche proposée est celle de la modélisation cartographique interviennent dès l'étape suivante et concernent essentiellement (i) la manière dont les différentes évaluations partielles sont agrégées, (ii) la définition des unités homogènes et (iii) surtout la façon dont la carte finale est utilisée. En effet, généralement la modélisation cartographique s'arrête au niveau de l'étape suivante, juste après l'opération d'agrégation, et produit une ou plusieurs *cartes de convenance* (*suitability maps*) qui sont alors utilisées comme support pour la prise de décision. D'autres différences entre les deux approches seront discutées au niveau de §4.7.1.
L'étape suivante dans le processus de génération d'une carte décisionnelle consiste à appliquer sur **I** un modèle de classification multicritère, Γ_ω, pour associer à chaque unité spatiale u dans **I** une catégorie dans E. Nous obtenons une première version de **M** que nous désignons par **M**' :

$$\begin{array}{lcccl} \mathbf{M'} & : & \mathbf{I} & \longrightarrow & E \\ & & u & \longrightarrow & \Gamma_\omega(u) \end{array}$$

Le modèle de classification multicritère Γ_ω utilisé dans le cadre de cette thèse va être décrit dans le paragraphe suivant. Remarquons que la carte **M**' peut contenir des unités spatiales adjacentes ayant la même évaluation, violant ainsi la deuxième condition mentionnée dans §4.3. Pour générer la carte décisionnelle finale **M**, il faut donc grouper, en utilisant l'algorithme GROUPING ci-dessous noté Λ dans la Figure 4.2 et dans la suite de ce chapitre, les unités spatiales "voisines" ayant la même évaluation :

$$\begin{array}{lcccl} \Lambda & : & \mathbf{M'} & \longrightarrow & E \\ & & u & \longrightarrow & \Gamma_\omega(u) \end{array}$$

```
Algorithm 1 GROUPING (Λ)
Input : M'
Output : M
u ← u_1
Z ← ∅
While ∃u ∈ I ∧ u ∉ Z
  For each s ∈ υ(u)
    If Γ_ω(s) = Γ_ω(u) Then
      u ← MERGE(u, s)
    End If
  End For
  Z ← Z ∪ {u}
End While
```

Il existe différentes façons de définir le concept de "voisinage". Dans notre cas, deux uni-

tés spatiales u_i et u_j sont considérées voisines si et seulement si elles partagent au moins un segment : $(\partial u_i \cap \partial u_j) =$ true. Ce modèle est connu sous le nom du *modèle de Rook*[2]. D'autres modèles de voisinage peuvent également être utilisés comme par exemple le *modèle de Queen* qui, par rapport à celui de *Rook*, considère également les voisins sur le diagonale ou encore le modèle de *Knight* qui considère les cellules voisines. Notons que $v(u)$ dans l'algorithme Λ renvoie à l'ensemble des "voisins" de l'unité spatiale u.
L'opérateur `MERGE` dans l'algorithme Λ est issu de l'Algèbre des cartes. Il permet de combiner deux ou plusieurs unités spatiales. Cet opérateur est disponible dans la plupart des SIG commerciaux. L'algorithme Λ s'execute en $O(n^2)$, où n est le nombre initial d'unités spatiales dans **I**. L'opérateur `MERGE` agit directement au niveau de la base de données et sa complexité n'est pas incluse dans la complexité de l'algorithme Λ.

4.4.1.2 Classification multicritère

Le modèle de classification multicritère Γ_ω utilisé dans le cadre de cette thèse est ELECTRE TRI. L'Annexe C présente une description sommaire de la méthode ELECTRE TRI. Une description détaillée de cette méthode de classification multicritère est disponible dans Yu (1992). Les niveaux de l'échelle de mesure E représentent alors les évaluations de p catégories ordonnées[3] et définies par $p-1$ profils limites. Soit $B = \{b_1, b_2, \cdots, b_{p-1}\}$ l'ensemble des indices des profils limites, b_h étant la limite supérieure de la catégorie C_h et la limite inférieure de la catégorie C_{h+1}, $h = 1, 2, \cdots, p$. Chaque profil b_h est caractérisé par :

- ses performances $g_j(b_h)$ par rapport à tous les critères,
- ses seuils de préférence $p_j(b_h)$ représentant, pour deux actions x et y, la plus petite différence compatible avec une préférence en faveur de x selon le critère g_j,
- ses seuils d'indifférence $q_j(b_h)$ représentant, pour deux actions x et y, la plus grande différence préservant une indifférence entre x et y selon le critère g_j,
- ses seuils de veto $v_j(b_h)$ représentant, pour deux actions x et y, la plus petite différence $g_j(y) - g_j(x)$ incompatible avec xSy.

La Figure 4.4 illustre la définition des catégories par des profils limites. Nous avons représenté également dans cette figure les zones d'incertitudes relatives aux seuils de préférence et d'indifférence. ELECTRE TRI nécessite également la définition d'un *seuil de coupe* (*cutting level*) $\lambda \in [0.5, 1]$ représentant la valeur minimale qui doit avoir le degré de crédibilité $\sigma(x, y)$ pour valider une situation de surclassement de x sur y.
Le vecteur des paramètres préférentiels associés à ELECTRE TRI est $\tau = (\mathbf{k}, \mathbf{q}, \mathbf{p}, \mathbf{v}, \lambda, \mathbf{B})$, tel que λ est le seuil de coupe et :

- $\mathbf{k} = (k_1, \cdots, k_m)$ est le vecteur des poids associés aux critères d'évaluation.

[2]Voir, par exemple, Goodchild (1977), Xu et Lathrop (1995), et Yu et *al*. (2003).

[3]Il existe également des modèles de classification multicritère qui n'exigent pas que les catégories soient ordonnées. Dans ce sens, Bana e Costa (1996) distingue deux situations significativement différentes de tri : les cas où l'ensemble des catégories a une structure purement *nominale* (par exemple la définition de groupes de population basée sur des caractéristiques démographiques comme l'âge, le secteur professionnel ou l'origine démographique) et les cas où le contexte décisionnel impose une structure d'*ordre* sur l'ensemble des catégories (par exemple tri d'un groupe d'étudiants entre bons et mauvais).

- $\mathbf{q} = [q_j(b_h)]$, $j \in F$, $h \in B$ sont les paramètres relatifs aux seuils d'indifférence.
- $\mathbf{p} = [p_j(b_h)]$, $j \in F$, $h \in B$ sont les paramètres relatifs aux seuils de préférence.
- $\mathbf{v} = [v_j(b_h)]$, $j \in F$, $h \in B$ sont les paramètres relatifs aux seuils de veto.
- $\mathbf{B}= (\mathbf{b_0}, \mathbf{b_1}, \cdots, \mathbf{b_p})^T$ est la matrice d'évaluation des profiles.

Notons que dans $\mathbf{B}$, $\mathbf{b_h} = (g_1(b_h), \cdots, g_n(b_h))$ et que $\mathbf{b_0}$ et $\mathbf{b_p}$ correspondent, respectivement, au *nadir* et au *point idéal*, i.e. :

$$\mathbf{b_0} = (\min_{u \in U}(g_1(u), \cdots, \min_{u \in U}(g_m(u)) \quad \text{et} \quad \mathbf{b_p}(\max_{u \in U}(g_1(u), \cdots, \max_{u \in U}(g_m(u))$$

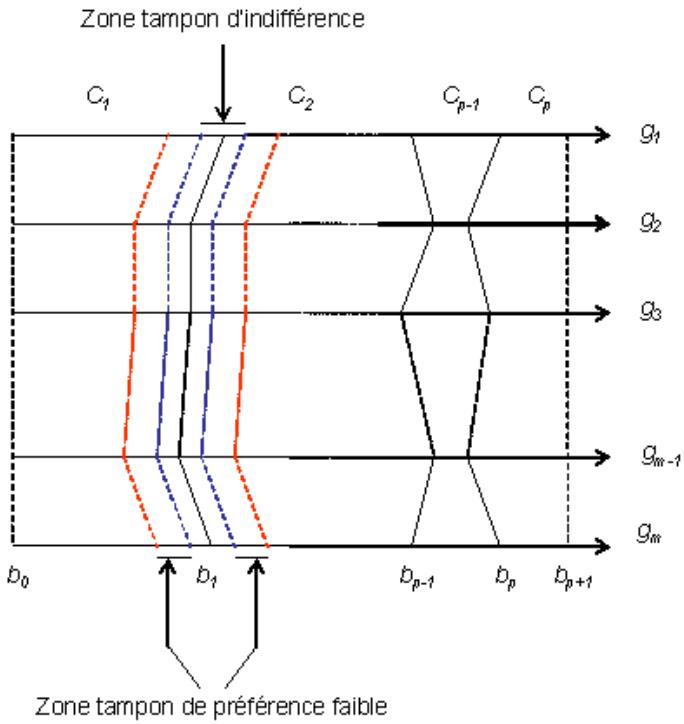


FIG. 4.4 – Définition des catégories par des profils limites

En pratique, la définition du vecteur w (représentant un jeu des paramètres de préférence—cf. 4.3) nécessite un effort cognitif important de la part du décideur. Pour réduire cet effort, une procédure d'inférence, présentée dans le paragraphe suivant, est intégrée dans le processus de génération de carte décisionnelle. Cette procédure permet d'inférer des valeurs pour w à partir d'un ensemble d'information "holistiques" fournies par le décideur.
ELECTRE TRI a deux algorithmes d'affectation : pessimiste et optimiste. L'Algorithme ASSIGNMENT correspond à la version pessimiste. C'est cette version que nous avons incorporé dans le prototype que nous allons présenter au niveau du sixième chapitre. La version optimiste est donnée en Annexe C.

```
Algorithm 2 ASSIGNMENT
Input : Carte intermédiaire I
        Paramètres des préférences w
Output : Γ_ω(u) for all u ∈ I
For each u ∈ I
  h ← p
  g(u) ← (g_1(u), ··· , g_m(u))
  assigned ← False
  While h ≥ 0  and  ¬(assigned)
    g(b_h) ← (g_1(b_h), ··· , g_m(b_h))
    w' ← (q(b_h), p(b_h), v(b_h))
    If SIGMA(g(u), g(b_h), k, w') ≥ λ Then
      Γ_ω(u) ← e_{h+1}
      assigned ← True
    End If
    h ← h − 1
  End While
End For
```

La variable booléenne `assigned` est utilisée pour éviter des boucles inutiles. L'algorithme `SIGMA`, donné en Annexe C, permet de calculer l'indice de crédibilité $\sigma(u, b_h)$ qui mesure le degré pour lequel l'unité spatial u surclasse le profil b_h : uSb_h. Pour la suite de ce chapitre, il est suffisant de savoir que `SIGMA` renvoie la valeur de $\sigma(u, b_h)$ comme indiqué précédemment et que la complexité de `SIGMA` est $O(m)$; où m est le nombre de critères d'évaluation. L'algorithme ASSIGNMENT fonctionne en $O(n \times p \times m)$; tel que n est le nombre d'unités spatiales dans **M'**, p est le nombre de profils, et m est le nombre de critères d'évaluation.
Notons enfin que d'autres algorithmes de classification multicritère peuvent également être utilisés. Citons, par exemple, les méthodes ORCLASS (Larichev et Moskhovich, 1994), PROAFTN (Belacel, 2000), MHDIS (Zoopounidis et Doumpos, 2000), UTADIS (Doumpos et Zopounidis, 2002), PROMETHEE TRI et PROMETHEE CLUSTER (Figueira et *al*., à paraître). Doumpos and Zopounidis (2002) présentent une revue de la littérature concernant les méthodes de classification et de tri multicritère.

4.4.1.3 Procédure d'inférence

Le processus de génération d'une carte décisionnelle inclut une *procédure d'inférence* (ou de *désagrégation*) permettant de déduire des paramètres préférentiels nécessaires pour appliquer ELECTRE TRI. Plusieurs passages dans ce paragraphe sont repris de Mousseau (2003).
L'idée d'inférer une certaine forme de connaissance (un modèle des préférences du décideur) à partir d'exemples de décision est typique de l'intelligence artificielle. L'induction de règles ou d'arbres de décision à partir d'exemples par apprentissage machine (e.g. Quinlan (1986)), l'acquisition de connaissance basée sur les ensembles approximatifs (e.g. Pawlak et Slowinski (1994)), le raisonnement à partir de cas (e.g. Gilboa et Schmeidler (2000)), l'apprentissage

supervisé de réseaux neuronaux (e.g. Gallant (1993)) sont des exemples typiques de cette approche. L'attrait de ce type de méthodes provient du fait que les décideurs ont plus de facilité à prendre des décisions qu'à les expliquer (Mousseau, 2003). Une difference fondamentale entre ce type de méthodes et les procédures d'inférence consiste au fait que ces méthodes considèrent deux modèles ayant la même capacité à restituer les données comme équivalents, ce qui n'est pas nécessairement le cas dans un processus d'élicitation des préférences.
Mousseau (2003) définit une procédure d'inférence comme un algorithme qui, à partir d'une information préférentiels $\mathfrak{I}$ fournie par le décideur (correspondant à ses préférences intuitives), identifie un élément $w^*(\mathfrak{I})$ qui "reproduit au mieux" $\mathfrak{I}$ par application de la procédure d'agrégation. L'information $\mathfrak{I}$ peut concerner le résultat ou bien prendre la forme de contraintes sur la valeur des paramètres préférentiels. Dans le premier cas, on parle d'*information préférentielle orientée output*. Le décideur peut spécifier une telle information en précisant, par exemple (Mousseau, 2003) :

- la manière avec laquelle se comparent deux vecteurs performances non reliées par la relation de dominance,
- un pré-ordre éventuellement partiel sur un sous-ensemble d'actions A' de A ou une affirmation du type "les actions dont la performance sur le critère g_j est inférieure à x sont peu susceptibles d'être placées en tête du classement" dans le cas de la problématique $P.\gamma$,
- l'affectation souhaitée pour certaines actions dans le cas de la problématique $P.\beta$.

Dans le second cas, on parle d'*information préférentielle orientée input*. Le décideur peut spécifier une telle information en précisant, par exemple (Mousseau, 2003) :

- une différence d'évaluation non significative sur un critère,
- une comparaison de critères (ou de coalition de critères) en terme d'importance relative,
- la valeur d'un taux de substitution entre deux critères.

Dans le cadre de cette thèse, les paramètres préférentiels sont obtenus via une certaine forme de régression sur des exemples d'affectation fournis par le décideur. Le schéma général de la procédure d'inférence est donné dans la Figure 4.5. Cette procédure à été initialement proposée dans Mousseau et Slowinski (1998) afin d'inférer les paramètres préférentiels d'ELECTRE TRI. Une description détaillée de cette procédure est donnée dans Mousseau (2005). Nous ne présentons ici que la partie relative à l'étape d'inférence proprement dite, qui se ramène, comme nous le verrons dans la suite de ce paragraphe, à l'optimisation d'un programme mathématique. Soit $U^* \subset U$ un sous-ensemble de U contenant les unités spatiales que le décideur affecte de façon intuitive à une catégorie ou un rang sur l'échelle E. Nous définissons deux ensembles $S^+ = \{(u, b_h) \in U^* \times B$: tel que le décideur affirme $uSb_h\}$ et $S^- = \{(u, b_h) \in U^* \times B$: tel que le décideur affirme $\neg(uSb_h)\}$. Nous pouvons traduire ces informations par le système suivant :

$$\begin{cases} \sigma(u, b_h) \geq \lambda, & \forall (u, b_h) \in S^+ \\ \sigma(u, b_h) < \lambda, & \forall (u, b_h) \in S^- \\ \lambda \in [0.5, 1] & \\ q_j(b_h) \leq p_j(b_h) \leq v_j(b_h), & \forall (j, h) \in F \times B \\ \sum_{j=1}^{m} w_j = 1; w_j \geq 0, & \forall j \in F \end{cases}$$

Ce système peut être exprimé à travers un programme mathématique dans lequel (Mousseau, 2003) :

- les variables de décision sont les paramètres préférentiels dont la valeur est à déterminer,
- la fonction objectif vise à minimiser une fonction erreur appréciant dans quelle mesure l'information préférentielle $\mathfrak{I}$ est restituée,
- les contraintes expriment la manière avec laquelle l'information $\mathfrak{I}$ se traduit dans la procédure d'agrégation multicritère (ELECTRE TRI ici) en termes de la valeur des paramètres préférentiels.

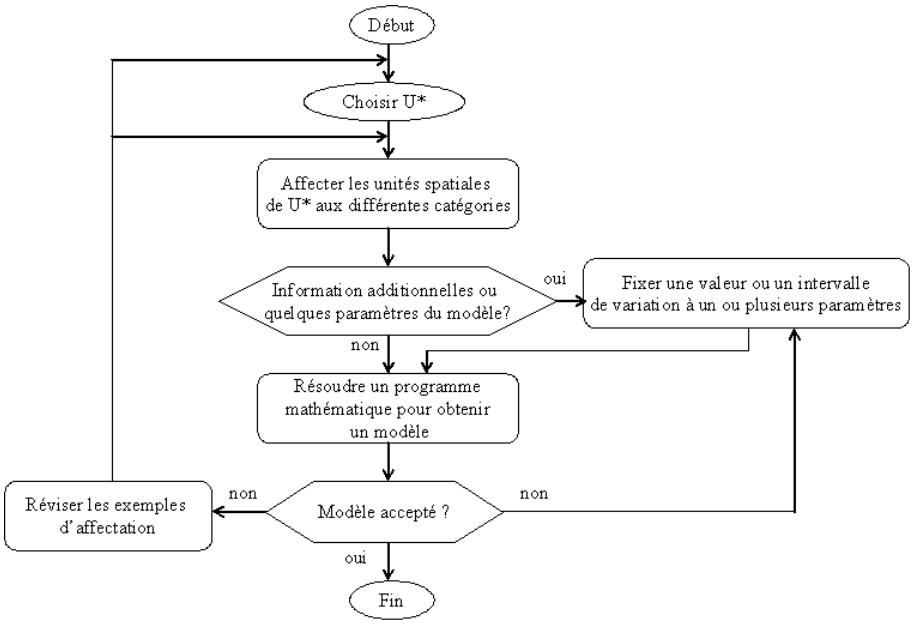


FIG. 4.5 – Schéma général de la procédure d'inférence (Mousseau, 2003)

Par exemple, le système précédent se ramène au programme mathématique suivant :

$$
\begin{array}{ll}
\texttt{Max } \alpha & \\
\texttt{s.t.} & \\
\alpha \leq S(a, b_{cMin(u_k)-1}) - \lambda, \texttt{ for all } u_k \in U^* & (1) \\
\alpha \leq \lambda - S(a, b_{cMax(u_k)}) + \epsilon, \texttt{ for all } u_k \in U^* & (2) \\
\lambda \in [0.5, 1] & (3) \\
g_j(b_{h+1}) \geq g_j(b_h) + p_j(b_{h+1}), \forall j \in F, \forall b_h \in B & (4) \\
v_j(b_h) \geq p_j(b_h) \geq q_j(b_h) \geq 0, \forall j \in F, \forall b_h \in B & (5) \\
\sum_{j=1}^{n} w_j = 1, \texttt{ for all } j \in F & (6) \\
w_j \geq \epsilon, \texttt{ for all } j \in F & (7)
\end{array}
$$

où `Max` α est la fonction d'erreur à minimiser, ϵ est une petite valeur positive, $cMin(u_k)$ est la catégorie minimale à laquelle $u_k \in U^*$ doit être affectée, et $cMax(u_k)$ est la catégorie maximale à laquelle $u_k \in U^*$ doit être affectée. À l'optimum, la valeur des paramètres préférentiels correspond à la meilleure (au sens de la fonction d'erreur) façon de restituer $\mathfrak{I}$ dans la procédure d'agrégation multicritère utilisée. Toutefois, une analyse post-optimale est utile pour identifier d'autres combinaisons de valeurs pour les paramètres préférentiels conduisant à une valeur de la fonction objectif "proche" de l'optimum.
Ce programme non-linéaire (à cause de deux premières contraintes), est difficile à résoudre en pratique. Mousseau, avec de nombreux autres chercheurs, ont proposé des strategies d'inférence dites *partielles* (cf. Mousseau (2005)) où seulement un sous-ensemble des paramètres préférentiels sont inférés, les autres paramètres restent fixes. Les programmes linéaires obtenus avec les procédures d'inférence partielle sont généralement linéaires et facile à résoudre. Pour ELECTRE TRI, trois procédures d'inférence partielle ont été proposées :

- Inférence des poids $k_j, j \in F$ et de seuil de coupe λ (Mousseau et *al.*, 2000 ; Dias et *al.*, 2002) ;
- Inférence des seuils de veto $v_j, j \in F$ (Dias et Mousseau, 2006) ;
- Inférence des limites de categories (Ngo The et Mousseau, 2002).

Le prototype que nous avons développé intègre les deux premières procédures (cf. Chap. 6).

4.4.2 Phase II. Exploitation

La phase d'exploitation comprend trois étapes (Figure 4.6) : (i) génération des actions potentielles, (ii) évaluation multicritère, et (iii) recommandation. Dans le paragraphe suivant nous présentons l'idée utilisée pour modéliser les actions potentielles. La construction proprement dite de ces actions est abordée de manière détaillée dans §4.5 et §4.6. L'étape de l'évaluation multicritère fait appels aux différentes fonctions d'évaluation multicritère (EMC) introduites au niveau du deuxième chapitre. Nous discuterons quelques points importants qui découlent de la manière dont les actions potentielles sont modélisées. La troisième étape, qui sera présentée dans §4.4.2.3, a été également abordée dans le deuxième chapitre. Nous nous contenterons ici de rappeler les différents types de recommandation possibles.

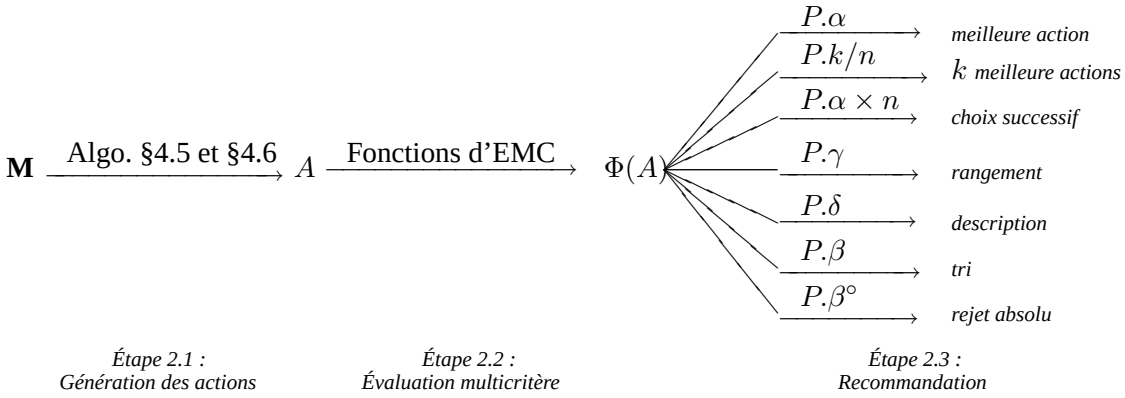


FIG. 4.6 – Représentation schématique de la phase d'exploitation

4.4.2.1 Génération des actions potentielles

La carte décisionnelle **M** générée à l'issu de la première phase constitue l'entrée de la phase d'exploitation. Au niveau du deuxième chapitre, nous avons mentionné que dans la modélisation multicritère spatiale, les actions potentielles sont généralement représentées à travers l'une des trois objets spatiaux atomiques, à savoir, point P, ligne L ou polygone Q. Dans un SIG *raster*, ces trois actions sont définies comme un pixel unique, une collection de pixels linéairement adjacents, et un ensemble de pixel contiguës, respectivement. Cette façon de modéliser peut générer un grand nombre d'actions. Cela est pénalisant essentiellement pour les méthodes multicritères de surclassement de synthèse, à l'exception de méthodes de classification. En effet, ces méthodes procèdent par comparaison par paire et atteignent ainsi rapidement leur "limitations informatiques".
Pour éviter ce problème, nous proposons dans la suite de ce paragraphe quelques solutions pour générer ces actions en se basant sur le concept de la carte décisionnelle. L'idée de base de ces solutions consiste à "émuler" les actions ponctuelles, linéaires et surfaciques par une ou plusieurs unités spatiales en respectant quelques relations spatiales (topologiques ou autres) additionnelles. Le Tableau 4.1 présente les solutions proposées pour modéliser les différentes actions potentielles. Plus spécifiquement, en utilisant le concept de la carte décisionnelle, les actions seront construites comme suit :

- *Actions ponctuelles* : chaque action est représentée par une unité spatiale individuelle,
- *Actions linéaires* : chaque action est représentée par une collection d'unités spatiales linéairement adjacentes
- *Actions surfaciques* : chaque action est représentée par une collection d'unités spatiales contiguës.
- *Action composée* : chaque action est représentée par une combinaison d'actions atomiques avec de nouvelles relations spatiales entre les différentes actions atomiques.

L'avantage principal de cette modélisation est qu'elle facilite l'utilisation des méthodes multicritères de surclassement de synthèse dans les SIG en réduisant de façon significative le

nombre d'actions potentielles à évaluer et conduit ainsi à un "ensemble d'actions manipulable" (Hall et *al*., 1992 ; Wang, 1994 ; Joerin et *al*., 2001).

Type d'action	**Exemples**	**Modélisation proposée**
Ponctuelle	Problèmes de localisation	Une unité spatiale individuelle
Linéaire	Construction d'une infrastructure linéaire (e.g. autoroute)	Une collection d'unités spatiales linéairement adjacentes
Polygonale	Problèmes d'aménagement du territoire	Une collection d'unités spatiales contiguës
Composée	Localisation-Affectation	Une action est représentée par une combinaison d'actions atomiques

TAB. 4.1 – Modélisation des actions potentielles spatiales

La modélisation des actions surfaciques comme une collection d'unités spatiales contiguës ne pose, *a priori*, aucun problème conceptuel. Mais c'est ne plus le cas lorsqu'il s'agit de la modélisation des actions ponctuelles ou linéaires. En effet, dans ces deux cas, la taille des actions générées selon les solutions proposées plus haut peut être importante en comparaison avec la taille effectivement nécessaire à implanter les actions. Par exemple, dans la même unité spatiale représentant une action ponctuelle, différentes positions géographiques peuvent être utilisées pour un problème de localisation. De façon similaire, plusieurs tracés peuvent être identifiés dans une collection d'unités spatiales linéairement adjacentes representant une action linéaire pour un problème de construction d'autoroute.
De notre point de vue, cela ne pose aucun problème conceptuel majeur puisque, généralement, dans un contexte spatial on commence d'abord par identifier des actions "grossières" et on cherche par la suite à raffiner ces actions. Par ailleurs, ce problème peut également être résolu comme suit. Initialement, le processus de génération de la carte décisionnelle est appliqué à la totalité du domaine d'étude Ψ. Ensuite, une nouvelle carte décisionnelle est générée en utilisant les meilleures unités spatiales identifiées dans la première étape. Le processus peut ainsi être répété autant de fois que nécessaire. À la fin, des unités spatiales de taille relativement petite sont produites et peuvent être utilisées pour une définition plus au moins précise des actions potentielles. Notons cependant que cette solution suppose intuitivement que l'on dispose de données de résolution meilleure que celle des données utilisées initialement.

4.4.2.2 Évaluation multicritère

Cette étape consiste à utiliser les différentes fonctions d'évaluation multicritère que nous avons identifiées au niveau du Chapitre 2 afin d'évaluer les actions potentielles générées au terme de l'étape précédente. Nous n'allons pas reprendre ces fonctions ici. Néanmoins, quelques remarques importantes méritent d'être évoquées à ce niveau. La première concerne les critères d'évaluation à utiliser dans l'étape de l'évaluation multicritère. La deuxième remarque concerne la manière dont les évaluations partielles sont établies. Concernant les critères d'évaluation, il est utile de préciser que ces critères sont normalement ceux utilisés dans la première

phase (pour la construction de la carte décisionnelle). Cependant, il est parfois utile d'inclure d'autres critères d'évaluation qui n'étaient pas utilisés lors de la construction de la carte décisionnelle. Cette facilité peut répondre à un double objectif. En premier lieu, elle offre à l'analyste/au décideur la possibilité de n'appliquer que des critères à dimension spatiale explicite (cf. §2.4.2) qui sont importants pour la construction des actions potentielles. En second lieu, elle offre au décideur/à l'analyste la possibilité de laisser les critères effectivement discriminants entre les actions à une étape ultérieure dans le processus, facilitant ainsi l'analyse de sensibilité et l'élaboration d'une recommandation.
La deuxième remarque concerne la définition des évaluations partielles qui doivent être associées aux actions potentielles de type linéaire ou polygonal. Selon la modélisation introduite précédemment, ces actions sont composées de plusieurs unités spatiales, chacune possède ses "propres" évaluations partielles qui ne s'appliquent qu'à cette unité spatiale. Ainsi, pour pouvoir comparer les différentes actions, il est nécessaire d'agréger les évaluations partielles associées aux unités spatiales composant chaque action linéaire ou polygonal pour définir des évaluions qui s'appliquent à l'action en tant qu'un tout.
Pour mieux expliquer ce problème conceptuel, considérons la Figure 4.7. D'après cette figure, chaque carte décisionnelle peut être représentée par une structure hiérarchique à trois niveaux similaire à celle adoptée dans Barrera et *al*. (1992). Le premier niveau correspond à la carte décisionnelle **M** elle même. Le deuxième niveau correspond aux groupements des unités spatiales tels qu'ils sont définis au niveau de la carte **M**'. Le dernier niveau correspond aux unités spatiales individuelles telles qu'elles sont définies au niveau de la carte décisionnelle intermédiaire **I**. Les actions potentielles sont en fait construites en utilisant les éléments du deuxième niveau alors que les évaluations partielles sont associées avec les éléments du dernier niveau.

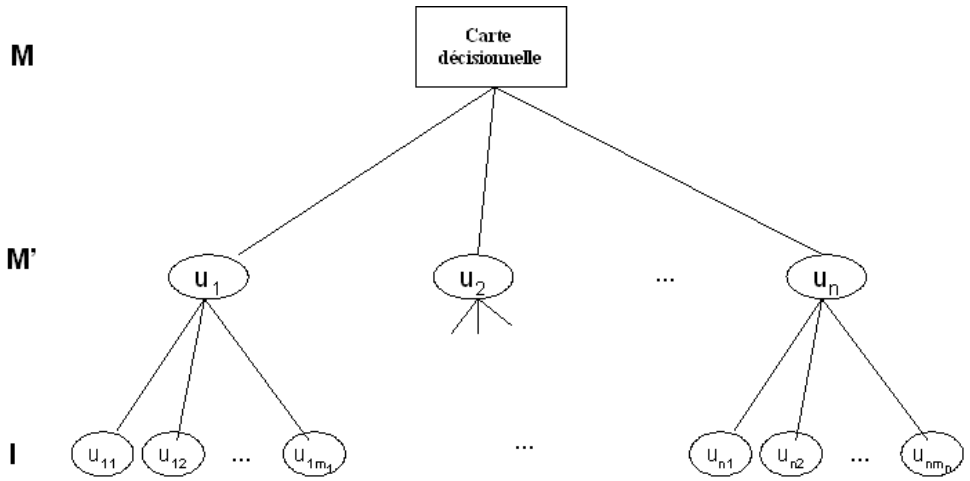


FIG. 4.7 – Représentation hiérarchique d'une carte décisionnelle

Du point de vue pratique, nous devons associer à chaque critère g_j deux mécanismes

d'agrégation Υ^j et Θ^j qui, pour une action a et un critère g_j, permettent de calculer l'évaluation partielle globale $g_j(a)$ relative à a :

$$g_j(a) = \Upsilon^j_{u'_i \in a}[g_j(u'_i)]$$

avec :

$$g_j(u'_i) = \Theta^j_{u_i \in u'_i}[g_j(u_i)]$$

Pour mieux illustrer cette double agrégation, considérons la Figure 4.8 ci-dessous. Dans cette figure, une action linéaire a est composée de 7 unités spatiales individuelles ($u_1, u_2, \cdots$, et u_7) qui sont groupées en trois unités spatiales homogènes (u_1', u_2' et u_3'). Si on suppose que pour un critère g_j donné, les deux mécanismes Υ^j et Θ^j sont, respectivement, la fonction "somme" et la fonction "moyenne", on aura alors $g_j(a) = g_j(u'_1) + g_j(u'_2) + g_j(u'_3)$ avec : $g_j(u'_1) = (g_j(u_1) + g_j(u_2))/2$, $g_j(u'_2) = g_j(u_3)$, et $g_j(u'_3) = (g_j(u_4) + g_j(u_5) + g_j(u_6) + g_j(u_7))/2$.

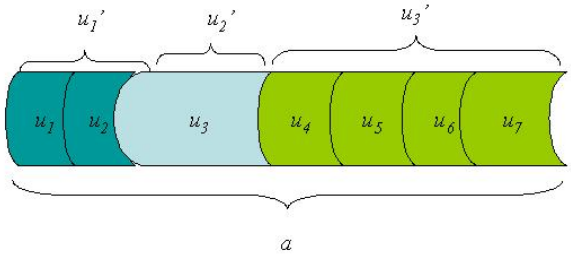


FIG. 4.8 – Illustration du problème de définition des évaluations partielles pour une action de type linéaire

Nous pouvons distinguer trois types de mécanismes d'agrégation applicables dans ce contexte (Barrera et *al.*, 1992 ; Azibi et Vanderpooteen, 2002, 2003) :

- *Mécanisme d'agrégation statistique*. Ce type de mécanismes utilise un opérateur statistique (e.g. max, min, mode, moyenne). Le principal avantage de ce mécanisme est sa compacité et sa simplicité. Il fonctionne par agrégation totale (i.e. il fournit une valeur par action et par critère).
- *Mécanismes d'agrégation fonctionnelle*. Ce type de mécanismes est basé sur l'utilisation d'une fonction et procède par agrégation totale ou partielle (e.g. somme pondérée, fonction intégrale).
- *Mécanismes d'agrégation basé sur les règles*. Ce type de mécanismes est basé sur l'utilisation de règles qui peuvent être booléennes et/ou de la forme "`SI`$\cdots$`ALORS`$\cdots$". Il s'applique aux modèles complexes d'agrégation logiques qui sont difficile à modéliser avec des mécanismes d'agrégation statistique ou fonctionnelle.

Pour calculer les valeurs des $g_j(a)$, $\forall a \in A$, $j = 1, \cdots, m$, nous pouvons utiliser l'algorithme PARTIAL-EVALUATION suivant. La complexité de cet algorithme est de $O(m \times n)$; m étant le nombre de critères et n le nombre d'unités spatiale dans **M**.

```
Algorithm 3 PARTIAL-EVALUATION
Input : a, g_j(u) (u ∈ U), Υ^j, Θ^j (j = 1, ··· , m),
Output : g_j(a) (j = 1, ··· , m)

        For each j ∈ F
          For each u' ∈ M' ∧ u' ∈ a
            g_j(u') ← Θ^j_{u∈u'}[g_j(u)]
          End For
          g_j(a) ← Υ^j_{u'∈M'∧u'∈a}[g_j(u')]
        End For
```

4.4.2.3 Recommendation

La dernière étape est celle de la recommandation. Elle a comme entrée les évaluations globales associées aux différentes actions obtenues par l'application d'une procédure d'agrégation multicritère (cf. chap. 2). Dans la Figure 4.6, $\Phi(A)$ correspond à l'application d'une PAMC Φ sur toutes les actions de A. L'objectif de cette étape consiste donc à utiliser les informations contenues dans $\Phi(A)$ afin d'aider le décideur, selon la problématique de décision retenue, à :

- sélectionner une meilleure action a^* de A ($P.\alpha$),
- sélectionner un sous ensemble A' de A dont la taille doit être la plus proche possible d'une taille k ($P.k/n$),
- sélectionner les k meilleures actions de A en appliquant une séquence de choix d'une seule action, chaque étape de choix s'inscrivant dans le cadre d'une problématique du choix ($P.\alpha \times k$),
- ranger les actions de A de la meilleure à la moins bonne ($P.\gamma$),
- affecter les actions de A à un ensemble de catégories pré-définies ($P.\beta$),
- identifer un sous-ensemble A'' de A contenant des actions à rejeter ($P.\beta°$).

Cette liste contient toutes les problématiques indiquées dans la Figure 4.6, exceptée celle de description $P.\delta$ pour laquelle le processus de décision s'arrête au niveau de la définition de $\Phi(A)$.

4.5 Solutions proposées pour la construction des actions atomiques

Dans cette section nous proposons des solutions pour la génération des actions potentielles atomiques. La génération des actions composées est abordée dans la section suivante. Il est important de noter que plusieurs de ces solutions font appels aux différents algorithmes classiques de la théorie de graphe. Une illustration de la faisabilité des solutions est donnée au

niveau du Chapitre 6 à travers l'implantation de la solution proposée pour la génération des actions linéaires.

4.5.1 Construction des actions ponctuelles

Les actions ponctuelles s'appliquent essentiellement aux problèmes de localisation. Elles peuvent être modélisées comme des unités spatiales individuelles. Théoriquement, toute unité spatiale de **M** peut servir d'action. Dans ce cas, l'ensemble des actions potentielles A s'identifie simplement à l'ensemble des unités spatiales de **M**, i.e., $A = U$. Cependant, certaines unités spatiales doivent être éliminées puisqu'elles ne peuvent servir d'actions. Par exemple, il n'est pas possible de localiser une usine dans une unité spatiale qui correspond à un lac ou dans une unité spatiale contenant déjà une infrastructure similaire à celle qu'on cherche à localiser. Il se peut également que le décideur, pour des raisons "personnelles" ou autres, souhaite éliminer certaines unités spatiales de considération. Il est important de tenir compte de ces contraintes lors de la définition de l'ensemble des actions potentielles A. Notons par $\mathfrak{E} \subset U$ l'ensemble des unités spatiales à exclure. Cet ensemble contient deux types d'unités spatiales : (i) des unités spatiales que le décideur veut éliminer et (ii) des unités spatiales qui ne peuvent servir d'actions. Une action ponctuelle p est définie comme suit :

Définition 4.8 *Une **action ponctuelle** p est une unité spatiale u tel que $u \in U' \setminus \mathfrak{E}$.*

L'ensemble des actions potentielles est alors $A = \{a_i : a_i \in U' \setminus \mathfrak{E}\}$. Concrètement, les unités spatiales de type (i) sont identifiées de manière explicite par le décideur. Celles de type (ii) peuvent être définies en se servant de la fonction de génération des actions "acceptables" que nous avons identifié au niveau du deuxième chapitre (cf. §2.4.10).
Dans la suite de ce paragraphe, nous comparons le nombre d'actions ponctuelles générées en utilisant le concept de carte décisionnelle à celui généré par une modélisation classique (i.e. en utilisant des objets géographiques ponctuels). Dans une carte *raster*, chaque pixel peut être considéré comme une action potentielle. Ainsi, avec une carte de m lignes et p colonnes, une méthode de surclassement de synthèse nécessite d'effectuée $mp(mp-1)$ comparaisons. L'utilisation d'une carte décisionnelle réduit considérablement ce nombre à $n^2(n^2-1)$ où n est le nombre d'unités spatiales dans **M** qui est généralement très petit par rapport à $m.p$, i.e. $n^2(n^2-1) \ll mp(mp-1)$. Par exemple, si on assimile une action potentielle à l'agrégation de 4 pixels, le nombre de comparaisons se réduit considérablement (un peu plus que la moitié). Ce constat reste aussi valable avec une carte vectorielle. En effet, dans ce cas chaque point de la carte est une action potentielle. Ce nombre se réduit considérablement avec une carte décisionnelle puisque chaque unité spatiale peut contenir un grand nombre d'objets ponctuels.

4.5.2 Construction des actions linéaires

Les actions linéaires sont souvent utilisées pour représenter des infrastructures linéaires comme des autoroutes, des gazoduc, etc. Elles peuvent être représentées comme une collection d'unités spatiales linéairement adjacentes. La génération de ce type d'action est plus complexe que le type ponctuel. Pour leur construction, on propose l'idée suivante. Il s'agit d'utiliser le graphe de connexité $G = (X, V)$ issu de la carte décisionnelle **M** et d'appliquer, sur ce graphe,

un algorithme classique de plus court chemin pour identifier les différentes actions potentielles. Le graphe de connexité $G = (X, V)$ est construit ainsi :

- l'ensemble de sommets X correspond aux unités spatiales du deuxième niveau, i.e., $X = U'$,
- les arcs correspondent aux relations d'adjacences entre les unités spatiales, i.e, $(x_1, x_2) \in V, x_1, x_2 \in X$ veut dire que x_1 et x_2 ont une frontière commune.

Remarquons que le graphe est planaire par construction. La procédure complète est la suivante :

```
Algorithm 4 GENERATE-LINEAR-ALTERNATIVES
Input : M'
Output : A
1. Construire le graphe de connexité G = (X,V) :
   X = {x : x ∈ U'}
   V = {(x_i, x_j) : x_i, x_j ∈ X ∧ ∂x_i ∩ ∂x_j ≠ ∅ ∧ x_i° ∩ x_j° = ∅}
2. Appliquer un algorithme de plus court chemin
   pour identifier les actions linéaires
```

Les Figures 4.9 et 4.10 représentent une carte décisionnelle et le graphe de connexité[4] qui lui est associé, respectivement. Ils ont été générés à travers le prototype développé (décrit dans Chapitre 6) en se basant sur des données réelles relatives à la région Ile-de-France (Paris et ses banlieues).
La carte décisionnelle contient 1355 unités spatiales. Pour des raisons de simplicité, les unités spatiales dans cette carte décisionnelle coincident avec les communes de la région Ile-de-France. Nous avons utilisé une échelle de quatre niveaux (colorée noir, rouge, orange et vert dans la Figure 4.9, avec la couleur verte correspondant à la meilleure évaluation et la noire à la plus mauvaise) et trois critères (surface non bâtie, densité démographique et niveau d'emploie). En pratique, le décideur peut imposer que l'action linéaire doit passer par certaines unités spatiales ou en éviter d'autres. Soit $Y_1 = \{u \in U' : (t \cap u = u) \wedge (t^\circ \cap u^\circ \neq \emptyset)\}$ l'ensemble des unités spatiales qui doivent être incluses et $Y_2 = \{u \in U' : (t \cap u = \emptyset)\}$ l'ensemble de celles qui doivent être évitées. La condition dans la définition de l'ensemble Y_1 signifie que $(u, \texttt{in}, t)$ est vraie et celle dans Y_2 veut dire que $(u, \texttt{disjoint}, t)$ est vraie. Une action linéaire t est définie comme suit :

Définition 4.9 *Une **action linéaire** t est une collection d'unités spatiales :*

$$t = \{u_1, \cdots, u_q : u_i \in U' \setminus Y_2, i = 1..q\}$$

avec :
- $\texttt{f}(t) = u_1$ *and* $\texttt{t}(t) = u_q$,
- $(\partial u_i \cap \partial u_{i+1}) \neq \emptyset \wedge u_i^\circ \cap u_{i+1}^\circ = \emptyset, \forall i = 1..q-1$,
- $t \supseteq Y_1$.

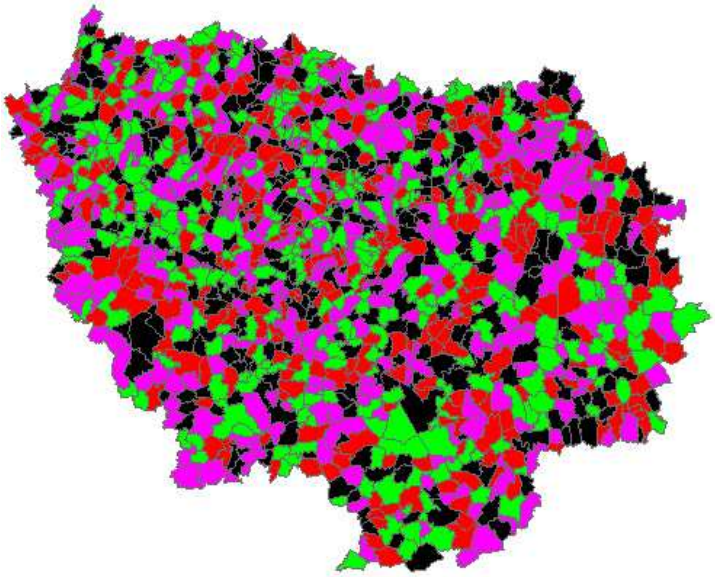


FIG. 4.9 – Exemple d'une carte décisionnelle

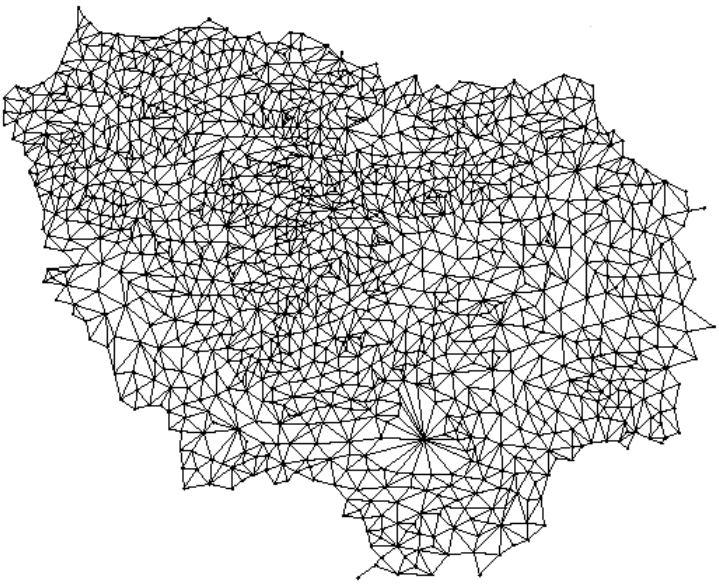


FIG. 4.10 – Graphe de connexité

[4]Notons que la procédure qui a permis de générer ce graphe à été développée par Pereira et *al*. (à paraître).

La première condition spécifie les unités spatiales représentant les deux extrémités (au sens de la théorie de graphe) de l'action linéaire. La seconde condition assure que les unités spatiales dans t sont linéairement adjacentes. La dernière condition assure que toutes les unités spatiales dans l'ensemble Y_1 sont incluses dans t.
Une action peut ainsi être définie comme un plus court chemin dans un sous-graphe $G'(U' \setminus Y_2, V')$ du graphe de connexité G et passant par $u_j, \forall u_j \in Y_1$. Différents algorithmes peuvent être appliqués pour générer ces actions. Dans le Chapitre 6, nous allons appliquer une version révisée, proposée par Gandibleux et *al.* (2006), de l'algorithme de plus court chemin multiobjectif de Martins (voir Martins (1984)) pour illustrer la solution proposée dans ce paragraphe.

4.5.3 Construction des actions polygonales

Dans plusieurs problèmes de décision à référence spatiale, les actions sont souvent représentées comme une collection d'unités spatiales contiguës. Nous les appelons actions polygonales. Dans la suite de cette sous-section, nous supposons qu'au moins deux unités spatiales sont nécessaires pour construire une action polygonale. Une action polygonale est alors définie comme suit :

Définition 4.10 *Une **action polygonale** y est une collection d'unités spatiales :*

$$y = \{u_1, \cdots, u_r : u_i \in U', i = 1..r\}$$

avec :
- $\bigsqcup_{u_i \in y} u_i = y$,
- $\forall u_i, u_j \in y$, $(u_i^\circ \cap u_j)^\circ = \emptyset$.

La première condition assure que y ne contient pas des trous. La deuxième condition assure la contiguïté de y. Pour générer ce type d'actions, nous proposons l'idée suivante. Introduisons d'abord quelques notations.
Soit **M** une carte décisionnelle et $E = (e_1, e_2, \cdots, e_k)$ une échelle ordinale associée avec **M**. Désignons par T^α l'ensemble des unités spatiales dont l'évaluation globale est égale à α avec $\alpha = 1 \cdots k$:

$$T^\alpha = \{u_i \in U' : \Gamma_w(u_i) = \alpha\}.$$

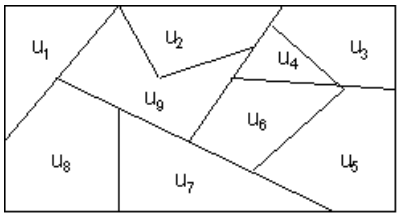
Et désignons par T_i^α l'ensemble des unités spatiales qui sont contiguës à u_i et ayant la meilleure évaluation strictement inférieur à α :

$$T_i^\alpha = \{u_j \in U' : \partial u_i \cap \partial u_j \neq \emptyset \wedge \Gamma_w(u_j) = \max_{l \in E \wedge l < \alpha} l\}.$$

Ensuite, on construit une arborescence T en associant à chaque unité spatiale u_i dans T^α les unités spatiales dans T_i^α comme enfants. Précisons que si la cardinalité de T^k est supérieure à 1 (i.e. $|T^k| > 1$), il est nécessaire d'ajouter un sommet r hypothétique ayant comme enfants les unités spatiales contenues dans T^k. La Figure 4.11 présente une représentation schématique d'une carte décisionnelle et l'arborescence qui lui est associée.

Par la suite, une action polygonale y peut être construite comme une collection d'unités spatiales dans un plus court chemin qui commence en un sommet issu de T^k (ou le sommet r si $|T^k| > 1$) et continue jusqu'à la verification de certaines contraintes (e.g. une condition qui limite la surface totale des unités spatiales dans le chemin entre deux valeurs). La procédure complète est la suivante :

```
Algorithm 5 GENERATE-AREAL-ALTERNATIVES
Input : M
Output : A
1. Construire T^α,  α = 1 ··· k
2. Construire T_i^α,  ∀u_i ∈ T^α,  α = 1 ··· k
3. Construire l'arborescence T comme expliqué plus haut
4. Appliquer un un algorithme sur T pour identifer
   les actions polygonales
```



u_i	$\Gamma_w(u_i)$
u_1	e5
u_2	e5
u_3	e3
u_4	e2
u_6	e5
u_5	e3
u_7	e2
u_8	e1
u_9	e4

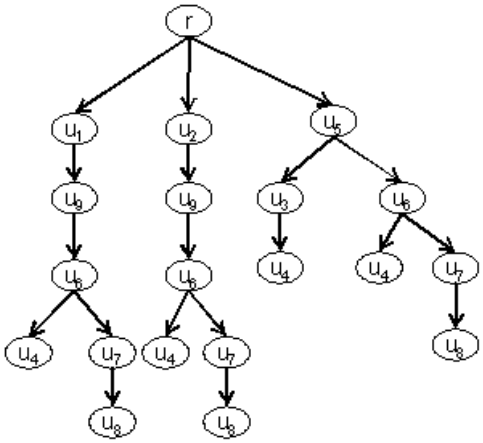


FIG. 4.11 – Représentation schématique de l'arborescence T

Cette solution peut générer des actions dominées (cf. Chapitre 2) qui doivent être éliminées. Soit $y = \{s_1, s_2, \cdots, s_z\}$ et $y' = \{s'_1, s'_2, \cdots, s'_x\}$ deux actions polygonales définies comme un chemin élémentaire dans T avec $s_1, s'_1 \in T^k$. Alors y domine y', notée $y \Delta y'$, si et seulement si y' est totalement incluse dans y, i.e. :

$$s_i \in y' \Rightarrow s_i \in y, \forall s_i \in y'.$$

La définition d'une action polygonale comme un chemin élémentaire dans T peut éventuellement générer des actions qui se chevauchent spatialement puisque la même unité spatiale peut

être un enfant de plusieurs unités spatiales (e.g. l'unité u_9 dans la Figure 4.11 est enfant de u_1 et de u_2). Cette situation se présente lorsque cette unité est adjacente à plusieurs autres unités spatiales d'évaluation strictement supérieure à celle de l'unité en question. Cependant, il est parfois nécessaire de construire des actions totalement disjointes comme par exemple dans un problème de zonage. Dans ce cas, nous pouvons utiliser le graphe de connexité et appliquer un algorithme de partionnement de graphe. Le résultat est un ensemble des zones disjointes : $Z = \{Z_1, Z_2, \cdots, Z_s\}$ avec $Z_i \bigcap Z_j = \emptyset \forall i \neq j$ et $\bigcup_i Z_i = U$. La Figure 4.12 en présente un exemple[5]. D'autres algorithmes peuvent également être utilisés comme par example un algorithme de recherche d'*arbre couvrant* (*spanning tree*).
Notons enfin que dans les problèmes d'utilisation du territoire (ou sol) (*land-use* problems) où l'on cherche à définir des cartes de convenances (*suitability maps*), sont des cas particuliers d'actions polygonales. Dans ce cas, il faut simplement générer plusieurs cartes décisionnelles, chacune est associée à une utilisation du territoire.

FIG. 4.12 – Solution d'un problème de zonage

4.6 Construction des actions composées

Plusieurs applications réelles exigent à ce que les actions potentielles soient représentées par la combinaison de deux ou plusieurs actions atomiques (Malczewski, 1999 ; Chakhar et Mousseau, 2004). C'est le cas, par exemple, dans un problème de localisation-affectation d'écoles où les actions peuvent être modélisées comme une combinaison d'objets ponctuels

[5]Cet exemple est titré de Pereira et *al*. (à paraître).

et d'objets polygonaux tel que : (i) les points représentent les localisations géographiques des écoles, et (ii) les polygons représentent les zones desservies par les différentes écoles. C'est également le cas lorsque un ensemble d'actions composées de type "point-point" sont utilisées pour modéliser les chemins potentiels dans un problème de plus court chemin. Plusieurs autres exemples de problèmes spatiaux impliquant des actions composées sont donnés dans Malczewski (1999) et Chakhar et Mousseau (2004).
La suite de cette section propose une solution, introduite dans Chakhar et Mousseau (2004), pour modéliser des problèmes spatiaux impliquant des actions composées de deux actions atomiques. L'idée de base est la suivante : chaque problème est décomposé en une série de sous-problèmes dont chacun implique un seul type d'actions atomiques. Considérons par exemple que le problème initial évoque des actions constituées de deux actions atomiques γ_1 et γ_2. Supposons également que les deux actions doivent vérifier un certain nombre des relations spatiales que nous désignons par R. Ce problème peut être résolu comme suit (voir Figure 4.13) : (i) on commence dans une première étape par générer les actions de type γ_1, et (ii) dans une second étape, on génère les actions de type γ_2 tout en prenant en consideration les relations spatiales dans R. Les relations spatiales dans R peuvent être topologique (e.g. $(\gamma_1, \texttt{disjoint}, \gamma_2) =$ true), métrique (e.g. $\texttt{distance}(\gamma_1, \gamma_2)$ est inférieur à une certaine valeur) ou/et directionnelle (e.g. γ_1 est à gauche de γ_2).

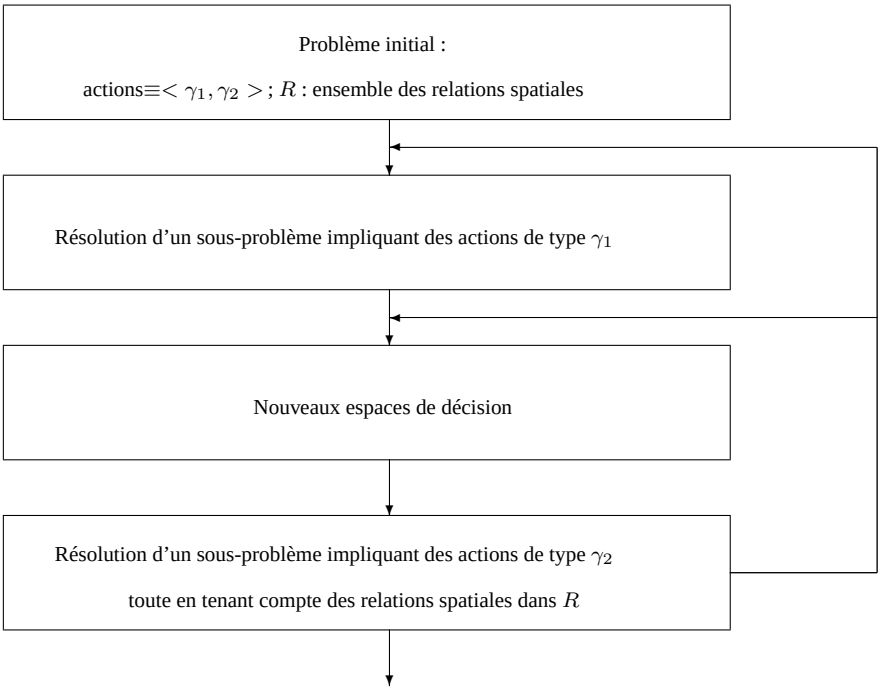


FIG. 4.13 – Modélisation des problèmes spatiaux impliquant des actions composées

Pour mieux illustrer cette idée, considérons le problème de localisation-affectation illustré par la Figure 4.14. Dans cet exemple, on cherche à localiser n points de service dans une region

donnée. Initialement, les actions sont de type "point-polygon" où les points représentent les positions géographiques pour localiser les différents points service et les polygones sont les zones à servir. Ce problème peut être décomposé en deux sous-problèmes comme suit. Le premier sous problème est un problème de partionnement, qui cherche à subdiviser la région d'étude en de zones homogènes. Chacune de ces zones représente une action polygonale et nous pouvons donc appliquer la solution proposée dans §4.5.3. La résolution de ce premier problème permet de définir les espaces des solutions possibles pour n sous-problèmes de localisation. Ces n sous-problèmes correspondent à n problèmes impliquant des actions ponctuelles et peuvent donc être résolus en appliquant la solution proposée dans §4.5.1. Dans cet exemple, R peut, par exemple, contenir une relation spatiale d'appartenance (donc une relation topologique), i.e., chaque point service doit appartenir à une et une seule zone.

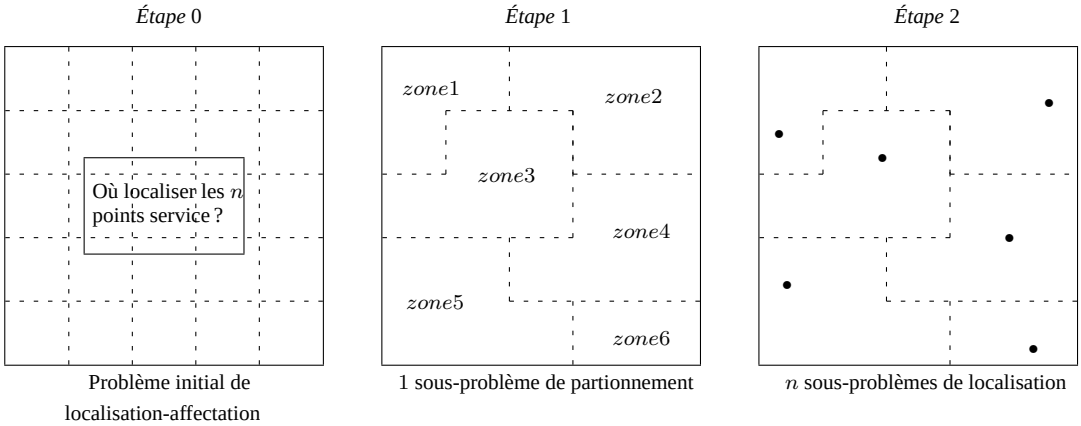


FIG. 4.14 – Représentation schématique du problème de localisation-affectation

Dans cet exemple, nous avons fait recours aux solutions proposées dans la section précédente. Cette idée peut être généralisée aux différentes combinaisons d'actions atomiques. Dans le Tableau 4.2, nous avons indiqué les schémas généraux des algorithmes qui peuvent être utilisés pour résoudre des problèmes spatiaux impliquant des actions composées de deux actions atomiques. Dans ce tableau, les symboles P et P' ; L et L' ; et Q et Q' dénotent des actions ponctuelles, linéaires et polygonales, respectivement. Le symbole t denote une action linéaire. Ces algorithmes utilisent les solutions développées dans §4.5 avec quelques relations topologiques. Remarquons enfin que dans un problème donné impliquant deux types d'actions, soit par exemple γ_1 et γ_2, nous pouvons commencer soit par générer γ_1 et puis générer γ_2, soit l'inverse. Notons simplement que le fait de commencer par générer les actions de type γ_1 contraindra les espaces des solutions pour les actions de type γ_2.
Les algorithmes du Tableau 4.2 sont immédiats (*straightforward*). Considérons par exemple le cas P/P'. Ce type d'actions correspond, par exemple, à un problème de génération des actions linéaires et peuvent donc être résolu en utilisant l'idée proposée dans §4.5.1 avec la condition supplémentaire `f`(t)=P et `t`(t)=P' (ou l'inverse). Le cas Q/Q' implique deux actions de types polygonales et peut correspondre par exemple à un problème de localisation multiple. Ici, on

applique les solutions proposées dans §4.5.3 avec une relation topologique assurant que les actions polygonales sont disjointes. Enfin, le cas Q/P' peut correspondre au problème de partionnement évoqué plus haut.
Pour terminer cette section, nous mentionnons que les solutions proposées dans le Tableau 4.2 s'appliquent aux problèmes impliquant deux actions atomiques. L'extension à plus de deux actions n'est pas abordée dans le cadre de cette thèse mais elle est plus au moins immédiate. Notons également que ces solutions ne s'appliquent que lorsque le problème de décision est décomposable en plusieurs sous-problèmes, chacun impliquera un seul type d'actions.

	P'	L'	Q'
P	Trouver t comme dans §4.5.2 avec, e.g., `f`(t)=P et `t`(t)=P'	Trouver L' comme dans §4.5.2 avec, e.g., $P \in Y$	Trouver Q' comme dans §4.5.3 avec, e.g., $(P, in, Q') = true$
L	Trouver P' comme dans §4.5.1 avec, e.g., (P', in, L) =true	Trouver L et L' comme dans §4.5.2 avec, e.g., $L \cap L' \neq \emptyset$, `f`(L)=`t`(L')	Trouver L et Q' comme dans §4.5.2 et §4.5.3 avec, e.g., $L \cap Q' \neq \emptyset$
Q	Trouver Q et P' comme dans §4.5.3 et §4.5.1 avec, e.g., $\mathbf{M} = Q$	Trouver Q et L' comme dans §4.5.3 et §4.5.2 avec, e.g., $(L', \texttt{cross}, Q)$ = true	Trouver Q et Q' comme dans §4.5.3 avec, e.g., $(Q, \texttt{overlap}, Q')$ = false

TAB. 4.2 – Algorithmes pour la génération des actions composées.

4.7 Regard sur la méthodologie proposée

Dans cette section, nous comparons d'abord la méthodologie proposée à la modélisation cartographique classique. Ensuite nous la comparons à quelques travaux similaires récents. Nous évoquons également quelques extensions possibles du concept de la carte décisionnelle.

4.7.1 Cartographie décisionnelle *vs* modélisation cartographique

Globalement, la *modélisation cartographique* (*cartographic modeling*) implique une suite ordonnée d'opérations élémentaires du SIG sur des cartes géographiques agissant sur des données "brutes" ainsi que sur des données dérivées, afin de stimuler un processus de modélisation spatiale (Tomlin, 1990 ; Steiner, 1991 ; Berry, 1993 ; DeMers, 1997 ; Malczewski, 1999). La modélisation cartographique a été développée essentiellement dans le cadre des problèmes d'aménagement du territoire et dans des applications qui nécessitent une analyse intégrée de plusieurs facteurs géographiques dispersées spatialement (Tomlin, 1990). Elle était appliquée dans plusieurs domaines d'étude de convenance et d'analyse du territoire : la définition de convenance/habitations pour des espèces animales ou végétales (Periera et Duckstein, 1993 ; Store et Kangas, 2001), convenance géologique (Bonham-Carter, 1994), convenance du territoire pour des activités agricoles (Cambell et *al.*, 1992 ; Kalogirou, 2002), évaluation et planification des paysages (Miller et *al.*, 1998), planification environnementale (Moreno et Seigel,

1988), la localisation (Eastman et *al*., 1993 ; Church, 2002), et la planification régionale (Janssen et Rietveld, 1990). Malczewski (2004) présente une revue de la littérature sur les applications du SIG dans la gestion et la planification du territoire.

La modélisation cartographique se base essentiellement sur la technique d'*overlay*. Cette technique occupe une place centrale dans plusieurs applications du SIG (O'Sullivian et Unwin, 2003 ; Malczewski, 2004). De ce point de vue, la modélisation cartographique est souvent perçue comme une automatisation d'une approche manuelle proposée et utilisée par Ian L. McHarg de l'Université de Pennsylvania aux États-Unies dans les années soixante (voir McHarg, 1969 et aussi McHarg, 1992-1998)[6]. L'idée de McHarg[7] consiste à superposer un ensemble de transparents, chacun représentant un facteur spécifique (e.g. pente, vulnérabilité à l'érosion, etc.) lié au problème en question. Les transparents sont colorés selon leur convenance aux objectifs du décideur tel que, par exemple, une couleur foncée corresponde à une bonne convenance et lorsque ces transparents sont superposés, les zones les mieux appropriées sont révélées par la couleur la plus dense.

La technologie SIG a permis d'automatiser cette approche et les transparent-cartes sont remplacés par des couches d'information "numérisées". Le SIG a permis également d'utiliser d'autres opérateurs d'agrégation que la technique d'agrégation ordinale utilisée par McHarg. Hopkins (1977) fournit une excellente revue de la littérature sur les méthodes utilisées initialement dans les SIG pour supporter la modélisation cartographique[8]. Malczewski (2004) propose une revue de la littérature plus récente focalisée sur l'utilisation du SIG dans la gestion et l'aménagement du territoire. Il présente, entre autres, des approches récentes qui utilisent le même principe que celui proposé par McHarg.

De point de vue multicritère, ce n'est que vers la fin des années 1980 que des techniques plus sophistiquées issues de l'analyse multicritère ont été utilisées pour la modélisation cartographique. Cependant, la plupart des travaux s'orientent vers l'utilisation des méthodes du critère unique de synthèse, essentiellement dans des SIG raster (e.g. Carver, 1991 ; Jankowski, 1995). Ces techniques dominent encore dans la modélisation cartographique multicritère et relativement peu de travaux issus de l'approche de surclassement de synthèse ont été proposés comparativement aux méthodes issues de l'approche critère unique de synthèse (e.g. Joerin et Musy, 2001 ; Joerin et al., 2001 ; Martin et *al*., 2003 ; Marinoni, 2005-2006).

Par ailleurs, la modélisation cartographique classique peut être schématisée par la Figure 4.15. Nous remarquons bien que les deux premières étapes sont identiques à celles utilisées dans la

[6]D'après Malczewski (2004), malgré le fait que l'approche de McHarg est largement reconnue comme un précurseur des procédures classiques d'*overlay* dans les SIG, quelques chercheurs créditent plutôt Charles Eliot (McHrag, 1996 ; Miller et *al*., 1998) et Jacqueline Tywhitt (Steinitz et *al*., 1976) comme précurseurs des techniques modernes d'*overlay*. Tomlinson (1999), quant à lui, suggère que son entreprise, Spartan Air Services of Ottawa, qui a "informatiser" en 1962 la méthode d'*overlay* (Waters, 2002).

[7]McHarg décrit sa méthode comme suit "In essence, the method consists of identifying the area of concern as consisting of certain processes, in land, water, and air—which represent values. These can be ranked - the most valuable land and the last, the most valuable water resources and the last, the most and least productive agricultural land, the richest wildlife habitats and those with no value, the areas of great or little scenic beauty, historic buildings and their absence, an so on." (McHarg, 1992, p. 34).

[8]Nous citons à titre d'exemples les méthodes suivantes : la méthode Gestalt où les régions homogènes sont identifiées directement par des observations sur le champ, la méthode de combinaison des facteurs (*factor combination method*), la méthode de *cluster analysis*, la méthode de combinaison par règles, la méthode de combinaison hiérarchique. Toutes ces méthodes sont décrites dans Hopkins (1977).

méthodologie proposée. En effet, dans les deux cas on commence par (i) définir le problème (i.e. par la génération des cartes critères) et par (ii) appliquer l'opération d'*overlay* sur ces cartes. Cependant, dans la modélisation classique l'agrégation finale s'effectue au niveau de cette deuxième étape. Avec notre approche, au terme de ces deux étapes on obtient une carte intermédiaire dans laquelle chaque unité spatiale est associée à un vecteur des valeurs relatives aux différentes cartes critères (et non pas une valeur unique comme pour le cas de la modélisation cartographique classique). D'autre part, notre approche contient deux autres étapes dédiées à la classification multicritère et au regroupement des unités spatiales homogènes et adjacentes. La troisième étape permet d'appliquer un modèle de classification multicritère offrant la possibilité d'inclure des aspects à la fois objectifs et subjectifs. Autre différence importante avec la modélisation cartographique classique qui est relative à l'utilisation faite de la carte obtenue à la fin du processus. Dans le cas de la modélisation cartographique, le résultat est une carte de convenance (*suitability map*) utilisée essentiellement pour la gestion et l'aménagement du territoire. La carte décisionnelle obtenue dans notre approche est la base pour la construction des actions potentielles et pour l'évaluation multicritère.

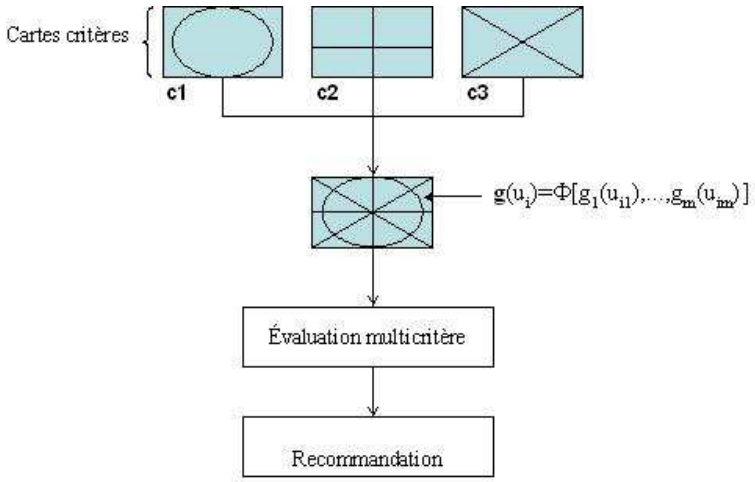


FIG. 4.15 – Modélisation cartographique classique

Sur la base de cette discussion, nous pensons que l'approche proposée se distingue par rapport à la modélisation cartographie classique sur plusieurs aspects :

- La modélisation cartographique est une procédure essentiellement automatique où l'interaction avec le décideur est généralement limitée. La méthodologie proposée est largement contrôlée par le décideur.
- Les cartes produites par la modélisation cartographique sont essentiellement destinées à la présentation. Le concept de la carte décisionnelle intégré dans l'approche proposée est destiné essentiellement à la prise de décision. En plus, ce concept est un outil générique qui peut servir à la présentation, à la génération des actions potentielles et peut être étendu pour supporter l'aide à la décision de groupe comme nous allons voir dans la suite de cette section.

- Dans la méthodologie proposée, la classification des entités spatiales en unités homogènes se base sur des aspects à la fois subjectifs et objectifs alors qu'elle est plutôt basée sur les attributs de ces entités dans le cadre de la modélisation cartographique.
- La carte décisionnelle permet d'intégrer de manière explicite la dimension spatiale des préférences du décideur. Dans la modélisation classique, ces préférences sont souvent réduites à des représentations tabulaires, sans relation explicite avec leur localisation géographique et dans le meilleur des cas, ces préférences prennent la forme d'un ensemble de poids associés aux différentes cartes facteurs.
- L'agrégation est effectuée très tôt dans la modélisation cartographique, qui peut mener à une perte substantielle de l'information préférentielle. Dans notre approche, l'agrégation est effectuée dans les étapes avancées du processus de décision.
- À part quelques travaux (nous en citons quelques uns dans la sous-section qui suit), la majorité des autres travaux utilisent des opérateurs d'agrégation de type somme pondérée ou d'agrégation multicritère issus de l'approche du critère unique de synthèse. Dans notre approche, l'agrégation est basée sur des méthodes multicritères provenant de l'approche de surclassement de synthèse qui sont plus appropriées au contexte spatial comme nous avons mentionné à maintes reprise dans ce chapitre et dans les chapitres précédents.

4.7.2 Comparaison avec d'autres travaux

Nous présentons dans ce paragraphe quelques travaux récents. Parmi ces travaux, seulement deux ont été conduits dans le même objectif que le notre, à savoir celui de faciliter l'utilisation des méthodes de surclassement de synthèse dans les SIG.
Hall et *al*. (1992) et Wang (1994) se basent sur la technique d'*overlay* pour définir des zones homogènes, mais ils utilisent des techniques de classification afin d'estimer le niveau de convenance aux différents types d'agriculture. Hall et *al*. (1992) ont exploré la classification basée sur la logique booléenne classique et sur la logique floue. Ils ont conclu que la classification basée sur la logique floue est plus appropriée puisque les frontières des zones ne peuvent pas être définies de manière exacte. Wang (1994) a utilisé la classification par des réseaux de neurones artificielles (*artificial neural networks*). Ces deux travaux diffèrent du notre dans le sens où leur objectif dans la subdivision du territoire en différentes zones homogènes n'était pas pour appliquer des méthodes multicritères, c'est que l'est déjà une limite à ces travaux.
Le travail reporté dans Jorein et Musy (2000) et Jorein et *al*. (2001) et qui est issu de la thèse de Joerin (Joerin, 1998) est conduit dans le but de faciliter l'utilisation des méthodes de surclassement de synthèse dans les SIG. Dans ce travail, les auteurs utilisent un *indice d'homogénéité* qui permet de calculer la similarité entre chaque élément du territoire (i.e. pixel) et les caractéristiques moyennes de la zone afin de subdiviser le domaine d'étude en des zones homogènes. Pour calculer le *degré de similarité*, les auteurs utilisent une fonction proposée par Slowinski et Stefanowski (1994) et qui est basée sur la théorie des ensembles approximatifs (*rough set theory*). Notons au passage que cette fonction se base sur des notions très similaires à celles utilisées dans ELECTRE TRI. Les zones homogènes générées représentent les actions potentielles qui sont alors classées, par ELECTRE TRI, dans trois categories de convenance : favorable, incertaine et non favorable. Comme nous l'avons mentionné plus haut, la subdivision

de la région d'étude en zones homogènes permet de réduire le nombre d'actions potentielles à évaluer mais présentent deux limites importantes (Joerin et *al*., 2001) : (i) les cartes obtenues sont très sensibles à la division spatiale utilisée ; et (ii) puisque le nombre de zones est limité, la description du territoire devient plus au moins floue, engendrant une perte substantielle d'information. Néanmoins, Joerin et *al*. (2001) remarquent que ce dilemme est "résolu" lorsque une zone homogène est vue à la fois comme faisant partie de l'espace physique et comme une solution particulière du problème. Nous adhérons complètement à cette dernière remarque qui reste tout à fait valable dans la méthodologie proposée.
Aerts et Heuvelink (2002) affirment que toutes les méthodes multicritères (discrètes et continues) sont sujettes au problème des "limitations informatiques". Pour "contourner" ce problème, les auteurs ont utilisé la technique de *recruit simulé* (*simulated annealing*) afin de réduire le nombre d'actions à évaluer. Les auteurs ont appliqué leur approche à un problème de restoration d'une zone minière dans la région de Galicia en Espagne. Nous pensons que le fait que ce travail ainsi que celui de Hall et *al*. (1992) et Wang (1994) présentés au début de ce paragraphe, ne prennent pas en compte les aspects multicritères lors de la classification du territoire en zones homogènes, constitue une distinction importante par rapport à notre approche ainsi qu'à l'approche de Joerin présentée plus haut et celle de Marinoni (2005, 2006) discutée dans la suite de cette sous-section.
Marinoni (2005) discute l'intégration de la méthode multicritère PROMETHEE dans le SIG qui, selon lui, est plus attractive que les autres méthodes de type surclassement de synthèse (comme les méthodes de la famille ELECTRE) par sa simplicité "mathématique" et par sa transparence pour les décideurs. Dans ce papier, les actions prennent la forme de zones régulières ou irrégulières de pixels. Deux versions de PROMETHEE (une version standard et une version stochastique) ont été incorporées dans ArcGIS d'ESRI et utilisées dans un problème du choix d'une parcelle pour la construction des habitations.
Dans un autre papier, (Marinoni, 2006), Marinoni commence par discuter le problème des "limitions informatiques" des méthodes de surclassement de synthèse. Il propose également une approche itérative basée sur une variation spatiale dans la géométrie (forme) des regions. Les zones homogènes sont alors définies comme une agrégation spatiale des pixels basée sur une relation de voisinage. L'auteur propose également un exemple d'illustration. En comparant l'évaluation obtenue par son approche à une évaluation existante obtenue par l'application de la méthode AHP, il a conclu que les méthodes de surclassement se comportent plutôt bien pour des problèmes avec un grand nombre d'actions.
Par rapport aux travaux de Joerin et de Marinoni (2006) qui sont les plus similaires à notre travail, la méthodologie proposée possède plusieurs mérites :

- Les deux travaux ne considèrent que des données matricielles. Notre travail s'applique aussi bien aux données matricielles qu'aux données vectorielles.
- Dans les deux cas, les actions sont assimilées directement aux zones homogènes obtenues par agrégation.
- Les auteurs ne proposent pas de solutions pour générer des solutions plus complexes ou même linéaires.
- Les deux approches ne s'appliquent essentiellement qu'aux problèmes de localisation ou d'aménagement et gestion du territoire.

- La définition des zones homogènes dans le travail de Joerin est différente de la notre (et à celle de Marinoni). En effet, dans le travail de Joerin, les zones homogènes peuvent être composées d'unités spatiales non contiguës. Mais, nous pensons que la localisation géographique est un élément important qui doit être inclus dans la définition d'une zone homogène. Ainsi, deux zones ayant la même évaluation peuvent être vue comme non équivalentes par le décideur.
- Plus important, notre approche incorpore une procédure d'inférence permettant d'éliciter les paramètres préférentiels du décideur, limitant ainsi l'effort cognitif qu'il doit fournir.

4.7.3 Extension du concept de la carte décisionnelle

Nous abordons dans cette sous-section quelques extensions possibles de la carte décisionnelle. Nous adressons successivement : (i) la construction des cartes décisionnelles composites pour supporter l'aide à la décision en groupe dans un contexte spatial, et (ii) la possibilité de combiner la carte décisionnelle avec des outils d'exploration et de visualisation des données spatiales pour supporter la prise de décision spatiale "visuelle".
Supposons que K groupes ou individus sont impliqués dans un processus de prise de décision spatiale. L'objectif est de générer une *carte décisionnelle composite* (CDC) (*composite decision map*) qui synthétise les préférences et les objectifs de tous les participants. En s'inspirant du travail du Dias et Clímaco (2000), nous avons distingué dans Chakhar et *al*. (2005) deux approches pour construire une CDC. Les deux approches se diffèrent essentiellement sur le moment où l'agrégation des cartes "individuelles" est effectuée.
Dans la première approche, l'agrégation est effectuée au niveau de l'entrée (*input*), i.e., lors de la définition des cartes critères (Figure 4.16). Opérationnellement, cette approche commence par la définition des *cartes critères composites* (CCC) pour tous les critères d'évaluation. Ensuite, ces cartes sont combinées afin d'obtenir une *carte intermédiaire composite* (CIC). Les autres étapes sont similaires à celles utilisées pour la génération d'une carte décisionnelle "individuelle" décrites dans 4.4.1. Il faut simplement que dans le cas d'une CDC, le modèle de classification multicritère doit être adapté au contexte de prise de décision en groupe[9]. Il faut également que la procédure d'inférence soit modifiée pour supporter des informations additionnelles provenant de plusieurs groupes ou personnes.
Dans la deuxième approche, l'agrégation globale s'effectue au niveau de sortie (*output*) (Figure 4.17). Opérationnellement, chaque groupe ou individu commence par construire sa propre *carte décisionnelle partielle* (CDP) comme nous avons détaillé en 4.4.1. Ensuite, ces différentes cartes sont combinées afin de générer une CDC finale. Par rapport au processus de génération d'une carte décisionnelle "individuelle", cette approche nécessite la définition d'un mécanisme d'agrégation pour combiner les évaluations issues de différentes CDP.
Nous pensons que la première approche est bien appropriée dans des situations de prise de décision où les conflits entre les différents participants sont limités. Elle est également adaptée à la prise de décision collaborative dans le sens où les différents individus ou groupes sont impliqués collectivement durant toutes les étapes du processus de décision, depuis la création

[9]Par exemple, le papier de Dias et Clímaco (2000) présente une version d'ELECTRE TRI destinée pour la prise de décision en groupe.

des cartes critères jusqu'à la génération de la CDC finale. Cependant, la première approche est techniquement plus complexe à mettre en oeuvre. De ce point de vue, la deuxième approche se montre plus flexible, étant donné que les différents groupes peuvent travailler indépendamment les uns des autres dans les trois premières étapes du processus de décision. Elle s'applique essentiellement dans des situations où les objectifs et les préférences de différents participants dans le processus décisionnel sont assez divergents.

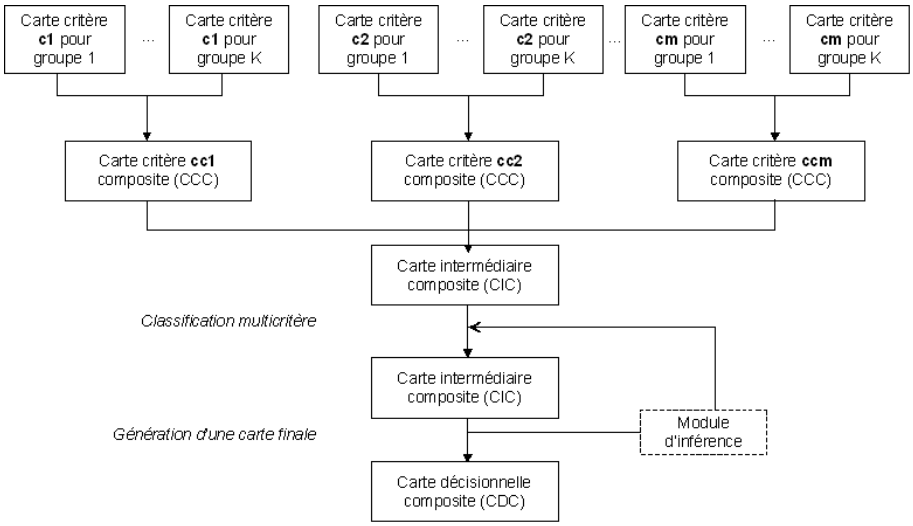


FIG. 4.16 – Carte décisionnelle composite : Approche 1

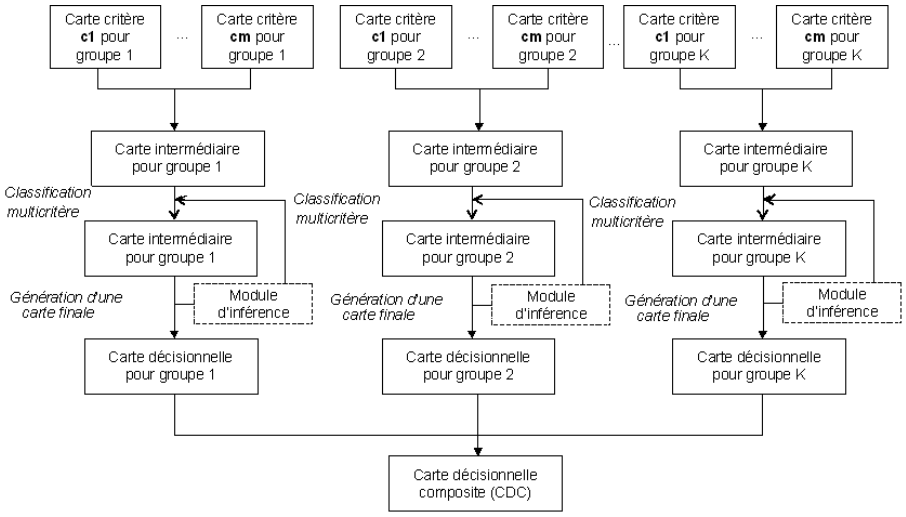


FIG. 4.17 – Carte décisionnelles composite : Approche 2

Un autre aspect important de la carte décisionnelle provient du fait qu'elle se prête bien

à être combiner avec des outils d'exploration et de visualisation des données à référence spatiales. Les potentialités de ces nouveaux outils et techniques dans la prise de décision spatiales ont été montrées dans plusieurs travaux récents dont ceux de Batty et Xie (1994), d'Andrienko et Andrienko (1999) et de Jankowski et *al*. (2001). Ce dernier travail est particulièrement intéressant puisqu'il supporte l'analyse multicritère.

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthodologie pour supporter la cartographie décisionnelle multicritère. Cette méthodologie se base sur l'idée de subdiviser la zone d'étude en un ensemble d'unités spatiales homogènes et à l'utilisation des solutions proposées dans les sections 4.5 et 4.6 afin de générer les actions potentielles. Ces solutions permettent en particulier de réduire de façon significative le nombre d'actions potentielles à comparer, facilitant ainsi l'utilisation des méthodes multicritères de surclassement de synthèse dans les SIG.
Dans le chapitre qui suit, nous proposons une algèbre dédiée à la modélisation spatiale multicritère. Cette algèbre constitue une formalisation à la fois de la stratégie d'intégration SIG-AMC proposée dans le deuxième chapitre et la méthodologie de cartographie décisionnelle multicritère présentée dans ce chapitre.

Chapitre 5

Algèbre pour la modélisation spatiale multicritère

L'Algèbre des cartes constitue une méthode générale de modélisation cartographique. Initialement, elle était destinée à être utilisée avec des données "raster" mais plusieurs extensions ont été proposées depuis. Cependant, ni la version originale, ni les différentes extensions de cette algèbre ne sont applicables à la cartographie décisionnelle multicritère. Pour pallier cette lacune, ce chapitre propose une nouvelle algèbre, nommée Decision Map Algebra (DMA), destinée spécifiquement à la modélisation spatiale multicritère. Elle représente une formalisation à la fois de la stratégie d'intégration SIG-AMC proposée dans le deuxième chapitre et la méthodologie de cartographie décisionnelle multicritère présentée dans le chapitre précédent. DMA est fondée sur le concept de la carte décisionnelle et intègre les différents algorithmes de génération des actions potentielles du chapitre précédent et supporte les différentes fonctions d'évaluation multicritère identifiées au deuxième chapitre. Dans un but d'intégration de l'algèbre proposée au sein d'un SIG, nous proposons à la fin de ce chapitre une modélisation orientée objet de cette algèbre.

5.1 Introduction

L'Algèbre des cartes (*Map Algebra*[1]) est un outil puissant pour incorporer la modélisation cartographique (*cartographic modeling*[2]) dans les SIG. Elle a était introduite en 1983 par Dana Tomlin (Tomlin, 1983) puis étendue et raffinée dans un livre (Tomlin, 1990). Elle constitue une méthode générale de modélisation cartographique dans laquelle les différentes opérations cartographiques élémentaires sont représentées sous une structure mathématique où les variables sont des plans d'information (*layer*) et les opérateurs sont ceux de l'analyse et la modélisation spatiale. Ces opérateurs, lorsqu'ils sont appliqués sur les différents plans d'information en entrée, permettent de générer de nouveaux plans d'information comme résultat.

[1]Le terme "Map Algebra" a été introduit et utilisé pour la première fois dans Tomlin et Berry (1979).

[2]Notons que les termes "Map algebra" et "cartographic modeling" sont souvent utilisés indifféremment, mais nous pensons que l'Algèbre des cartes est une méthode, parmi d'autres, pour la modélisation cartographique.

L'utilité de l'Algèbre des cartes est bien reconnue aujourd'hui et la plupart de ses fonctionnalités sont supportées par les différents SIG commerciaux comme par exemple Microstation raster module, Arc/Info-GRID d'ESRI, GRASS mapcalc, GRID Analyst de Modular GIS Environment d'Integraph, IDRISI, PcRaster (Karssenberg et *al*., 2001), ArcGIS Spatial Analyst d'ESRI, et IMAGINE Model Maker d'ERADS.
L'Algèbre des cartes est initialement conçue pour être utilisée avec des données *raster*. Cependant, plusieurs extensions lui ont été proposées dans la littérature. Elles concernent essentiellement (i) l'ajout de nouveaux opérateurs ; (ii) support d'autres types de données ; (iii) la modélisation dynamique ; (iv) la prise en compte de la dimension temporelle ; et (v) la modélisation visuelle. Nous commenterons brièvement chacune de ces extensions dans §5.2. Les applications de l'Algèbres des cartes sont nombreuses : localisation (Armstrong et Densham, 1996), analyse environnementale (Wesseling et *al*., 1996, Stocks et Wise, 2000 ; Pullar, 2004), analyse topographique (Caldwell, 2000), climatologie (Mennis et Viger, 2004), etc.
Ces extensions ont permis de répondre, partiellement ou totalement, aux différentes limites qui ont été adressées à l'Algèbre des cartes de Tomlin. Nous présentons une liste (non exhaustive) de ces limites dans §5.2. Néanmoins, ni la version originale de l'Algèbre des cartes ni les différentes extensions qui ont été proposées ne sont capables de supporter les aspects multicritères des problèmes de décision à référence spatiale, ce qui est essentiellement dû à l'absence des opérateurs nécessaires à la cartographie décisionnelle multicritère.
Pour pallier à cette lacune, nous proposons dans ce chapitre une nouvelle algèbre, nommée DMA (pour *Decision Map Algebra*) destinée à la modélisation spatiale multicritère. L'algèbre DMA représente une formalisation à la fois de la stratégie d'intégration SIG-AMC proposée dans le deuxième chapitre et la méthodologie de cartographie décisionnelle multicritère introduite dans le chapitre précédent[3]. En effet, DMA incorpore les différents algorithmes de génération des actions potentielles du chapitre précédent et supporte les différentes fonctions d'évaluation multicritère identifiées au deuxième chapitre. DMA n'est pas encore implantée mais dans l'objectif de l'incorporer dans un SIG, nous proposons à la fin de ce chapitre une modélisation orientée objet de DMA.
Ce chapitre est organisée comme suit. Dans la section 2, nous commençons par introduire l'Algèbre des cartes de Tomlin, ses limites et ses différentes extensions. Dans la section 3, les différentes primitives de DMA sont présentées. Dans la section 4, nous présentons les spécifications formelles de quelques types de données (TAD) élémentaires. La spécification de DMA est détaillée en section 5. La modélisation orientée objet de DMA fera l'objet de la section 6. En section 7, nous présentons quelques travaux similaires.

5.2 Algèbre des cartes : Principe, limites et différentes extensions

La structure de l'Algèbre des cartes consiste en un ensemble de plans d'information, d'opérations sur et entre ces plans ainsi que de séquences de ces opérations[4] (Berry, 1993). Un plan

[3]Nous présentons dans 5.7 les correspondences entre, d'une part, les fonctions d'évaluation multicritère et les opérateurs de l'algèbre, et, d'autre part, les algorithmes de la méthodologie et les types de données et opérateurs de l'algèbre qui leur sont associés.

[4]Notre traduction de "The structure of map algebra consists of a set of map layers, primitives operations on and between map layers, and sequences of these operations".

d'information est un élément du *modèle cartographique* défini comme une collection de plans d'information dont chacun représente la distribution spatiale d'un thème (ou concept ou attribut) sur une même zone d'étude. L'élément de base d'un plan d'information est la *localisation géographique*, souvent représentée comme une *cellule* de matrice. Chaque cellule est associée avec une valeur numérique représentant la valeur du thème correspondant à cette localisation.
L'Algèbre des cartes offre différentes opérations qui sont utilisées pour transformer les plans d'information, cellule par cellule, vers de nouveaux plans d'information dans le but d'en extraire des informations utiles à l'utilisateur (Takeyama et Couclelis, 1997). Ainsi, toute manipulation complexe des plans d'information est représentée comme une composition algébrique de ces opérations. De ce fait, la structure de l'Algèbre des cartes est similaire à l'algèbre traditionnelle dans le sens où les plans d'information sont traités comme des nombres dans une équation (Berry, 1993).
Les opérations de l'Algèbres des cartes sont généralement classées en quatre catégories (Tomlin, 1990, 1991 ; Takeyama et Couclelis, 1997) :

- *Opérations locales* (*local operations*) (Figure 5.1.a) qui calculent une nouvelle valeur pour chaque cellule en fonction d'une ou plusieurs valeurs existantes pour cette cellule. *Exemples* : `LocalSum` et `LocalMaximum`. `LocalSum` (`LocalMaximum`) calcule, pour chaque localisation, une nouvelle valeur représentant la somme (le maximum) des valeurs associées à cette localisation dans les différents plans d'information.
- *Opérations zonales* (*zonal operations*) (Figure 5.1.b) qui calculent une nouvelle valeur pour chaque cellule en fonction des valeurs d'un plan d'information spécifique qui sont associées avec cette cellule et également avec toutes les cellules se trouvant dans sa zone dans un autre plan d'information. *Exemples* : `ZonalMean` et `ZonalPercentage`. `ZonalMean` calcule, comme nouvelle valeur pour chaque localisation la moyenne des toutes les valeurs dans la zone qui contient cette localisation. `ZonalPercentage` affecte une nouvelle valeur pour chaque localisation d'un premier plan d'information indiquant à quel pourcentage les cellules d'une zone d'un autre plan d'information partagent la même valeur avec cette localisation.
- *Opérations d'augmentation* (*incremental operations*) (Figure 5.1.c) qui caractérisent chaque cellule en terme d'une "augmentation" de dimension 1, 2 ou 3. La taille et la forme de ces "augmentations" sont inférées à partir de(s) valeur(s) associée(s) avec chaque cellule et celles des cellules voisines mais adjacentes sur un ou plusieurs autres plans d'informations. *Exemples* : `IncrementalVolume` et `IncrementalAspect`. Le premier, `IncrementalVolume`, calcule une nouvelle valeur pour chaque localisation indiquant le volume "surfacique", i.e., le degré de satisfaction d'une condition portant sur la surface. Le second, `IncrementalAspect`, mesure l'aspect surfacique, i.e., la direction de relèvement d'une surface inclinée.
- *Opérations focales* (*focal operations*) (Figure 5.1.d) qui calculent, pour chaque cellule, une nouvelle valeur en fonction des valeurs existantes, des distances et/ou des directions par rapport aux cellules voisines (mais non nécessairement adjacentes) d'un plan d'information donné. *Exemples* : `FocalSum` et `FocalMean`. `FocalSum` (`FocalMean`) calcule, pour chaque localisation, la somme (la moyenne) des valeurs se trouvant dans le voisinage de cette localisation.

Les implémentations récentes de l'Algèbre des cartes incluent également des *opérations globales* (Menon et *al*., 1992) qui s'appliquent à toutes les cellules d'un plan d'information. Ces opérations sont utilisées, par exemple, pour la génération des cartes d'accessibilité, la définition de plus court chemin, les transformations géométriques, la conversion *raster*-vecteur, interpolation, etc.

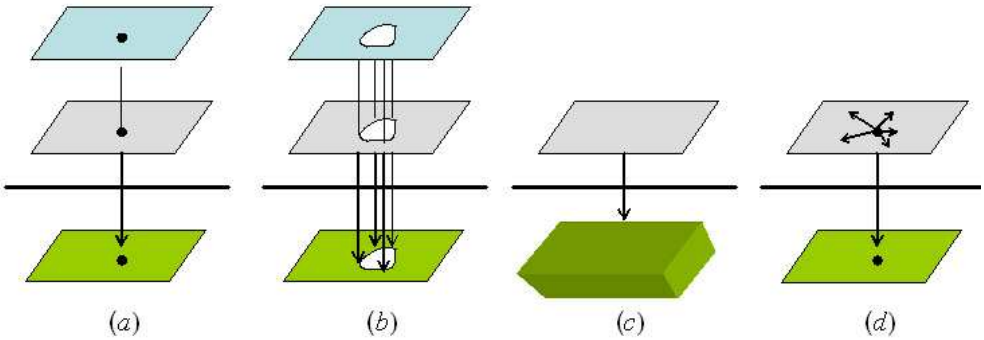


FIG. 5.1 – Les opérations de l'Algèbre des cartes—locale (a), zonale (b), augmentation (c) et focale (d) (inspiré de Stefanakis (2001))

Les opérations en Algèbre des cartes sont exprimées de manière textuelle en utilisant une syntaxe proche de l'anglais. Pour illustration, nous reprenons un exemple proposé par Tomlin (Tomlin 1990, p. 73). Considérons l'opérateur `LocalRating` utilisé pour caractériser les localisations en fonction des valeurs provenant de plusieurs plans d'information. La ligne suivante exprime, en utilisant la syntaxe de l'Algèbre des cartes, une opération permettant de générer un nouveau plan d'information, nommée `OpenDevelopment` où les cellules ayant pour type de végétation les valeurs 1, 2 ou 3 (qui correspondent aux "HardWoods", "SoftWoods", et "MixedWoods", respectivement) prennent la valeur 6, alors que les cellules qui représentent des zones vides ("Open-Land") prennent la valeur 0 :

```
OpenDevelopment = LocalRating of Vegetation with Development for 0 with 6 for 1···3
```

En pratique, il est souvent nécessaire d'utiliser une séquence d'opérations élémentaires dans laquelle le résultat d'une opération est l'entrée d'une autre opération. Cette séquence est nommée *procédure* dans la terminologie de l'Algèbre des cartes. La Figure 5.2 donne une représentation schématique d'une procédure. Dans cette figure, la partite gauche représente la structure logique et celle de droite l'expression algébrique associée à cette structure.
L'Algèbre des cartes a été conçue pour être utilisée avec des plans d'information *raster* mais son extension pour traiter des plans d'information de type vectoriel est possible. Dans le cas des données matricielles, les plans d'information en entrée et en sortie ont la même géométrie mais les valeurs associées avec quelques ou toutes les cellules dans le plan d'information en sortie se trouvent modifiées par les transformations appliquées. La transformation d'un plan

d'information de type vecteur par un scalaire ou une fonction n'affecte que les attributs associés aux différents objets spatiaux. Autrement dit, la géométrie des plans d'information d'entrée et de sortie est la même. La Figure 5.3 illustre cette opération. Cela reste valable lorsque les plans d'information en entrée ont exactement la même topologie. Lorsque l'opération implique des plans d'information ayant des topologies différentes, le résultat est un nouveau plan dans lequel le nombre et la forme des objets spatiaux sont différents de ceux des plans en entrée. Nous avons déjà donné un exemple de ce cas pour illustrer la variante *union* $\oplus$ de l'opération d'*overlay* (cf. Chap. 4, Figure 4.3).

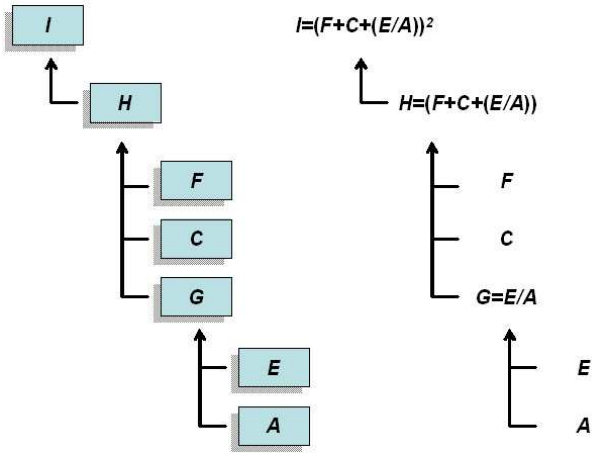


FIG. 5.2 – Procédure en Algèbre des cartes—*Source* : Tomlin (1990), p. 53

Malgré l'utilisation et l'adoption de ses idées dans différents SIG commerciaux, l'Algèbre des cartes présente, cependant, plusieurs limites dont les suivantes :

- À cause du fait qu'elle est basée sur les opérations d'analyse des cartes, elle n'est pas appropriée pour la modélisation mathématique spatiale (Gao et *al.*, 1996 ; Takeyama et Couclelis, 1997).
- Elle est essentiellement destinée à traiter des plans d'information de type *raster* (Albrecht, 1995 ; Chrisman, 2002 ; Peuquet, 2002).
- Il n'existe aucun moyen pour traiter les incertitudes, ou pour identifier des objets à part ceux définis de manière explicite (Peuquet, 2002).
- La terminologie de l'Algèbre des cartes devient obscure pour la modélisation complexe (Chrisman, 2002).
- Plusieurs termes comme "focal", "incremental" ou "zonal", et des fonctions comme "participating", "proximity", ou "insularity" sont difficiles à être distingués par les non-experts (Albrecht, 1995).
- l'Algèbre des cartes ne permet pas de traiter de manière explicite les relations spatiales et les interactions entre les différentes localisations, qui sont à la base de plusieurs modèles d'analyse spatiale (Takeyama et Couclelis, 1997).

- L'Algèbre des cartes est destinée à l'analyse statique des cartes. Elle permet de modéliser les motifs (*patterns*) et structures spatiaux mais pas la dynamique spatiale (Takeyama et Couclelis, 1997 ; Peuquet, 2002)

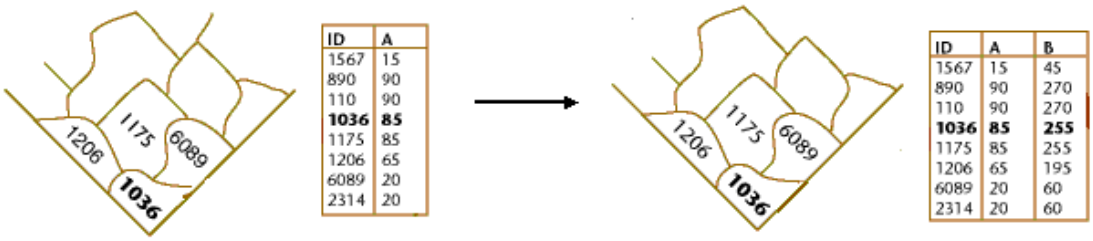


FIG. 5.3 – Transformation d'une carte vectorielle par un scalaire—Ici : $B = A \times 3$
Source : `http://www.ncgia.ucsb.edu/cctp/units/unit42/algebra.html`

Plusieurs travaux ont été menés dans le but de répondre à ces limites. Dans ce que suit, nous en énumérons quelques uns. Nous avons organisé ces travaux en plusieurs groupes, selon la nature de l'extension la plus significative par rapport à l'Algèbre des cartes.

Ajout de nouveaux opérateurs. Nous citons ici les travaux suivants : Menon et *al*. (1992), Su et *al*. (1997), Burrough et McDonnell (1998) et Caldwell (2000). Menon et *al*. (1992) ont proposé plusieurs opérations dites globales,i.e., qui s'appliquent à toutes les localisations du plan et servent par exemple à calculer le plus court chemin, la génération des cartes d'accessibilité, etc. Su et *al*. (1997) ont proposé l'utilisation de plusieurs opérateurs issus de la *mathématique morphologique*[5] comme `Dilation`, `Erosion`, `Expansion` et `Shrink`, pour traiter le problème d'agrégation spatiale avec des données matricielles. Burrough et McDonnell (1998, Chap. 8, pp. 183-219) donnent une description plus au moins détaillée des principaux opérateurs destinés à l'analyse des phénomènes continus et ils y ajoutent les différents opérateurs d'interpolation. Caldwell (2000) introduit les opérateurs "drapeaux" (*flag operators*) qui évaluent une expression et marquent (d'où le terme "flag") les localisations *où* (*where*) cette expression est satisfaite. Ils se distinguent ainsi des opérateurs "focal" et "zonal" classiques qui eux évaluent une condition et affectent une valeur à une localisation source.

Support d'autres types de données. Plusieurs extensions ont été proposées pour traiter d'autres types de données que les données matricielles. Câmara et *al*. (1994) proposent une algèbre pour les "*champs géographiques*" (*geographical fields*) destinée à la modélisation des phénomènes spatiaux continus. Armstrong et Densham (1996) proposent une algèbre nommée Network Map Algebra destinée aux problèmes qui nécessitent l'analyse des structures en réseaux tels que les problèmes de localisation et de distribution des marchandises et des services. Wang et Pullar (2005) introduisent une algèbre, Vector Map Algebra, pour modéliser des processus

[5]La *mathématique morphologique* (*mathematical morphology*), introduite par Serra (1982), est définie comme une théorie pour l'analyse des formes et structures spatiales. (voir également Haralick et *al*. (1987)).

physiques qui nécessitent une représentation vectorielle comme les ruissellements des eaux ou l'érosion/dépôt.

Support de la modélisation dynamique. Pour modéliser la dynamique spatiale, la plupart des travaux se basent sur l'ajout des fonctionnalités des automates cellules dans les SIG. Takeyama et Couclelis (1997) proposent une algèbre nommée Geo-Algebra permettant d'incorporer dans le SIG les fonctionnalités analytiques des automates cellulaires pour modéliser la dynamique spatiale. Les auteurs proposent plusieurs extensions au formalisme classique de l'automate cellulaire pour tenir compte de spécificités des problèmes spatiaux. Stocks (1999) (cité et présenté brièvement dans Stocks et Wise (2000)) proposent un langage formel, CALANG, basé sur les concepts des automates cellulaires et destiné à faciliter la représentation de la dynamique spatiale dans les SIG. Une application à la modélisation environnementale de CALANG est décrite dans Stocks et Wise (2000). Dans une série d'articles (Pullar, 2000-2004), Pullar se base sur la technique des réseaux fonctionnels pour construire un cadre conceptuel permettant d'utiliser, en se servant d'un langage de spécification similaire à XML, différents outils (SIG, Excel et deux algèbres—MapScript et SimuMap) pour simuler la dynamique spatiale.

Support de la dimension temporelle. Très peu d'algèbres dédiées à la modélisation statio-temporelle ont été proposées dans la littérature. Mennis et *al*. (2005b) proposent une extension de l'Algèbre des cartes à trois dimensions en ajoutant, aux deux dimensions relatives à l'espace géographique, une dimension temporelle. Ils obtiennent une nouvelle classe de fonctions qu'ils désignent par *fonctions* "*cubiques*" (*cube functions*). Des applications à ces fonctions sont reportées dans Mennis et Viger (2004) et Mennis (2005). Dans un autre article, Mennis et *al*. (2005a), ces mêmes fonctions ont été incorporées dans une nouvelle algèbre nommée MMA (Multidimensional Map Algebra) qui ajoute, aux types de données classiques, plusieurs nouveaux types de données : `TimeSeries`, `Grid`, `TimeCube`, `SpaceCube` et `HyperCube`. Un élément de ce dernier type de données possède quatre dimensions (trois dimensions pour l'espace et une dimension pour le temps).

Support le la modélisation visuelle. Il existe également quelques tentatives pour développer des versions "visuelles" à l'Algèbre des cartes. Kirby et Pazner (1990) proposent une algèbre nommée GMA (pour Graphic Map Algebra) où les opérations et les données sont représentées sous forme d'icônes et reliées entre eux par des diagrammes de flux. L'Algèbre des Cartes Visuelle (Visual Map Algebra) proposée par Egenhofer et Bruns (1995) permet une manipulation directe des différents plans d'information. Les auteurs introduisent deux nouvelles métaphores : (i) une *plate-forme de calcul* ("*computational platform*") où la combinaison des différents plans d'information s'effectue simplement en "empilant" (*stacking*) des "icônes" représentant ces plans, et (ii) une *plate-forme de visualisation* ("*viewing platform*") permettant de visualiser les résultats. Murray et *al*. (2000) décrivent un environment visuel pour la modélisation spatiale. Cet environment se base sur l'utilisation des diagrammes de flux pour construire des modèles d'analyse spatiale aussi bien statique que dynamique. Cet article ne fait pas une référence explicite à l'Algèbre des cartes mais ses principes y sont bien présents. Laurini et *al*. (2003) proposent un langage de requêtes, nommé Phenomena, basé sur une représentation visuelle et destiné à la modélisation des phénomènes continus.

Notons enfin l'existence de quelques travaux pour développer des versions web de l'Algèbre des cartes comme celle proposée par Grunberg et *al*. (2004).
Nous pensons que ces différentes extensions permettent de répondre aux limites énumérées plus haut. Mais la limite qui nous nous intéresse dans le cadre de cette thèse concerne le fait que l'Algèbre des cartes ainsi que toutes ses extensions ne sont pas adaptées pour l'aide à la décision spatiale, particulièrement celle basée sur l'analyse multicritère. La cause principale en est l'absence d'opérateurs convenables permettant la modélisation spatiale multicritère.

5.3 Primitives et définitions

Dans cette section nous définissons les termes utilisés dans la spécification de l'algèbre proposée. Nous y introduisons les différents types de données. Les relations entre ces différents types de données sont représentées dans la Figure 5.4 selon le formalisme d'UML (Unified Modeling Language).
Le type de données de base de notre algèbre (et également de la plupart des autres algèbres) est le *plan d'information*, dénoté par `map-layer`. Un `map-layer` est une donnée élémentaire qui contient l'*image* du plan d'information ainsi que d'autres informations documentaires telles que le système de référence, `rSystem`; l'échelle de la carte, `mScale`; etc. Nous distinguons deux catégories de type de données `map-layer` : *raster* et *vecteur*. L'image d'un `map-layer` de type *raster* est composée de *pixels*. Chaque élément d'une carte *raster* est nommé `gPixel`. L'image d'un `map-layer` de type vecteur est une collection de trois types de données qui correspondent à autant d'entités spatiales :

- `gPoint` : qui correspond à une entité *ponctuelle* dans le monde réel.
- `gLine` : qui correspond à une entité *linéaire* dans le monde réel.
- `gPolygon` : qui correspond à une entité *polygonale* (ou *surfacique*) dans le monde réel.

Dans DMA, un `map-layer` est soit de type raster soit de type vecteur. Ceci est modéliser par le symbole "`xor`" dans la Figure 5.4. Une collection de `gPixel`, `gPoint`, `gLine` et `gPolygon` est, respectivement, dénotée `xSet`, `pSet`, `lSet` et `ySet`. Un `gPixel` peut être associé à une seule valeur d'un type de données arbitraire qui représente un attribut naturel ou artificiel. Les types de données `gPoint`, `gLine` ou `gPolygon` peuvent être associés à plusieurs valeurs représentant un ensemble d'attributs descriptifs qui s'appliquent à l'objet en totalité. Les éléments `gPixel` d'un plan d'information de type raster sont complètement identifiés par leurs coordonnées "XY" dans l'image du plan. Les éléments `gPoint`, `gLine` et `gPolygon` associés avec un `map-layer` doivent être identifiés de manière explicite.
Nous définissions trois sous-classes du type de données `map-layer` : `alternatives-map`, `criterion-map` et `decision-map` (voir Figure 5.4). Une *carte d'actions*, notée `alternatives-map`, est un type spécial de `map-layer` qui, en plus des informations générales associées à un `map-layer`, contient une collection d'objets spécifiques nommés *alternatives* (ou *actions*). Il est important de mentionner que les actions sont normalement générées via la carte décisionnelle comme nous l'avons détaillé dans le Chapitre 4. Cependant, le type de données `alternatives-map` est introduit dans DMA pour traiter les problèmes dans lesquels l'utilisation d'une carte décisionnelle est difficile ou peu adaptée. Il existe trois

type d'actions de base : `pAlter`, `lAlter` ou `yAlter`, qui modélisent des actions ponctuelles, linéaires ou polygonales. Les collections de `pAlter`, `lAlter` ou `yAlter` sont, respectivement, dénotés par `pAlters`, `lAlters`, ou `yAlters`. Quand il est nécessaire, nous utiliserons les termes génériques `anAlter` et `sAlters` pour désigner une action ou une collection d'actions, indépendamment de leur type. Chaque action est caractérisée par un vecteur d'évaluations relatives aux différents critères. Il est important de mentionner que chaque `alternatives-map` contient un seul type d'actions, chacune est identifiée de manière explicite et unique.

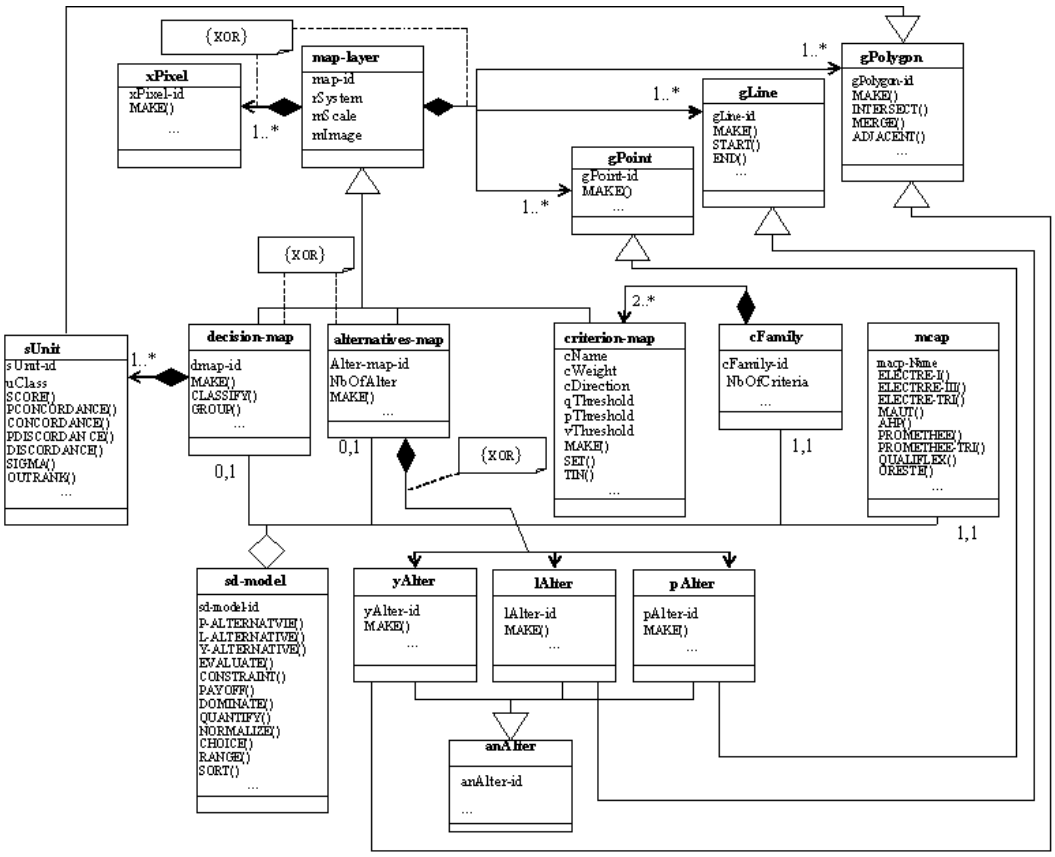


FIG. 5.4 – Les relations entre les différents types de données

Une *carte critère*, `criterion-map`, est un type spécifique de `map-layer` qui représente un critère d'évaluation[6]. Dans une `criterion-map`, chaque entité spatiale (i.e. `gPixel`, `gPoint`, `gLine` ou `gPolygon`) est caractérisée par une seule valeur qui représente l'évaluation de cette entité par rapport à un critère donné. Une collection de cartes critères est nommée `cFamily` (pour famille de critères) dans DMA.

[6]Il est utile de rappeler qu'une carte critère est différente d'un simple plan d'information dans le sens où elle sert à modéliser de l'information subjective (cf. §2.4.2.

Dans la modélisation multicritère, un poids, une direction d'optimisation et plusieurs paramètres de préférences sont associés à chaque critère d'évaluation (cf. Chap. 2). Pour tenir compte de ces informations, nous associons à chaque `criterion-map` les informations suivantes :

- `cWeight` : poids associé au critère.
- `cDirection` : direction d'optimisation qui peut être *maximisation* ou *minimisation*.
- `qThreshold` : seuil d'indifférence ;
- `pThreshold` : seuil de préférence ;
- `vThreshold` : seuil de veto.

Le type de données `decision-map` est une spécialisation de `map-layer` représentant une discrétisation de l'espace de décision en unités spatiales. Il correspond au concept de la carte décisionnelle introduit dans le chapitre précédent. Le type de données `decision-map` est composé d'un nombre fini d'unités spatiales. Chaque unité est de type `sUnit` (pour *spatial unit*). Une collection d'unités spatiales est désignée par `sSet`. Pour qu'une carte décisionnelle soit opérationnelle, il est nécessaire d'affecter les unités spatiales qui la compose à un ensemble de catégories en utilisant un modèle de classification multicritère, ELECTRE TRI en l'occurrence. Nous notons par `uClass` la catégorie à laquelle une unité spatiale est affectée.
Une méthode multicritère est une agrégation (au sens de la modélisation orientée objet) de plusieurs éléments (actions, critères, etc.). Nous ajoutons donc un type de données, `sd-model` (pour *spatial decision model*), pour représenter une agrégation de ces différents éléments. Dans sa forme la plus simple, un `sd-model` est une agrégation d'une carte décisionnelle (`decision-map`) (ou d'une une carte d'actions (`alternatives-map`)), au moins deux cartes critères (`criterion-map`) et une procédure d'agrégation multicritère (`mcap`). Ce dernier type de données permet d'implémenter les différentes procédures agrégation multicritère. Plusieurs autres types de données comme *table de décision* (`dTable`), opérateur d'agrégation (`aOperator`), structure de préférence (`pStructure`), etc., qui sont nécessaires à la formalisation de l'algèbre seront introduits au fur et à mesure dans les sections suivantes. Ces types de données additionnels ne sont pas représentés dans la Figure 5.4.

5.4 Spécification formelle de types de données élémentaires

Dans cette section, nous présentons la specification formelle de quelques types de données élémentaires. Notons que les trois premiers types de données (i.e. `gPoint`, `gLine` et `gPolygon`) ont été déjà introduits, partiellement, au niveau du premier chapitre. Nous les reprenons ici avec plus de détails. Ces trois types ainsi que celui de `map-layer` sont des types de données spatiaux utilisés dans la plupart des algèbres des cartes. Les types de données qui suivent (i.e. `aOperator`, `dTable` et `aList`) ne correspondent pas à des TAD spatiaux mais sont nécessaires pour une formalisation complète de l'algèbre que nous proposons.
Précisons d'abord que, pour spécifier l'algèbre, nous avons utilisé la méthode de *spécification*

algébrique proposée par Guttag (1977). Selon cette méthode, une spécification algébrique d'un TAD consiste en quatre parties (Guttag et Horning, 1978 ; Dorenbeck et Egenhofer, 1991) :

- *Type* : indique le nom du type de données à définir.
- *Set* : indique la liste de types de données utilisés pour définir les propriétés de type de données à définir.
- *Syntax* : indique la liste des opérations associées au type de données. Chaque opération est définie par son nom, le produit Cartésien des entrées et le résultat.
- *Axioms* (ou *Equations*) : permet de décrire les comportements des différentes opérations.

Deux types d'opérations peuvent être distingués (Dorenbeck et Egenhofer, 1991) : (i) les opérations pour créer ou modifier un TAD, nommées "créateurs" (*creators*) et (ii) les opérations pour "observer" les propriétés d'un TAD, nommées "observateurs" (*observers*).
Dans les spécifications qui suivent ainsi que celles de la section 5.5, nous allons utilisé des TAD élémentaires tels que "*real*", "*integer*", "*boolean*" etc. Nous supposons que ces TAD existent avec leurs sémantiques usuelles.

5.4.1 Spécification du type de données `gPoint`

Le type de données `gPoint` correspond à une entité spatiale ponctuelle. La spécification d'un `gPoint` est donnée dans la Figure 5.5. Nous avons associé à ce type de données quelques opérateurs. D'autres opérateurs peuvent être ajoutés. Une description succincte de ces opérateurs est la suivante :

- `MAKE` : permet de créer un objet de type `gPoint`,
- `X` : renvoie l'abscise,
- `Y` : renvoie l'ordonnée,
- `ISEQUAL` : teste si deux points sont les mêmes,
- `DISTANCE-PP` : calcule la distance (Eclidienne) entre deux points,
- `DISTANCE-PQ` : calcule la distance (Eclidienne) d'un point à la frontière d'un polygon.

Les comportements de quelques opérateurs sont donnés dans la partie *axiom* de la Figure 5.5. Remarquons que l'opérateur `MAKE` possède une signification particulière puisqu'il appartient à ce qu'on appelle l"*ensemble réduit*" ("*reduced set*") de type de données `gPoint`. Le concept de l'"*ensemble réduit*" sert généralement pour s'assurer qu'une *spécification est complète* (ou *suffisamment complète*). Une spécification est dite complète si les comportements de tous les opérateurs peuvent être décrits par cet ensemble réduit. Il est aisé de voir dans la Figure 5.5 que les comportements des opérateurs `X`, `Y` et `DISTANCE-PP` sont complètement décrits par l'opérateur `MAKE`. Notons enfin que la construction de l"*ensemble réduit*" n'est pas une tâche facile car elle exige une bonne connaissance du domaine d'application.

```
Type : gPoint
set : gPoint, gPolygon, real, boolean

syntax :
MAKE          real × real → gPoint
X             gPoint → real
Y             gPoint → real
ISEQUAL       gPoint × gPoint → boolean
DISTANCE-PP   gPoint × gPoint → real
DISTANCE-PQ   gPoint × gPolygon → real

axioms :
i,j, k, l : real; p, q : gPoint

X(MAKE (i, j))
= i

Y(MAKE (i,j))
= j

DISTANCE-PP(MAKE (i, j), MAKE (k, l))
= sqrt(((X(MAKE (i, j)) - X(MAKE (k, l))) * (X(MAKE (i, j)) - X(MAKE (k, l)))) +
  ((Y(MAKE (i, j)) - Y(MAKE (k, l))) * (Y(MAKE (i, j)) - Y(MAKE (k, l)))))
```

FIG. 5.5 – Spécification formelle du type de données `gPoint`

5.4.2 Spécification du type de données `gLine`

La Figure 5.6 présente la spécification de types de données `gLine` qui correspond à une entité spatiale linéaire. Nous y distinguons les opérateurs suivants :

- `MAKE` : permet de créer un objet de type `gLine`,
- `START` : renvoie l'extrémité initiale d'une ligne,
- `END` : renvoie l'extrémité finale d'une ligne,
- `LENGTH` : calcule la longueur d'une ligne,
- `POINT-IN-LINE` : teste l'intersection d'un point avec une ligne,
- `INTERSECT-LL` : teste l'intersection de deux lignes.
- `INTERSECT-LQ` : teste l'intersection d'une ligne avec un polygone.

Pareillement au type de données `gPoint`, l'opérateur `MAKE` appartient à l'ensemble réduit de type de données `gLine`. Dans les deux cas, l'opérateur `MAKE` a la même signification (celle de créer un objet spatial). Néanmoins, l'opérateur `MAKE` associé à un `gPoint` prends deux réels en entrées (représentant les coordonnées d'un point) alors que celui associé à un `gLine` prends deux points (représentant l'extrémité initiale et l'extrémité finale). Les comportements des opérateurs `START`, `END` et `LENGTH` sont donnés en Figure 5.6. Le comportment du dernier opérateur est exprimé à l'aide de l'opérateur `DISTANCE-PP` associé au type de données `gPoint`. Les opérateurs `START` et `END` renvoient chacun un point. Ces deux points représentent les entrées de l'opérateur `DISTANCE-PP` qui renvoie la longueur de la ligne.
Signalons que les opérateurs `START` et `END` représentent les opérateurs `f` et `t` définis dans §4.2 ; et les opérateurs `POINT-IN-LINE`, `INTERSECT-LL` et `INTERSECT-LQ` correspondent aux relations topologiques `in` et `cross` définies également dans §4.2 et qui sont appliquées ici, respectivement, à un objet ponctuel et à un objet linéaire ; à deux objets linéaires ; et à un objet ponctuel et à un objet polygonal.

```
Type : gLine
set : gPoint, gLine, gPolygon, real, boolean

syntax :
MAKE            gPoint × gPoint → gPoint
START           gLine → gPoint
END             gLine → gPoint
LENGTH          gLine → real
POINT-IN-LINE   gLine × gPoint → boolean
INTERSECT-LL    gLine × gLine → gPoint
INTERSECT-LQ    gLine × gPolygon → boolean

axioms :
p, q : gPoint, l : gLine

START (MAKE (p, q))
= p

END (MAKE (p, q))
= q

LENGTH(l)
=DISTANCE-PP(START(l),END(l))
```

FIG. 5.6 – Spécification formelle du type de données `gLine`

5.4.3 Spécification du type de données `gPolygon`

La spécification du type de données `gPolygon` est donnée par la Figure 5.7. La liste suivante donne une brève description de tous les opérateurs de ce type de données :

- `MAKE` : permet de créer un polygone,
- `POINT-IN-POLYGON` : teste l'appartenance d'un point à un polygone,
- `INTERSECT` : teste l'intersection de deux polygones
- `INTERSECTION` : renvoie le polygone obtenu après intersection de deux polygones,
- `CLIPPING` : renvoie le polygone obtenu suite à l'intersection d'un polygone et d'un rectangle,
- `ADJACENT` : teste l'adjacence de deux polygones,
- `AREA` : calcule la surface d'un polygone,
- `CENTROID` : renvoie le point "*centroid*" d'un polygone
- `BOUNDARIES` : lit la frontière d'un polygone,
- `MERGE` : permet de regrouper deux ou plusieurs polygones adjacents.

Comme précédemment, l'opérateur `MAKE` fait partie de l'ensemble réduit de ce type de données. Néanmoins, dans ce cas il prend en entrée une séquence de points relatifs aux extrémités des segments constituant la frontière du polygone. Plusieurs opérateurs de la liste précédente peuvent être associés aux relations topologiques données dans §4.2 : `INTERSECT` correspond à la relation topologique `touch` appliquée à deux polygones, `POINT-IN-POLYGON` correspond à la relation topologique `in` appliquée à un point et à un polygone, `ADJACENT` correspond à la relation topologique `touch` appliquée à deux polygones, et `BOUNDARIES` correspond à l'opérateur `b`.

```
Type : gPolygon
set : gPoint, gLine, gPolygon, Rectangle, real, boolean

syntax :
MAKE                gPoint × ··· × gPoint → gPolygon
POINT-IN-POLYGON    gPolygon × gPoint → boolean
INTERSECT           gPolygon × gPolygon → boolean
INTERSECTION        gPolygon × gPolygon → gPolygon
CLIPPING            gPolygon × Rectangle → gPolygon
ADJACENT            gPolygon × gPolygon → boolean
AREA                gPolygon → real
CENTROID            gPolygon → gPoint
BOUNDARIES          gPolygon → gLine
MERGE               gPolygon × ··· × gPolygon → gPolygon

axioms :
p1,···,pn,r : gPoint ; l :gLine ;

AREA(MAKE(p1,···,pn))
= _area

CENTROID(MAKE(p1,···,pn))
= _gPoint

POINT-IN-POLYGON(MAKE(p1,···,pn), r)
=if (∀ (p) in (p1,···,pn) X(r) ≤ X(p) and Y(r) ≤Y(p)) then true

INTERSECTS(MAKE (p1,···,pn),l)
= POINT-IN-POLYGON( MAKE(p1,···,pn), SART(l)) or
  POINT-IN-POLYGON(MAKE(p1,···,pn), END(l))
```

FIG. 5.7 – Spécification formelle du type de données `gPolygon`

5.4.4 Spécification du type de données `map-layer`

La spécification du type de données `map-layer` est donnée par la Figure 5.8. L'opérateur `MAKE` permet de créer l'image d'un `map-layer`. Les trois opérateurs `PUT-P`, `PUT-L` et `PUT-Q` servent à "peupler" l'image associée à un `map-layer` avec des objets ponctuels, linéaires ou polygonaux, respectivement. Les opérateurs `INTERSECT` et `UNION` sont deux variantes de l'opération d'*overlay*. Rappelons que l'opérateur `UNION` est utilisé dans le chapitre précédent pour la génération de la carte intermédiaire **I** (cf. 4.4.1.1).
Il est important de remarquer que la spécification de `map-layer`, telle qu'elle est donnée ici, est une version très "simplifiée" de la réalité. Mais elle est suffisante pour introduire notre algèbre.

5.4.5 Spécification du type de données `aOperator`

L'opérateur `aOperator` fournit un schéma pour combiner une série de valeurs. Le rôle de cet opérateur est d'agréger plusieurs valeurs données en entrée en une valeur unique. La spécification de `aOperator` est donnée par la Figure5.9. Nous y distinguons deux opérateurs : `CREATE` qui permet de définir un opérateur d'agrégation et `COMBINE` dont le rôle consiste à agréger les différentes valeurs. La spécification de l'opérateur `CREATE` est "différée" (DEFFERED) (Meyer, 1988 ; Dorenbeck et Egenhofer, 1991), car elle dépend du problème considéré. `COMBINE` est similaire à l'opérateur `APPLY` proposé par Scholl et Voisard (1989) et l'opérateur

λ utilisé par Güting (1988). Le comportement de `COMBINE` dans la partie *axioms* correspond à l'opération d'addition classique.

Type : **map-layer**
set : `map-layer, gPoint, gLine, gPolygon, real`

syntax :
`MAKE name` $\rightarrow$ `map-layer`
`PUT-P map-layer` $\times$ `real` $\times$ `real` $\rightarrow$ `gPoint`
`PUT-L map-layer` $\times$ `gPoint` $\times$ `gPoint` $\rightarrow$ `gLine`
`PUT-Q map-layer` $\times$ `gPoint` $\times \cdots \times$ `gPoint` $\rightarrow$ `gPolygon`
`INTERSECT map-layer` $\times \cdots \times$ `map-layer` $\rightarrow$ `map-layer`
`UNION map-layer` $\times \cdots \times$ `map-layer` $\rightarrow$ `map-layer`

axioms :
m : `map-layer ;` $p, p_1, p_2, q_1, \cdots, q_n$ `:gPoint ;` l `: gLine ;` q `: gPolygon ;` v_1, v_2 `: real`

`PUT-P(`m, v_1, v_2`)`
`=` p`.MAKE(`v_1, v_2`)`

`PUT-L(`m, p_1, p_2`)`
`=` l`.MAKE(`p_1, p_2`)`

`PUT-Q(`$m, q_1, \cdots, q_n$`)`
`=` q`.MAKE(`$q_1, \cdots, q_n$`)`

FIG. 5.8 – Spécification formelle du type de données `map-layer`

Type : **aOperator**
set : `aOperator, value`

syntax :
`CREATE DEFERRED` $\rightarrow$ `aOperator`
`COMBINE value` $\times$ `value` $\times \cdots \times$ `value` $\rightarrow$ `value`

axioms : x, y, z `: value`

`COMBINE(`x`,`y`)`
`=` x`+`y

`COMBINE(`x`,COMBINE(`y`,`z`))`
`=`x `+ COMBINE(`y`,`z`)`

FIG. 5.9 – Spécification formelle de type de données `aOperator`

5.4.6 Spécification de type de données `dTable`

Une *table de décision* est une méthode permettant de spécifier les comportements des opérateurs, particulièrement ceux dont le comportement peut être décrit par une série de règles. Elle comporte deux parties (Dorenbeck et Egenhofer, 1991) : (i) un ensemble de *conditions* qui doivent être satisfaites simultanément, et (ii) les *actions*[7] correspondantes. Les tables de décisions sont naturellement représentées sous forme d'un tableau avec l'ensemble de conditions dans la partie supérieure et les actions dans la partie inférieure.

[7]Il faut distinguer entre le terme "action" associé avec une table de décision du même terme utilisé en analyse multicritère et qui correspond à un objet de décision.

Illustrons le concept de table de décision par un exemple repris de Dorenbeck et Egenhofer (1991). Cet exemple permet de formaliser l'opérateur `localRating` introduit par Tomlin (1990) dans son algèbre. L'opérateur `localRating` permet d'affecter à un n-uplet des valeurs une nouvelle valeur. Supposons, par exemple, que les règles suivantes sont utilisées pour combiner deux thèmes relatifs à l'*altitude* et au *type de végétation* pour générer une carte nommée *windExposure* indiquant le niveau d'exposition au vent :

- Si l'altitude est supérieure ou égale à 290 et le type de végétation est 0, alors le niveau d'exposition au vent vaut 1 ;
- Si l'altitude est supérieure ou égale à 290 et les types de végétation sont 1-3, alors le niveau d'exposition au vent vaut 2 ;
- Si l'altitude est inférieure à 290 et les types de végétation sont 0, 1, ou 3, alors le niveau d'exposition au vent vaut 3 ;
- Si l'altitude est inférieure à 290 et le type de végétation est 2, alors le niveau d'exposition au vent vaut 4.

Ces règles peuvent être modélisées par la table de décision suivante :

altitude	≥ 290	≥ 290	< 290	< 290
type-végétation	0	$1 \vee 2 \vee 3$	$0 \vee 1 \vee 3$	2
windExposure	1	2	3	4

TAB. 5.1 – Exemple d'une table de décision

Nous désignons le type de données associé à une table de décision par `dTable`. La spécification de `dTable` est donnée pare la Figure 5.10. Chaque `dTable` possède deux opérateurs : `CREATE` et `ACTION`. Le premier permet d'"instancier" la table de décision. Le second permet de retourner l'action dont les conditions sont vérifiées. Dans cette figure, nous avons utilisé le type de données `bCondition` (*condition binaire*) qui est définit en terme de trois éléments : la variable à laquelle la condition est associée (`variable`), un opérateur binaire (`bOperator`) et la valeur se trouvant à droite de la condition (`right-side-value`) :

```
<variable><bOperator><right-side-value>
```

L'opérateur `CREATE` prend une liste de conditions et les actions correspondantes à ces conditions et génère une table de décision. Par exemple, la table de décision du Tableau 5.1 peut être crée comme suit :

```
CREATE(((≥ 290,=0),1),((≥ 290,=1∨ 2∨ 3),2),((<290,=0∨ 1∨ 3),3),((<290,=2),4))
```

L'opérateur `ACTION` prend une liste de valeurs qui correspondent aux paramètres sur lesquels portent les conditions et renvoie l'action dont la partie condition est vérifiée. Étant donné que les conditions sont exclusives, l'opérateur `ACTION` s'arrête dès qu'une condition est vérifiée.
Dans cet exemple, les actions sont des constantes. Cependant, elles peuvent prendre la forme d'opérations mathématiques ou de relations binaires. Ces deux cas vont être illustrés plus loin dans ce chapitre.

Type : **dTable**
set : dTable, bCondition, value

syntax :

```
CREATE bCcondition × ··· × bCcondition × value ···
       bCcondition × ··· × bCcondition × value → dTable
ACTION value × value × ··· × value → value
```

axioms : $v_1, \cdots, v_m, a_1, \cdots, a_n$: value; $c_1^1, \cdots, c_1^m, \cdots, c_n^1, \cdots, c_n^m$: bCondition

CREATE
$=(((c_1^1, \cdots, c_1^m), a_1), \cdots, ((c_n^1, \cdots, c_n^m), a_n))$

ACTION$(v_1, \cdots, v_m)$
=If $c_1^1, \cdots, c_1^m$ then a_1
else
$[\cdots$
[if $c_{n-1}^1, \cdots, c_{n-1}^m$ then a_{n-1}else a_n]
]

FIG. 5.10 – Spécification formelle du type de données `dTable`

5.4.7 Spécification du type de données `aList`

Dans ce paragraphe, nous rappelons brièvement les principaux opérateurs de type de données *liste*, noté `aList` ci-après, relatives à la structure de données qui porte le même nom. La spécification formelle de ce TAD est donnée par la Figure 5.11. Cette figure ne contient pas la partie *axioms* mais une description détaillée de tous les opérateurs associés à un TAD `aList` peut être trouvée dans, par exemple, Cormen et *al*. (2001).

Type : **aList**
set : aList, value, aPosition

syntax :

```
INSERT aList × value × aPosition → aList
LOCALIZE value × aList → aPosition
GET aPosition × aList → value
FIRST aList → aPosition
RAZ aList → aList
REMOVE aPosition × aList → aList
NEXT aPosition × aList → aPosition
BEFORE aPosition × aList → aPosition
```

axioms :

$\cdots$

FIG. 5.11 – Spécification formelle du type de donnée `aList`.

Nous commentons seulement les opérateurs dont nous aurons besoin par la suite. Il s'agit principalement de l'opérateur `INSERT` et de l'opérateur `GET`. Le premier prend en entrée le nom d'une liste, la valeur à insérer, et la position dans laquelle cette valeur doit être insérée. Il renvoie la liste ainsi modifiée. Le deuxième opérateur permet d'extraire un élément de la liste dont la position est fournie en entrée. Une description très succincte des autres opérateurs est la suivante :

– LOCALIZE : renvoie la position d'un élément dans la lsite,
– FIRST : renvoie le premier élément dans la liste,
– RAZ : vide la liste,
– REMOVE : enlève un élément de la liste,
– NEXT : renvoie le successeur d'un élément donné,
– BEFORE : renvoie le prédécesseur d'un élément donnée.

5.5 Spécification formelle de l'algèbre

Dans la suite nous présentons les spécifications formelles de type de données de DMA. Notons qu'une version initiale de DMA a été présentée dans Chakhar et Mousseau (2006a). Une deuxième version révisée paraîtra dans Chakhar et Mousseau (2006b).

5.5.1 Spécification de type de données sUnit

Le type de données le plus élémentaire dans DMA est l'*unité spatiale*, noté par sUnit. La spécification de sUnit est donnée dans la Figure 5.12. Étant donné qu'une unité spatiale est un objet géographique polygonal, le type de données sUnit possède tous les opérateurs associés au type de données gPolygon. Tous ces opérateurs gardent la même syntaxe et la même spécification.
Par rapport à gPolygon, le type de données sUnit possède plusieurs autres opérateurs qui sont dédiés à la modélisation multicritère. Le premier opérateur est ASSIGN qui permet d'initialiser la performance de sUnit par rapport à un critère donné en paramètre. L'opérateur ASSIGN est une *fonction cachée* (*hidden function*) (Chan et White, 1987) qui signifie qu'il ne fait pas partie de l'algèbre mais qu'il sert à la spécification uniquement. L'opérateur SCORE permet de retourner la performance d'une unité spatiale pour un critère donné.
Plusieurs autres opérateurs sont également associés au type de données sUnit. Il s'agit de : PCONCORDANCE, CONCORDANCE, PDISCORDANCE, DISCORDANCE et SIGMA. Ces opérateurs permettent d'implémenter le modèle de classification multicritère ELECTRE TRI. Ils servent à l'étape de classification multicritère du processus de génération d'une carte décisionnelle (cf. Annexe 4.4.1.2). L'opérateur PCONCORDANCE prend en entrée la performance $g_j(u)$ d'une unité spatiale u et la performance $g_j(b_h)$ de la limite de la catégorie b_h, pour le critère g_j ; et retourne l'*indice de concordance partielle* $S_j(u, b_h)$ associé à l'assertion uSb_h. PCONCORDANCE correspond à l'Équation (C.1) de l'algorithme SIGMA (cf. §C). L'opérateur CONCORDANCE permet de calculer l'*indice de concordance globale* $S(u, b_h)$ pour l'assertion uSb_h. Il correspond à l'Équation (C.2) donné dans l'algorithme SIGMA. Les opérateurs PDISCORDANCE et DISCORDANCE permettent de calculer les *indices de discordances partielles* $ND_j(u, b_h)$ et l'*indice de discordance globale* ND. Ils correspondent, respectivement, à l'Équation (C.3) et à l'Équation (C.4) dans l'algorithme SIGMA.
Les spécifications de PCONCORDANCE et de PDISCORDANCE nécessitent l'utilisation d'une *table de décision* (cf. 5.4.6). Les structures générales des tables de décision associées à ces deux opérateurs sont respectivement donnés dans les Tableau 5.2 et Tableau 5.3. Les paramètres q, p et v utilisés dans les Tableaux 5.2 et 5.3 représentent les attributs qThreshold, pThreshold, et vThreshold associés au critère d'évaluation considéré. Ils correspondent

respectivement aux seuils d'indifférence, de préférence et de veto. Les valeurs v_1 et v_2 correspondent aux performances de l'unité spatiale et à la limite de la catégorie qui sont obtenues en utilisant l'opérateur SCORE. Toutes ces valeurs sont fournies comme paramètres pour l'opérateur ACTION. Ce dernier parcourt les différentes conditions en allant de gauche à droite et déclenche l'action (qui correspond ici au calcule des indices de concordance ou de discordance) pour laquelle les conditions sont vérifiées.

Type : **sUnit**
set : map-layer, aCriterion, cFamily, sUnit, aProfile, pSet, lSet, dTable, real, value, Boolean

syntax :

ADJACENT	sUnit × sUnit → boolean
ASSIGN	sUnit × aCriterion × value → sUnit
SCORE	sUnit × aCriterion → real
PCONCORDANCE	value × value × aCriterion → real
CONCORDANCE	sUnit× aProfile × cFamily → real
PDISCORDANCE	value × value × aCriterion → real
DISCORDANCE	sUnit × aProfile × cFamily → real
SIGMA	sUnit × aProfile × cFamily → real
OUTRANK	sUnit × aProfile × cFamily × value → boolean

axioms :

u : sUnit ; h : aProfile ; f : cFamily ; g : aCriterion ; t_1,t_2,t_3 : dTable ; v : value

PCONCORDANCE(u,h,g)
=t_1.action(SCORE(u,g),SCORE(h,g),g)

CONCORDANCE(u,h,f)
=[$\sum_{g \in f}$ PCONCORDANCE(u,h,g) * g.cWeight] / [$\sum_{g \in f}$ g.cWeight]

PDISCORDANCE(u,h,g)
=t_2.action(SCORE(u,g), SCORE(h,g),g)

DISCORDANCE(u,h,f)
= $\prod_{g \in f \wedge (\text{PDISCORDANCE}(u,h,g) > \text{CONCORDANCE}(u,h,g))}$
[1-PDISCORDANCE(u,h,g)] / [1-CONCORDANCE(u,h,g)]

SIGMA(u,h,f)
= CONCORDANCE(u,h,f)* DISCORDANCE(u,h,f)

OUTRANK(u,h,f,v)
=t_3.action(u,h,SIGMA(u,h,f),SIGMA(h,u,f),v)

FIG. 5.12 – Spécification formelle de type de données sUnit.

$v_1 - v_2$	$\geq p$	$\leq q$	$< p \wedge > q$
ACTION	0	1	$[p - v_1 + v_2]/[p - q]$

TAB. 5.2 – Table de décision associée avec l'opérateur PCONCORDANCE

$v_2 - v_1$	$\geq p$	$\leq v$	$< v \wedge > p$
ACTION	0	1	$[v - v_1 + v_2]/[v - q]$

TAB. 5.3 – Table de décision associée avec l'opérateur PDISCORDANCE

Les opérateurs CONCORDANCE et DISCORDANCE prennent en entrée une unité spatiale u, un profile h et une famille f de critères ; et retournent les indices de concordance et de discordance globaux. L'attribut cWeight utilisé dans la spécification de l'opérateur CONCORDANCE correspond au poids du critère d'évaluation considéré (cf. §5.3).
L'opérateur SIGMA permet de calculer l'*indice de crédibilité*. Il correspond à l'Équation (C.5) de l'algorithme SIGMA. L'opérateur OUTRANK permet de déterminer la situation de préférence de l'unité spatiale par rapport à la limite de la catégorie. Comme illustré dans l'Annexe C, quatre situations de préférences sont possibles lorsqu'on compare une unité spatiale u et une limite b_h d'une catégorie : uIb_h, uPb_h, b_hPu ou uRb_h. L'opérateur OUTRANK utilise la table de décision illustrée par le Tableau 5.4. Notons que les paramètres u et b_h dans le Tableau 5.4 correspondent respectivement à l'unité spatiale et au profile de la catégorie qu'on cherche à comparer. Les paramètres v_1 et v_2 correspondent respectivement aux indices de crédibilité des assertions uSb_h et de b_hSu. Ils sont respectivement donnés par l'application de SIGMA(u, h, f) et SIGMA(h, u, f).
En plus de u, h, SIGMA(u, h, f) et SIGMA(u, h, f), l'opérateur ACTION prends également la valeur du seuil de coupe, λ. Il retourne la situation de préférence correspondante.

v_1	$\geq \lambda$	$\geq \lambda$	$<\lambda$	$< \lambda$
v_2	$\geq \lambda$	$< \lambda$	$\geq\lambda$	$< \lambda$
ACTION	uIh	uPh	hPu	uRh

TAB. 5.4 – Table de décision associée avec l'opérateur OUTRANK

5.5.2 Spécification du type de données decision-map

La Figure 5.13 présente la spécification du type de données decision-map. Trois opérateurs sont associés à ce type de données. L'opérateur MAKE permet de créer une *carte intermédiaire* **I** (cf. 4.4.1.1) comme une intersection d'un ensemble de cartes critères fournies en paramètres. decision-map hérite cet opérateur à partir de type de données map-layer (sa super-classe au sens de la modélisation orientée objet ; voir Figure 5.4).
L'opérateur CLASSIFY correspond à l'algorithm 2 (ASSIGNMENT) du Chapitre 4 (qui représente la version pessimiste de l'algorithme d'affectation d'ELECTRE TRI). Il permet d'affecter chaque unité spatiale de la carte intermédiaire **I** à une et une seule catégorie. CLASSIFY compare chaque unité spatiale par rapport aux limites des categories en allant de la meilleure catégorie à la plus mauvaise. Le processus s'arrête dès que l'unité spatiale surclasse la limite inférieure d'une catégorie.
L'opérateur GROUP prend en entrée une carte décisionnelle, decision-map, un opérateur d'agrégation, aOperator, dont la spécification est donnée dans §5.4.5, et génère une nouvelle carte décisionnelle en groupant toutes les unités spatiales adjacentes qui sont affectées à

la même catégorie. Il correspond à l'algorithme GROUPING (Λ) présenté dans le Chapitre 4. Dans la spécification de `GROUP`, nous avons utilisé l'opérateur `MERGE` qui permet de regrouper deux ou plusieurs unités spatiales adjacentes. Cet opérateur est le même opérateur (qui porte le même nom) associé au type de données `gPolygon` (cf. §5.4.3). Nous avons également eu appel à l'opérateur `ADJACENT` (associé également à `gPolygon`) pour vérifier si deux unités spatiales u_1 et u_2 sont adjacentes ou non.

Type : **desicion-map**
set : `map-layer, criterion-map, sUnit, cFamily, aOperator,aProfile, sProfiles`

syntax :

```
MAKE       criterion-map ×···× criterion-map → decision-map
CLASSIFY   decision-map × cFamily × sProfiles → desicion-map
GROUP      decision-map × cFamily × aOperator → decision-map
```

axioms :

d : decision-map ; $c_1, \cdots, c_m, g$: criterion-map ; f : ;cFamily ; v : value ;
h :aProfile ; b :sProfiles

MAKE($c_1, \cdots, c_m$)
=INTERSECT($c_1, \cdots, c_m$)

CLASSIFY(d, b, f)
= $\forall$ (u) ($u \in d$)
[$\forall$ (h) ($u \in b$) if OUTRANK(u, h, f,cLevel) then u.uClass $\leftarrow$ $h + 1$]

GROUP(d, op)
= $\forall$ $(u_1)(u_2)(u_1 \in d)(u_2 \in d)$ $\wedge$ ($u_1 <> u_2$)
[if ADJACENT(u_1, u_2) u_1.uClass = u_2.uClass then MERGE(d, u_1, u_2, op, f)]

FIG. 5.13 – Spécification formelle du type de données `decision-map`

5.5.3 Spécification du type de données `criterion-map`

La spécification du type de données `criterion-map` est donnée par la Figure 5.14. L'opérateur `MAKE` prend en entrée une *procédure* (cf. §5.2) et génère une carte critère. Par exemple, une carte critère qui représente "le niveau de la pollution souterraine" peut être générée (grossièrement) en utilisant la procédure suivante :

1. Utiliser le *modèle numérique de terrain* (MNT) pour définir une "carte pente".
2. Utiliser des images satellites pour générer une carte des "zones humides".
3. Utiliser des images satellites pour générer une carte des "zones de glissement".
4. Combiner les trois cartes précédentes pour générer la carte "niveau de la pollution souterraine".

L'opérateur `SET` permet de spécifier un paramètre de préférence dont le nom est précisé par `aParameter`. Ce dernier peut prendre une des valeurs suivantes : *weight*, *direction*, *indifference*, *preference*, ou *veto*.

Dans le paragraphe §4.3, nous avons remarqué que pour la construction d'une carte décisionnelle, il est nécessaire de transformer toutes les cartes non polygonales en cartes polygonales. Dans la spécification du type de données `criterion-map` dans la Figure 5.14, nous avons incorporé trois opérateurs de transformation des cartes : (i) `TIN` qui permet de générer une triangulation à partir d'un semi de points, (ii) `C-TIN` qui représente l'opération de *triangulation sous contrainte de Delaunay* (*constrained Delaunay triangulation*), et (iii) `THEMATIC-SLICING` qui permet de transformer un MNT en une carte thématique.
Dans les méthodes multicritères du type critère unique de synthèse, les critères sont souvent modélisés en termes d'objectifs et d'attributs (cf. 2.4.3). Dans ce cas, une carte critère représente la distribution spatiale d'un "attribut" qui mesure le degré de *satisfaction* d'un "objectif". Les opérateurs `ATTRIBUTE` et `OBJECTIVE` sont destinés à générer des cartes critères modélisées par les concepts d'objectifs et d'attributs.

```
Type : criterion-map
set : map-layer, criterion-map, cWeight, cDirection, qThreshold,
      pThreshold, vThreshold, aParameter, value, procedure
syntax :
MAKE               procedure → criterion-map
SET                criterion-map × aParameter × value → criterion-map
TIN                sample-points → map-layer
C-TIN              contours → map-layer
THEMATIC-SLICING   MNT → map-layer
ATTRIBUTES         map-layer × ··· × map-layer → attribute-map
OBJECTIVE          attribute-map × ··· × attribute-map → criterion-map
axioms :
c : criterion-map ; a :aParameter ; v : value
SET(c, a, v)   =c.a ← v
```

FIG. 5.14 – Spécification formelle du type de données `criterion-map`.

5.5.4 Spécification du type de données `pStructure`

Le type de données `pStructure` correspond à la notion de structure de préférence introduite dans le deuxième chapitre (cf. §2.4.11). En analyse multicritère, les structures des préférences sont mises en oeuvre via des fonctions critères. Une `pStructure` peut donc être associée à plusieurs paramètres de préférence. Le cas le plus général consiste à associer à `pStructure` deux paramètres de préférence : un seuil d'indifférence (`qThreshold`) et un seuil de préférence (`pThreshold`). Une telle structure permet de modéliser trois situations de préférence lors de la comparaison de deux actions a et b :

$$\begin{array}{lcl} a\mathtt{P}b & \Leftrightarrow & g(a) > g(b) + \mathtt{pThreshold} \\ a\mathtt{Q}b & \Leftrightarrow & g(b) + \mathtt{pThreshold} \geq g(a) > g(g) + \mathtt{qThreshold} \\ a\mathtt{I}b & \Leftrightarrow & g(b) + \mathtt{pThreshold} \geq g(a) \wedge g(a) + \mathtt{qThreshold} \geq g(b) \end{array}$$

Les symboles `P`, `Q` et `I` sont les relations binaires de *préférence stricte*, de *préférence faible* et d'*indifférence* (cf. §2.4.11). Toute structure de préférence `pStructure` peut complètement être définie en terme de sa *fonction caractéristique* (cf. §2.4.11). Par exemple, la structure de préférence définie ci-haut peut être associée avec la fonction caractéristique `S` suivante :

$$a\mathtt{S}b \Leftrightarrow a\mathtt{P}b \vee a\mathtt{Q}b \vee a\mathtt{I}.b$$

La Figure 5.15 présente la spécification formelle du type de données `pStructure`. Nous y distinguons cinq opérateurs : les opérateurs `P`, `Q` et `I` correspondent aux trois relations binaires qui portent les mêmes noms ; l'opérateur `R` correspond à une situation d'incomparabilité ; et l'opérateur `S` correspond à la fonction caractéristique.

Type : **pStructure**
set : pStructure, aAlter, sAlter, aCriterion, bRelation, value

syntax :
P aAlter × aAlter × aCriterion → bRelation
I aAlter × aAlter × aCriterion → bRelation
R aAlter × aAlter × aCriterion → bRelation
S aAlter × aAlter × aCriterion → bRelation

axioms :
a, b : aAlter ; g : aCriterion ; p : pStructure, s : sAlter

P(a, b, g)
= if SCORE(a, g) > SCORE(b, g) + g.pThreshold then aPb else
¬(aPb)

Q(a, b, g)
= if [SCORE(b, g) + g.pThreshold ≥ SCORE(a, g)]∧
[SCORE(a, g) > SCORE(b, g) + g.qThreshold] then aQb else ¬(aQb)

I(a,b,g)
= if [SCORE(b, g) + g.qThreshold ≥ SCORE(a, g)] ∧
[SCORE(a, g) + g.qThreshold ≥ SCORE(b, g)] then aIb else (aIb)

R(a,b,g)
= ¬ P(a, b, g) ∧ ¬ I(a, b, g) ∧ ¬ P(b, a, g) ∧ ¬ I(b, a, g)

S(a, b, g)
= if (P(a, b, g) ∨ I(a, b, g)) then aSb else ¬(aSb)

FIG. 5.15 – Spécification formelle du type de données `pStructure`

5.5.5 Spécification du type de données `sd-model`

Le type de données `sd-model` est une agrégation (au sens de la modélisation orientée objet comme nous l'avons déjà mentionné) d'au moins deux cartes critères, d'une carte décisionnelle et d'une procédure d'agrégation multicritère. Il est utile de rappeler que si la carte décisionnelle n'est pas adaptée au problème considéré, alors une ou plusieurs cartes d'actions sont utilisées. Dans la suite, nous supposons qu'une carte décisionnelle est utilisée.
La spécification de `sd-model` est donnée dans la Figure 5.16. Les trois premiers opérateurs `P-ALTERNATIVE`, `L-ALTERNATIVE` et `Q-ALTERNATIVE` sont destinés à la génération des actions ponctuelles, linéaires et polygonales, respectivement. Ces trois opérateurs prennent en entrée une carte décisionnelle et utilisent les solutions données en §4.5 pour générer l'ensemble d'actions ponctuelles (`pAlters`), linéaires (`lAlters`) ou polygonales (`qAlters`).
Dans la modélisation multicritère, il est parfois nécessaire d'éliminer certaines actions qui présentent quelques aspects indésirables. Ces restrictions sont nommées *contraintes* ou *critères d'admissibilité*. Les critères d'admissibilité départagent l'ensemble des actions en deux caté-

gories : les *actions acceptables* (ou *faisables*) et les *actions non acceptables* (ou *non faisables*). L'opérateur FEASIBLE associé au type de données sd-model permet de générer l'ensemble des actions "acceptables". Il prend en entrée un ensemble d'actions (aSet) et une contrainte de la forme :

<aCriterion><bOperator><right-side-value>

où aCriterion est un critère d'évaluation, bOperator est un opérateur de comparaison, et right-side-value est une valeur cardinale ou ordinale. Deux exemples de contraintes sont : "pente < 0.3" ou "altitude > 290". Lorsque plusieurs critères d'admissibilité sont nécessaires, nous pouvons les modéliser par une série d'opérations avec FEASIBLE dont chacune prendra le résultat de l'opération précédente en entrée.
L'opérateur EVALUATE correspond à l'algorithme 3 (PARTIAL-EVALUATION) du Chapitre 4. Il prend en entrée une action (linéaire ou polygonale), un critère d'évaluation et deux mécanismes d'agrégation[8] ; et renvoie l'évaluation partielle de l'action par rapport au critère donné en paramètre. Notons que les unités spatiales $u_1, \cdots, u_r$ dans la spécification de l'opérateur EVALUATE sont les unités spatiales composant l'action. Le nombre r varie d'une action à une autre.
L'opérateur SCORE renvoie la performance d'une action par rapport à un critère donné. L'opérateur P-VECTOR renvoie la performance d'une action par rapport à une famille de critères cFamily. Le résultat de cet opérateur est stocké dans une liste. La spécification du type de données liste, notée aList, a été présentée dans §5.4.7.
L'opérateur PAYOFF prend en entrée un ensemble d'actions aSet et une famille de critères, cFamily, et génère le tableau de performance (cf. §2.4.6), noté pTable. Ce dernier est simplement une matrice où les lignes et les colonnes représentent respectivement les actions et les critères d'évaluation. L'intersection d'une ligne et d'une colonne représente l'évaluation d'une action par rapport à un critère. L'opérateur DOMINATE correspond à la *relation de dominance* Δ souvent utilisée en analyse multicritère (cf. §2.4.9). Il prend en entrée un ensemble d'actions et retourne l'ensemble d'actions non dominées.
L'opérateur QUANTIFY prend comme paramètres un tableau de performance et une échelle de mesure et retourne un tableau de performance dans lequel tous les critères sont du type quantitatif. Cet opérateur correspond à la fonction de quantification présentée dans le deuxième chapitre (cf. §2.4.7)
L'opérateur NORMALIZE prend en entrée un ensemble d'actions, une famille de critères et une procédure de normalisation (cf. §2.4.8), nProcedure. Il renvoie un ensemble d'actions dont les performances sont exprimées selon la même échelle de mesure. La spécification de nProcedure n'est pas donnée dans ce document mais elle est similaire à celle de l'opérateur aOperator (cf. §5.4.5). Étant donné l'existence de différentes procédures de normalization (cf. Chap. 2), la spécification de l'opérateur CREATE de nProcedure est "différée".
L'opérateur AGGREGATE utilise une procédure d'agrégation multicritère (PAMC) (c.f.§2.4.14) afin d'agréger les différentes évaluations partielles en une évaluation globale. Les PAMC sont associées au type de données mcap dont la spécification est donnée dans le paragraphe qui suit. Le résultat de l'opérateur AGGREGATE dépend de la PAMC utilisée. Ce résultat peut être un ordre sur les actions, une affectation, etc.

[8] Qui sont notés Υ^j et Θ^j dans le quatrième chapitre.

Type : **sd-model**
set : map-layer, decision-map, criterion-map, sUnit, uSet, cFamily, aAlter, pAlters, lAlters, sAlters, aProcedure, nProcedure, aOperator, pTable, aScale

syntax :

P-ALTERNATIVE	decision-map × aCriterion × bOperator × value → pAlters
L-ALTERNATIVE	desicion-map × sUnit × sUnit → lAlters
Q-ALTERNATIVE	desicion-map × aConstraint × aConstraint → aAlters
EVALUATE	aAlter × cFamily × aOperator → aAlter
SCORE	aAlter × aCriterion → real
P-VECTOR	aAlter × cFamily → aList
PAYOFF	aSet × cFamily → pTable
CONSTRAINT	sAlters × aCriterion × bOperator × value → sAlters
DOMINATE	sAlters × cFamily → uSet
QUANTIFY	pTable × aScale → pTable
NORMALIZE	sAlters × cFamily × nProcedure → decision-map
AGGREGATE	decision-map × cFamily × aProcedure → decision-map
CHOICE	aSet × pStructure × cFunction → aSet
SORT	aSet × sCatogries × sProfiles → aSet
RANGE	aSet × rdirection → aSet

axioms :

m, r : decisision-map ; u :sUnit ; f : cFamily ; a : aProcedure ; n : nProcedure ; s :aSet ;
b :pStructure ; c :cFunction ; x : aAlter ; y :sAlters ; v, l, m :aList

P-ALTERNATIVE(d, g, op, v)
$=\{u : u \in d \wedge$ SCORES(u, g) $op\ v\ \}$

L-ALTERNATIVE (d, s, e)
$=\{u_i : u_i \in d \wedge u_1 = s \wedge u_n = e$ ADJACENT(u_i, u_{i+1})$\}$

CONSTRAINT(y, g, op, v)
$=\{x : x \in y \wedge$ SCORES(x, g) $op\ v\ \}$

EVALUATE(x, f, op)
$= \forall(g)(g \in f)$[ASSIGN(u, g, op.combine(SCORE(u_1, g),$\cdots$,SCORE(u_r, g)

P-VECTOR(x, f)
$= i \leftarrow 1$
$(g)(g \in f)$
[insert(v,SCORE(x, g),i)
$i \leftarrow i + 1$]

PAYOFF(s, f)
$=\forall\ (a)\ (a \in s)\ m$.insert(P-VECTOR($a, f$))

DOMINATE(y, f)
$= \{x : x \in y \wedge (x')(x' \in y)$
$[\forall(g)(g \in f)$ SCORE(x, g) $\geq$ SCORE(x', g)$] \wedge$
$[\exists(g')(g' \in f)$ SCORE(x', g') > SCORE(x, g')$]$
$\}$

NORMALIZE(y, f, n)
$=\forall(x)\forall(g)(x \in y)(g \in f$
SCORE(x, g) $\leftarrow n$.combine(SCORE(x_1, g),$\cdots$,SCORE(x_r, g))

AGGREGATE(x, f, o)
$= o$.combine(P-VECTOR(x, f))

CHOICE(s,p,f)
$= \{a \in s : p$.S$(a, b, g)\forall b \in s\forall g \in f\}$

RANGE(s, p, f)
$= i \leftarrow 1$
While $s <> \emptyset$
[insert(l,CHOICE(s, p, f),i)
$i \leftarrow i + 1$
$s \leftarrow s \backslash$ GET($i - 1, l$)

] SORT(s, b, p, f)
$= \forall(x)(x \in s)$
$[\forall(h)(u \in b)$
if p.S(a, h, g) then insert($l, x, h + 1$)
]

FIG. 5.16 – Spécification formelle du type de données `sd-model`

Les trois opérateurs `CHOICE`, `RANGE` et `SORT` correspondent aux trois problématiques de choix, de rangement et de tri déjà mentionnées dans les chapitres précédents. L'opérateur `CHOICE` peut être mis en oeuvre via une fonction de choix. Une fonction de choix `C` est une

fonction qui associe à un ensemble B, un sous-ensemble C(B) de B. Étant donné une structure de préférence sur l'ensemble des actions A, on peut lui associer une fonction de choix. Par exemple, nous pouvons associer la fonction de choix suivante à la structure de préférence présentée dans le paragraphe précédent :

$$\mathtt{C}(\mathtt{B}) = \{a \in \mathtt{B} : a\mathtt{S}b, \forall b \in \mathtt{B}\}.$$

D'autres fonctions de choix peuvent également être utilisées comme par exemple : C(B)=$\{a \in \mathtt{B} : \neg\exists b \in \mathtt{B} : b\mathtt{P}a\}$. La spécification de l'opérateur CHOICE donnée dans la Figure 5.16 utilise la fonction de choix définie précédemment. Il prend en entrée un ensemble d'actions, une structure de préférence et une famille de critères. Il renvoie l'ensemble d'actions vérifiant la fonction de choix S associée à la structure de préférence.
L'opérateur RANGE permet d'établir un *pré-ordre partiel* sur l'ensemble d'actions A. Un pré-ordre partiel consiste en (i) un ensemble de classes d'équivalences et (ii) une relation d'ordre sur ces classes. RANGE peut donc être mis en oeuvre via une série d'opérateurs CHOICE en utilisant une série de fonctions de choix de la forme suivante :

$$\mathtt{C}(\mathtt{B}) = \{a \in \mathtt{B} : a\mathtt{P}b, a\mathtt{I}b, b \in \mathtt{B}\}.$$

À chaque étape i, RANGE retourne les meilleures actions dans l'ensemble $\mathtt{B}^i$ où $\mathtt{B}^i$=$\mathtt{B}\backslash\mathtt{B}^{i-1}$; et $\mathtt{B}^1$=B. Dans la première étape, la fonction de choix est appliquée à toutes les actions dans B. Les actions non sélectionnées dans l'étape i seront l'entrée de l'étape $i+1$ et ainsi de suite jusqu'à l'examen de toutes les actions. Dans la Figure 5.16, le résultat de RANGE est une liste ordonnée de classes d'équivalence. Les opérateurs INSERT et GET sont ceux de type de données aList. Ils sont utilisés pour insérer et extraire les actions dans et à partir d'une classe d'équivalence (identifiée par sa position i dans la liste).
Comparé aux opérateurs CHOICE et RANGE, l'opérateur SORT possède une caractéristique importante : les deux premiers procèdent par comparaison par paire (chaque action est comparée à toutes les autres) alors que le dernier considère chaque action indépendamment des autres. Plus précisément, SORT affecte un ensemble d'actions à un ensemble des catégories ordonnées et définies en termes de p profils limites. La mise en oeuvre de SORT est similaire à celui de l'opérateur CLASSIFY associé au type de données decision-map donné en §5.5.2. La seule différence est que CLASSIFY est associé à la procédure de classification multicritère ELETCTRE TRI alors que SORT est de portée plus générale et peut être utilisé avec d'autres méthodes de classification multicritère.

5.5.6 Spécification du type de données mcap

Ce type de données correspond aux procédures d'agrégation multicritère (PAMC). Chaque PAMC sera traduit sous forme d'une procédure (au sens de l'Algèbre des cartes). Les entrées pour les différentes PAMC sont les suivantes :

- aSet : un ensemble d'actions potentielles,
- cFamily : une famille de critères,
- pParameters : un ensemble des paramètres de préférences,
- aProblematic : la problématique de décision adoptée.

La Figure 5.17 contient la spécification formelle de type de données `pamc`. Elle contient quelques PAMC connues. Le résultat dépend de la PAMC :

- un ordre (ou pré-ordre) complet ou partiel (`anOrder`) défini sur les différentes actions. C'est le cas avec les méthodes MAUT ou AHP.
- les indices de crédibilité (`cIndexes`) relatifs à toutes les actions comparées deux à deux. C'est le cas avec la famille de méthodes ELECTRE.

La partie *axioms* de la Figure 5.17 contient une spécification très simplifiée de la méthode ELECTRE III. Nous y avons fait appel à l'opérateur `OUTRANK` dont la spécification est similaire à l'opérateur portant le même nom et associé avec le type de données `sUnit`.

```
Type : mcap
set : aSet, cFamily, pParameters, cIndexes, anOrder
syntax :
ELECTRE-I     aSet × cFamily × pParameters → cIndexes
ELECTRE-III   aSet × cFamily × pParameters → cIndexes
ELECTRE-IV    aSet × cFamily × pParameters → cIndexes
ELECTRE-TRI   aSet × cFamily × pParameters → cIndexes
MUAT          aSet × cFamily × pParameters → anOrder
AHP           aSet × cFamily × pParameters → anOrder
axioms :
a, b : anAlter ; f : cFamily ; s :aSet ; p :pParameters ; cl :real

ELECTRE-III(s, f, p, cl)
=
∀a, b ∈ s OUTRANK(a, b, f, p, cl)
```

FIG. 5.17 - Spécification formelle du type de données mcap

5.6 Vers une implémentation orientée objet

Dans cette section nous proposons une modélisation orientée objet de DMA. Signalons d'abord qu'il existe différentes possibilités pour incorporer une algèbre dans un SIG (Egenhofer et Bruns, 1995 ; Bruns et Egenhofer, 1997) : (i) utilisation de la ligne de commande (*commande-line*). *Exemples* : le module GRID d'Arc/Info, le module MGE (Modular GIS Environment) d'Intergraph, etc. ; (ii) utilisation de la programmation procédurale. *Exemple* : ArcGIS d'ESRI qui supporte le langage de programmation procédurale VBA, etc. ; (iii) utilisation d'un langage de script. *Exemples* : Avenue d'ArcView, le macro-langage AML d'Arc/Info, etc. ; (iv) utilisation d'un système de menus et d'interfaces. *Exemples* : module Map Algebra d'Intergraph, IRISSI, ArcTools d'ESRI, etc. ; et utilisation d'un diagramme de flux. *Exemples* : Graphic Map Algebra (Kirby et Pazner 1990), IMAGINE Model Maker d'ERDAS, ModelBuilder d'ArcGIS, etc.
Chacune de ces approches a ses avantages et ses inconvénients ; et pour en choisir une il est nécessaire de faire un compromis entre la simplicité, la convivialité et la capacité à supporter la modélisation complexe. Néanmoins, la plupart des SIG commerciaux récents offrent toutes ces possibilités.
Par ailleurs, cette distinction est significative surtout du côté de l'utilisateur puisque ; du point de vue technique, toutes ces approches se ramènent, plus au moins, à la programmation informatique. Dans le cadre de cette thèse, nous avons opté pour une modélisation orientée objet.

Nous pensons qu'une telle modélisation est un choix bien adapté au contexte spatial pour au moins les deux raisons suivantes : (i) les travaux récents dans la conception et la modélisation des données spatiales s'orientent de plus en plus vers l'approche orientée objet (see, e.g., Couclelis, 1992 ; Scholl et Voisard, 1992 ; Pires et *al*. 1993 ; Bauzer-Medeiros et *al*., 1994 ; Peloux et Rigaux, 1995 ; Leung et *al*., 1999 ; Cova et Goodchild, 2002) et (ii) l'approche orientée objet semble être en accord avec la perception humaine de l'espace géographique qui est souvent vu comme "peuplé" d'objets.
Ayant établi ce choix, dans la suite de cette section, nous donnons les définitions de quelques types de données et de quelques opérateurs en nous basant sur la syntaxe du C++. Intuitivement, chaque type de données dans DMA sera défini comme une classe et les opérateurs qui lui sont associés seront définis comme des méthodes associées à cette classe. Les Figures 5.18-5.21 illustrent les définitions génériques de types données `gPoint`, `map-layer`, `criterion-map` et `sUnit`. Nous commentons brièvement chacune d'entre elles. Notons d'abord que les "constructeurs" associés avec les différentes classes ci-après sont l'implémentation de l'opérateur `MAKE`.
La Figure 5.18 présente une partie de la définition de la classe `gPoint`. Elle montre également les définitions des trois méthodes relatives au constructeur de la classe `gPoint` et aux opérateurs `ISEQUAL` et `DISTANCE-PP` associés avec `gPoint`.

```
class gPoint{
//...
public :
  double X;
  double Y;
  gPoint(double,double);
  bool ISEQUAL(gPoint);
  double DISTANCE-PP(gPoint);
//...
};

gPoint : :gPoint(double i, double j){
  this->X =i; this->Y = j;
}

bool gPoint : :ISEQUAL(gPoint p){
  if (this->X == p.X && this->Y == q.Y) return true;
  else return false;
};

double gPoint : :DISTANCE-PP(gPoint p){
  return sqrt(((this->X - p.X) * (this->X - p.X)) +
         ((this->Y - p.Y) * (this->Y - p.Y)));
};
```

FIG. 5.18 – Définition de la classe `gPoint`

La Figure 5.19 présente une partie de la définition de la classe `map-layer`. L'image de type de donnés `map-layer` est définit comme une classe. L'image peut être définit comme une matrice lorsque la carte est de type *raster* ou comme une collection d'objets géographiques lorsque la carte de de type vecteur. La Figure 5.19 contient également le constructeur de la classe `map-layer`. Il permet de créer un plan d'information (vide au départ, mais il peut être peuplé avec les méthodes `PUT-P`, `PUT-L` et `PUT-Q`). La fonction `IntializeTheMap` appelée dans le constructeur permet d'initialiser l'image de la carte.

```
class map-layer{
private :
  string name;
  double rSystem;
  double mScale;
  image mImage;
  //...
public :
  map-layer(string, double, double);
  gPoint PUT-P(double, double);
  gLine PUT-L(gPoint, gPoint);
  gPolygon PUT-Q(pSet);
  map-layer INTERSECT(map-layer);
//...
};

map-layer : :map-layer(string aName, double rs, double ms){
  this->mImage=IntializeTheMap();
  this->name=aName;
  this->rSystem = rs;
  this->mScale = ms;
};

class image{
//...
image : :image()
};
```

FIG. 5.19 – Définition de la classe `map-layer`

La Figure 5.20 présente une partie de la définition de la classe `criterion-map`. Cette figure contient également le constructeur de la classe et la méthode SET qui correspond à l'opérateur portant le même. Comme nous pouvons voir sur la Figure 5.20, le constructeur de la classe `criterion-map` utilise la fonction[9] suivante :

[9]Nous avons tiré cette fonction d'un exemple donné en Câmara et *al*. (1994).

```
SLICE((WEIGHT(sol-map, wTable)* 0.3 + (1/SLOPE(mnt-map)*0.7)),sTable)
```

Cette fonction utilise trois autres fonctions :

- `WEIGHT` : permet de transformer une carte du type de sol (*soils map*) en une carte pondérée du type de sol (*weighted soils map*). L'entrée à cet opérateur est le plan d'information `sol-map` et la table de décision donnée dans le Tableau 5.5.
- `SLOPE` : permet de générer un plan d'information représentant la pente. L'entrée est le modèle numérique de terrain (`mnt-map`).
- `SLICE` : permet de combiner les deux plans d'information obtenus par l'application des deux opérateurs précédents (i.e. `WEIGHT` et `SLOPE`) pour générer une carte de convenance dans laquelle le degré de convenance varie entre 0.0 et 1.0 en fonction des données en entrée. `SLICE` prend en paramètre la table de décision `sTable` dont la description est donnée dans le Tableau 5.6. La valeur du paramètre "weight-slope" associé à cette table de décision est donnée par :

  ```
  WEIGHT(sol-map, wTable)* 0.3) + (1/SLOPE(mnt-map)*0.7)
  ```

```
class criterion-map : public map-layer{
private :
float cWeight;
float qThreshold;
float pThreshold;
float vThreshold;
//...
public :
  criterion-map(dTable, dTable, map-layer, map-layer);
  criterion-map SET(char, float);
  image SLICE(double, dTable);
  double WEIGHT(map-layer,map-layer);
  double SLOPE(map-layer);
//...
};
criterion-map : :criterion-map(dTable wTable, dTable sTable, map-layer sol-map,
map-layer mnt-map){
this->mImage= SLICE(WEIGHT(sol-map, wTable)* 0.3 + (1/SLOPE(mnt-map)*0.7)),sTable);
};
criterion-map criterion-map : :SET(char type, float value1, float value2, float
value3){
if (type=='q') this->qThreshold=value1;
if (type=='p') this->pThreshold=value2;
if (type=='v') this->vThreshold=value3;
};
```

FIG. 5.20 – Définition de la classe `criterion-map`

type-of-sol	$= Lg$	$= Aq$	$= Le$
ACTION	0.2	0.3	0.7

TAB. 5.5 – Table de décision `wTable` associée avec la fonction `WEIGHT`

weight-slope	$in[0.0, 0.5]$	$[0.5, 0.8]$	$[0.8, 1.0]$
ACTION	unsuitable	possible	recommended

TAB. 5.6 – Table de décision `sTable` associée avec la fonction `SLICE`

La Figure 5.21 donne une partie de la définition de la classe `sUnit` ainsi que celles de ses méthodes `PCONCORDANCE`, `CONCORDANCE` et `SIGMA`.

```
class sUnit :public gPolygon{
//...
public :
  sUnit ASSIGN(aCriterion,value);
  bool ADJACENT(sUnit);
  real PCONCORDANCE(value,value,aCriterion);
  real CONCORDANCE(aProfile,cFamily);
  real PDISCORDANCE(value,value,aCriterion);
  real DISCORDANCE(aProfile,cFamily);
  real SIGMA(aProfile,cFamily);
//...
};
sUnit : :sUnit(pSet boundary){
  this->MAKE(boundary);
};
real sUnit : :PCONCORDANCE(aProfile h, aCriterion g){
 If (this->SCORE(g)- h.SCORE(g)>=h.pThreshold)
   returns 0;
 else if (this->SCORE(g)- h.SCORE(g)<= h.qThreshold)
       return 1;
     else
       return
        ((this->pThreshold - this->SCORE(g)+ h.SCORE(g))/
        (this->pThreshold - this->qThreshold));
};
```

FIG. 5.21 – Définition de la classe `sUnit` (*voir la suite sur la page suivante*)

```
class cFamily{
  aCriterion cName;
  double cWeight;
//...
public :
  integer size();
  friend class sUnit;
};
real sUnit : :CONCORDANCE(aProfile h, cFamily f){

 res =0;
 dom = 1;
 for (f : :size() i=0; i!=f.size();i++){
  res = this->PCONCORDANCE(h,f[i].cName) * f[i].cWeight;
  dom = dom + f[i].cWeight;
 }
 return res/dom;
};
real sUnit : :SIGMA(aProfile h, cFamily f){
 return  this->CONCORDANCE(h,c)* this->DISCORDANCE(h,c);
};
```

FIG. 5.21 – Définition de la classe `sUnit` (*suite*)

5.7 Regard sur l'algèbre proposée

Nous commençons par positionner l'algèbre proposée dans le cadre de ce travail de recherche. Pour ce faire, nous avons reporté dans les Tableaux 5.7 et 5.8 les correspondances entre : (i) les fonctions d'évaluation multicritère identifiées dans le deuxième chapitre et les opérateurs de l'algèbre, et (ii) les algorithmes de la méthodologie proposée dans le quatrième chapitre et les opérateurs de l'algèbre qui leur sont associés. Dans le premier tableau, nous avons listé les différentes fonctions d'évaluation multicritère (EMC) et pour chacune d'elles nous avons mis les différents opérateurs de DMA qui sont destinés à les implémenter. Certaines cellules du Tableau 5.7 sont encore vides car la version actuelle de DMA ne supporte pas toutes les fonctions d'EMC mais nous envisageons de les incorporer dans le futur. Remarquons également que plusieurs opérateurs peuvent être associés à la même fonction.
Le Tableau 5.8, quand à lui, présente la correspondance entre les différents algorithmes introduits dans le quatrième chapitre et les opérateurs de DMA correspondants.
À notre connaissance, il n'existe aucun article dans la littérature qui propose une algèbre dédiée explicitement à la cartographie décisionnelle multicritère. Il est donc impossible d'établir une comparaison effective entre DMA et d'autres algèbres. Nous nous contenterons dans la suite de cette section de présenter quelques travaux récents qui nous a été utile pour l'élaboration de notre algèbre.

Fonctions d'EMC	**Opérateurs DMA**
F1. Définition/Génération des actions	– `P-ALTERNATIVES` – `L-ALTERNATIVES` – `Q-ALTERNATIVES`
F2. Construction des cartes critères	Tous les opérateurs associé avec `criterion-map`
F3. Construction des cartes attributs	– `ATTRIBUTES` – `OBJECTIVE`
F4. Définition d'un programme mathématique	—
F5. Résolution d'un programme mathématique	—
F6. Génération du tableau de performance	– `SCORE` – `EVALUATE` – `P-VECTOR` – `PAYOFF`
F7. Quantification	– `QUANTIFY`
F8. Normalisation	– `NORMALIZE`
F9. Préanalyse de dominance	– `DOMINATE`
F10. Génération des actions acceptables	– `FEASIBLE`
F11. Elicitation des preferences	– `P` – `Q` – `I` – `R` – `S`
F12. Pondération des critères d'évaluation	L'opérateur `SET` associé avec `criterion-map`
F13. Agrégation	– `AGGREGATE`
F14. Analysis de sensibilité/de Robustesse	—
F15. Construction de la prescription	– `RANGE` – `CHOICE` – `SORT`

TAB. 5.7 – Correspondance entre les fonctions d'EMC et les opérateurs de DMA

Algorithme	**Opérateurs DMA**
Algorithme 1 (GROUPING ou λ)	`GROUPING`
Algorithme 2 (ASSIGNMENT)	`CLASSIFY`
Algorithme 3 (PARTIAL-EVALUATION)	`EVALUATE`
Algorithme 4 (GENERATE-L-ALTERNATIVES)	`L-ALTERNATIVES`
Algorithme 5 (GENERATE-Q-ALTERNATIVES)	`Q-ALTERNATIVES`
Algorithme (SIGMA)	`SIGMA`

TAB. 5.8 – Correspondance entre la méthodologie de cartographie décisionnelle et DMA

Dans l'article de Chan et White (1987), les auteurs proposent une implémentation orien-

tée objet de l'Algèbre des cartes de Tomlin. Cet article donne la spécification formelle de trois types de données ("map-layer", "topographic-layer", et "thematic-layer") et présente également la conception orientée objet de ces types de données. L'article contient quelques exemples d'utilisation et (en annexe) le fichier d'entête de la classe map-layer (issue du type de données "map-layer") en C++. Dans cet article les auteurs supposent une représentation matricielle et ne considèrent qu'un nombre limité de types de données.
Une algèbre des cartes graphique nommée GMA (pour Graphic Map Algebra) a été introduite par Kirby et Pazner (1990). Les opérations et les données sont alors représentées sous forme d'icônes et reliées entre eux par des diagrammes de flux. Les auteurs citent trois avantages offerts par GMA : simplicité d'utilisation, transparence et facilité de maintenance. Ils énumèrent également deux inconvénients : la limitation de l'espace disponible pour spécifier un modèle et la difficulté d'incorporer des structures de modélisation plus complexe comme les structures conditionnelles et les boucles offertes par les langages formelles.
Dorenbeck et Egenhofer (1991) commencent par proposer une définition générique de l'opération de superposition en se servant d'un type de données généralisé (*generalized value type*) qui permet de caractériser toutes les propriétés non spatiales d'une cellule du plan d'information. Les opérations de superposition des plans d'information se ramènent ainsi à des opérations arithmétiques classiques. Ensuite, ils proposent deux stratégies pour optimiser les opérations de superposition impliquant plusieurs plans d'information. La première stratégie consiste à identifier les séquences d'opérations qui se répètent plusieurs fois et à les remplacer par une seule opération équivalente en utilisant les propriétés mathématiques de commutativité, d'associativité et de distributivité. La deuxième stratégie consiste à intégrer les différentes opérations de superposition en une seule opération équivalente.
Câmara et *al*. (1994) proposent une algèbre destinée à la modélisation des phénomènes spatiaux continus. Dans cet article, la notion de la carte géographique est définie comme une fonction f d'un ensemble de localisation dans le domaine d'étude A vers un ensemble de valeurs V : $f : A \rightarrow V$. Selon la nature de V, trois types de cartes sont alors identifiées : (i) *carte thématique* où V est un ensemble d'éléments, nommés *geo-classes*, qui correspondent aux différents thèmes de la carte, (ii) les *modèles numériques du terrain* où V est l'ensemble des réels ; (iii) et les *images* où V est un ensemble discret contenant les valeurs associées au périphérique de sortie. Ensuite, les auteurs proposent une algèbre dont les types de données sont les trois types de cartes précédentes, auxquels ils associent quatre types d'opérations : (i) les opérations de *transformation* entre différents types de cartes, (ii) les opérations de type *ponctuel* similaires aux opérations locales dans l'Algèbre des cartes, (iii) les opérations de *voisinages* similaires aux opérations zonales dans l'Algèbre des cartes ; et (iv) les opérations qui agissent sur les *propriétés* descriptives d'une region ou d'un ensemble des localisations. L'algèbre a été utilisée pour le développement d'un langage de script, appelé SPRING, dédié à la modélisation spatiale.
Takeyama et Couclelis (1997) présentent une généralisation du formalisme de l'*automate cellulaire* (*cellular automata*) on y incorporant une généralisation mathématique de l'Algèbres des cartes, nommée Geo-Algebra. La représentation mathématique adoptée par Geo-Algebra a permis l'introduction de nouveaux concepts à l'Algèbre des cartes comme celui de "*meta-relational map*" où, au lieu d'une seule valeur ou un vecteur de valeurs, une carte entière, appelée "*relational map*", est affectée à chaque cellule. Les auteurs proposent également l'en-

richissement du formalisme classique des *automates cellulaires* par la définition des fonctions de voisinage et de transitions arbitraires et variables. Incorporés dans un SIG, ces deux outils offrent un environnement adéquat pour la modélisation de la dynamique spatiale (grâce à l'*automate cellulaire*) et pour la manipulation des données à référence spatiale (grâce à l'algèbre). Selon les auteurs, la "dynamique des cartes" (*map dynamics*) peut également servir pour modéliser d'autres comportements et phénomènes dynamiques qui n'étaient pas gérés par les SIG traditionnels comme l'adaptation, la conception (*design*) et l'apprentissage (*learning*).
Lin (1998) se base sur la théorie de *many stored algebra*[10] pour définir une famille de modèles géométriques classés en cinq groupes : "point", "line", "polygon", "network" et "raster". Dans ce papier, l'auteur commence par présenter les formes canoniques de ces modèles, les mécanismes de leur construction et les opérations qui lui sont associées. En se basant sur les homomorphismes entre entités géométriques et entités géographiques, l'auteur discute quelques points importants dans les modèles de données à travers le développement d'un système d'informations urbaines. Spécifiquement, il démontre l'utilité de l'algèbre proposée pour la représentation d'objets composés, la représentation multiple, le problème d'intégrité entre cartes relatives à différentes représentations, la formulation de requêtes et l'analyse spatiale, et la conversion raster-vecteur. Le papier contient une liste, relativement riche, d'opérations associées aux différents types de données proposés. Néanmoins, la description détaillée de ces opérations n'est pas fournie.
Pour renforcer les capacités analytiques du SIG, Stocks et Wise (2000) proposent d'y incorporer les fonctionnalités de la modélisation dynamique de l'*automate cellulaire* en se basant sur un langage de script nommé CALANG (développé par Stocks (1999)—cité et présenté brièvement dans Stocks et Wise (2000)). CALANG est une extension de l'Algèbre des cartes qui incorpore et généralise les concepts de l'*automate cellulaire*. En particulier, CALANG permet une représentation plus flexible—qui peut ainsi varier spatialement et temporellement—de la notion de *voisinage* que celle utilisée dans le formalisme standard de l'*automate cellulaire*. Les auteurs ont commencé par incorporer dans Arc/Info deux modèles[11] spatio-dynamique plus sophistiqués dédiés à l'analyse environnementale. Ils concluent que le SIG Arc/Info (plus précisément son environment GRID) ne permet pas d'exploiter toutes les potentialités de tels modèles. En revanche, les auteurs expliquent que CALANG, parce qu'il conjugue les concepts de l'Algèbre des cartes et de l'automate cellulaire, est tout à fait adéquat pour incorporer ces modèles dans les SIG.
Pullar (2001) introduit un langage de script, MapScript, destiné à la modélisation spatiale. L'auteur propose une extension à l'Algèbre des cartes par l'ajout des opérations de voisinage destinées à être appliquer sur des *templates*. La notion de *template* est issue de l'Algèbre d'image (Ritter et *al.*, 1990) et a été incorporée et utilisée pour l'analyse spatiale dans les automates cellulaires (e.g. Takeyama et Couclelis (1997)), en mathématique morphologique (Serra 1982) et en statistique spatiale locale (Getis et Ord, 1996). MapScript a été incorporé dans MathConnex (un environment graphique de développement modulaire) et plusieurs exemples d'utilisation de MapScript sont présentés dans cet article. Dans un autre article (Pullar, 2003), MapScript,

[10] Il s'agit d'une algèbre déclarative et opérationnelle issue de la théorie de l'algèbre abstraite (*abstract algebra*) en mathématique. Elle est basée sur un formalisme orienté objet et elle est totalement indépendante de la représentation interne des données. (voir Breu (1991)).

[11] Il s'agit de Topmodel de Beven et *al.* (1995) et AGNPS de Young et *al.* (1987).

conjointement à d'autres outils, a été appliqué à un problème de modélisation et de gestion des ruissellements des eaux. Un aspect important dans ce papier concerne l'utilisation d'un *réseau fonctionnel* (*functional network*) pour la conception d'un environment de simulation, SimuMap,[12] permettant d'intégrer des outils hétérogènes (IDRISI, MapScript et Excel) et la définition d'un langage de specification et de modélisation similaire à XML pour assurer une utilisation transparente de tous ces outils.
Haklay (2004), en s'inspirant de l'Algèbres des cartes de Tomlin, propose le terme de Map Calculs pour designer une algèbre qui permet une représentation fonctionnelle des plans d'information représentant des phénomènes spatiaux. Dans Map Calculs, les plans d'information sont représentés à l'aide des fonctions spatiales et de nouveaux plans pouvant être crées par la combinaison de plusieurs fonctions. L'article explique les principes de Map Calculs, son implémentation dans le SIG Mainfold System 5.0 et donne plusieurs exemples d'utilisation et de gestion des cartes fonctionnelles. L'article propose également une comparaison de Map Calculs avec les approches conventionnelles de représentation des surfaces dans les SIG.
Wang et Pullar (2005) décrivent une algèbre, nommée VMA (vector map algebra), destinée aux problèmes nécessitant la représentation et l'analyse vectorielle du terrain. VMA suppose une représentation quasi-continue du territoire similaire à celle utilisée pour la représentation des *modèles numériques du terrain* dans les SIG. Les auteurs décrivent également un environment de modélisation permettant l'écriture des modèles en utilisant les différentes opérations de VMA.
Notons enfin qu'aucune des algèbres présentées dans cette section n'a été dédiée à la modélisation multicritère spatiale. Cela était notre motivation principale pour l'élaboration de DMA.

5.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une nouvelle algèbre, DMA, dédiée à la cartographie décisionnelle multicritère. Comme toute algèbre, DMA possède les avantages suivants : (i) il s'agit d'une formalisation rigoureuse, (ii) elle est adaptée à modélisation orientée objet, (iii) indépendante de la manière dont les données sont stockées, (iv) ne nécessite pas une connaissance approfondie du SIG ou de l'AMC. Mais l'avantage principal de DMA est le fait qu'elle est bien adaptée à la modélisation spatiale multicritère. Dans le dernier chapitre, nous présentons une description du prototype développé et un exemple d'application.

[12] Une description de SimuMap est donnée en Pullar (2004).

Chapitre 11

Implémentation informatique et application au problème de génération des corridors

Ce chapitre présente une description du prototype—en cours de développement—et une application au problème de génération des corridors. Ces derniers peuvent être modélisés comme une collection d'unités spatiales linéairement adjacentes. Pour la génération de ces actions, nous allons appliqué une version révisée de l'algorithme "label setting" de Martins (1984). Cette nouvelle version, récemment proposée par Gandibleux et al. (2006), permet de prendre en compte plusieurs fonctions objectifs du type linéaire (`S-type`*) et du type max-min (*`M-type`*). Dans ce chapitre nous considérons un problème à objectifs multiples du type* `(3-S`$|$ `1-M)`.

11.1 Introduction

Au niveau du quatrième chapitre, nous avons défini une action linéaire comme une collection d'unités spatiales linéairement adjacentes (cf. §4.4.2.1). La solution proposée pour la génération de ce type d'actions consiste à utiliser le graphe de connexité $G(X, V)$ issu de la carte décisionnelle et d'y appliquer un algorithme de plus court chemin (cf. §4.5.2). Dans un contexte spatial, il est plus approprié d'appliquer un algorithme de plus court chemin à objectifs multiples. Ces derniers sont extrêmement étudiés dans la littérature (voir, e.g., Ehrgott (2000)). Deux types de fonctions objectifs sont généralement considérés dans les problèmes de plus court chemin à objectifs multiples : (i) *fonctions linéaires* et (ii) *fonctions du type max-min*, notés respectivement par (`S-type`) et (`M-type`). Par exemple, le coût est une fonction objectif du type `S-type` et la qualité de transport public est une fonction du type `M-type`. Dans le cas général, la notation (`$\sigma$-S`$|$ `$\mu$-M`) signifie que le problème concerne respectivement σ objectifs du premier type et μ objectifs du second type.
Il existe deux classes d'algorithmes pour la résolution des problèmes de plus court chemin à objectifs multiples du type `S-type` : les algorithmes de marquage et les algorithmes de ran-

gement des chemins (*raking path-based algorithms*). La première classe peut être divisée en deux familles : les algorithmes de *marquage permanent* (*label setting algorithms*) dans lesquels une étiquette est maintenue de façon permanente dans chaque itération, et les algorithmes de *marquage temporaire* (*label correcting algorithms*) dans lesquels les étiquettes ne deviennent permanentes que dans la dernière itération. Une description détaillée de ces différents algorithmes peut être trouvée dans, par exemple, Ehrgott (2000) et Skriver et Andersen (2000).
Lorsque toutes les fonctions objectifs sont du type `S-type`, l'ensemble des chemins efficaces, sous quelques hypothèses sur les coefficients de ces fonctions, peut être déterminé en utilisant l'algorithme de *label setting* de Martins (Martins, 1984). Dans ce document, nous allons utilisé une version révisée de cet algorithme, récemment proposée par Gandibleux et *al*. (2006), pour résoudre un problème du type `(3-S| 1-M)`. L'Annexe E présente l'algorithme de Martins (1984) ainsi qu'une description sommaire de la version révisée.
Dans la suite de ce chapitre, nous commençons par donner une formulation du problème de génération des corridors (Section 2). Par la suite, nous présentons une description du prototype développé (Section 3). Ensuite, nous illustrons la solution proposée pour la génération des actions linéaires à travers un problème hypothétique d'identification d'un corridor (Section 4). Nous terminons le chapitre par une étude comparative (Section 5).

11.2 Formulation du problème de génération des corridors

Pour pouvoir appliquer l'algorithme révisé de Martins (1984), il est nécessaire d'apporter quelques modifications au graphe de connexité $G(X, V)$. En se basant sur la manière dont ce graphe est construit (cf. §4.5.2), nous pouvons utiliser trois types d'évaluation :

- l'évaluation globale $\Gamma_w(u)$ associée à chaque sommet u du graphe G ;
- le vecteur $\mathbf{g}(u)$ d'évaluations partielles $g_1(u), g_2(u), \cdots, g_m(u)$ associées également à chaque sommet u du graphe G ;
- le vecteur $\mathbf{v}(u, v)$ d'évaluations associées à chaque arc $\forall(u, v) \in V$. Ces évaluations sont relatives aux relations (spatiales et/ou descriptives) entre les unités spatiales u et v comme par exemple la distance entre leur *centroid*, la longueur de la frontière commune, etc.

La première étape consiste à transformer le graphe G en un nouveau graphe G' comme suit :

- chaque sommet u dans G est transformé en un arc (u^1, u^2) dans G'.
- les arcs nouvellement construits sont évalués par :
  - $\Gamma_w((u^1, u^2)) = \Gamma_w(u)$,
  - $\mathbf{g}((u^1, u^2)) = \mathbf{g}(u) = (g_1(u), g_2(u), \cdots, g_m(u))$.
- chaque arc initial (u, v) dans X joint maintenant l'extrémité terminale du nouveau arc issu de u (i.e. u^2) et l'extrémité initiale du nouveau arc issu de v (i.e. v^1) et possède comme évaluation le vecteur $\mathbf{v}(u^2, v^1) = \mathbf{v}(u, v)$.

La deuxième étape consiste à transformer chaque évaluation du type $\Gamma_w((x,y))$ dans G' en un vecteur $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \cdots, r_p)$[1] tel que :

$$r_i = \begin{cases} 1 & \text{si } \Gamma_w(x,y) = e_i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Rappelons que e_i désigne l'évaluation de la catégorie C_i $(i = 1, 2, \cdots, p)$ sur l'échelle de mesure ordinale E dont les échelons définissent une série de catégories ordonnées $C_1, C_2, \cdots, C_p$ (cf. §4.4.1.2).
La transformation précédente permet d'obtenir deux types d'arcs :

- des arcs évalués avec des fonctions du type `S-type` (qui correspondent aux arcs initiaux).
- des arcs évalués avec des fonctions du type `S-type` et `M-type` (qui correspondent aux arcs issus de la première transformation).

Pour obtenir un vecteur d'évaluation homogène, il est nécessaire de transformer les trois types de vecteur en un vecteur commun. La structure générale du vecteur commun pour un arc x, y dans G' est définie comme suit :

$$(\mathbf{g}(x,y), \mathbf{v}(x,y), \mathbf{r}(x,y))$$

Étant donné qu'il existe trois types d'évaluation, quelques éléments du vecteur commun doivent être remplacés par des zero.
Une dernière modification consiste à transformer le graphe G' en un graphe orienté en remplaçant chaque arc dans G' par deux arcs opposés et ayant des vecteurs d'évaluation équivalents. La Figure 11.1 illustre toutes ces transformations pour un arc (x, y) de G'.

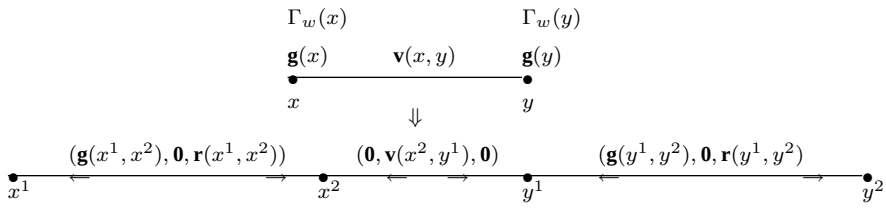


FIG. 11.1 – Schéma de transformation du graphe G'

Cette série de transformations permet de considérer différents types des problèmes, selon la nature des évaluations adoptées. Le Tableau 11.1 donne la liste de tous les problèmes possibles et la structure du vecteur d'évaluation pour chacun d'entre eux.

Pour illustration, nous avons implémenté un problème du type (3-`S`|1-`M`) dont une description sera donnée en fin du chapitre.

[1]Rappelons que p est le nombre de catégories utilisées dans l'étape de classification multicritère du processus de construction d'une carte décisionnelle (cf. §4.4.1.2).

Type du problème	Vecteur commun
(m-S|0-M)	$(g_1(e), \cdots, g_m(e), 0, \cdots, 0)$
(h-S|0-M)	$(h_1(e), \cdots, h_p(e), 0, \cdots, 0)$
($m+h$-S|0-M)	$(g_1(e), \cdots, g_m(e), h_1(e), \cdots, h_p(e), 0, \cdots, 0)$
(m-S| p-M)	$(g_1(e), \cdots, g_m(e), 0, \cdots, 0, r_1(e), \cdots, r_p(e))$
(h-S| p-M)	$(0, \cdots, 0, h_1(e), \cdots, h_p(e), r_1(e), \cdots, r_p(e))$
($m+h$-S| p-M)	$(g_1(e), \cdots, g_m(e), h_1(e), \cdots, h_p(e), r_1(e), \cdots, r_p(e))$

TAB. 11.1 – Différent types de problèmes possibles

11.3 Description du prototype

Dans cette partie, nous présentons une brève description du prototype qui est en cours de développement. Le schéma général de ce prototype est donné dans la Figure 11.2. Il comporte les modules suivants :

- Module d'évaluation multicritère.
- Module de génération de la carte décisionnelle.
- Module d'inférence des paramètres de préférence.
- Module de génération des actions linéaires.

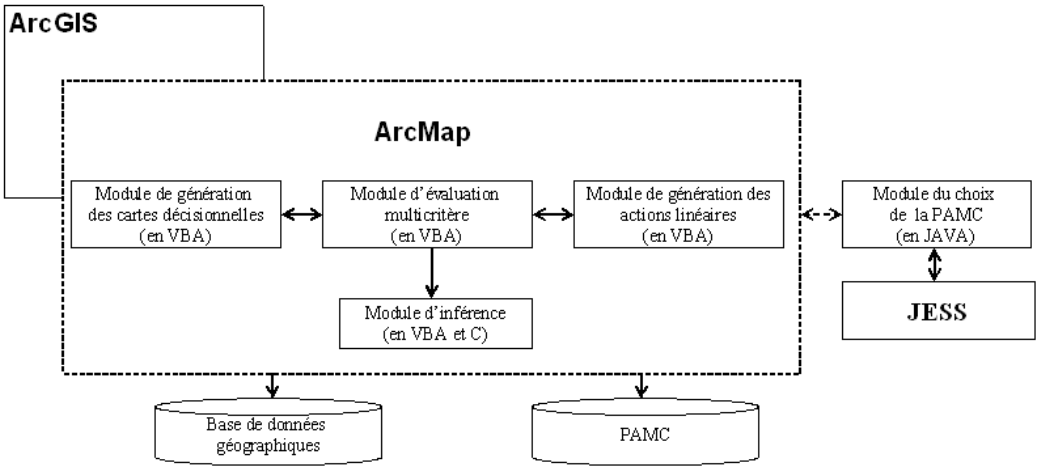


FIG. 11.2 – Architecture du prototype

Pour le développement de ce prototype, nous avons utilisé le SIG ArcGIS d'ESRI—plus précisément son module ArcMap—comme logiciel principal et VBA (Visual Basic for Application) comme langage de programmation. Dans la suite de cette section, nous présentons les trois premiers modules. Le module de génération des actions linéaires sera introduit dans la section 4 à travers un exemple hypothétique relative à un problème de génération des corridors. Notons enfin que le module du choix de la procédure d'agrégation est en cours de développe-

ment (avec JAVA et JESS[2]). En utilisant le SIG ArcGIS pour le développement du prototype, l'intégration du module de choix dans ce dernier ne pose aucun problème technique. Cela revient au fait que ArcGIS supporte JAVA.

11.3.1 Module d'évaluation multicritère

Ce module contient les fonctions d'évaluation multicritère identifiées dans le deuxième chapitre (cf. §2.4). Les fonctions actuellement incorporées sont les suivantes : (i) Construction des cartes critères (F2), (ii) Génération du tableau de performance (F6), (iii) Quantification (F7), (iv) Normalisation (F8), (v) Préanalyse de dominance (F9), (vi) Élicitation des préférences (F11) et (vii) Pondération des critères d'évaluation (F12).
À chacune de ces fonctions nous avons associé une interface qui permet d'introduire les différents paramètres. La Figure 11.3 présente l'interface relative à la fonction F2 dédiée à la construction des cartes critères. Cette interface permet à l'utilisateur de spécifier la procédure à utiliser pour la génération de la carte critère, le sens d'optimisation (i.e. maximisation/minimisation), et, éventuellement, les paramètres préférentiels. Cette dernière option sera utile lorsque l'utilisateur ne souhaite pas utiliser le module d'inférence et il préfère expliciter directement les paramètres nécessaires à l'application du modèle de classification multicritère ELECTRE TRI.

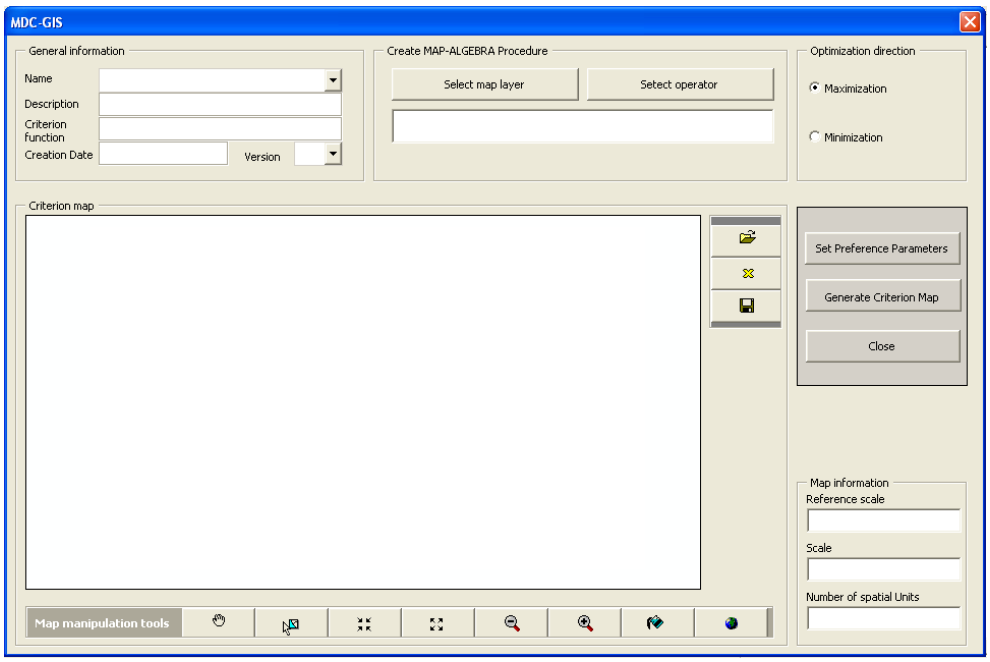


FIG. 11.3 – Interface pour la génération d'une carte critère

[2]JESS permet le développement des systèmes experts à base de règles qui peut être couplé avec un code écrit en JAVA.

La construction d'une carte critère fait appel à une série d'opérations issues de l'Algèbre des cartes. Cette série d'opérations est nommée *procédure* dans la terminologie de cette algèbre (cf. §5.2 et §5.5.3). Dans sa version actuelle, le prototype ne permet d'effectuer que les opérations scalaires.
Des interfaces similaires à celles utilisées pour la construction des cartes critères sont associées avec les autres fonctions. Notons que les fonctions F6 à F9 actuellement incorporées dans le prototype supposent que les actions sont du type ponctuel (i.e. chaque unité spatiale représente une action potentielle).

11.3.2 Module de génération de la carte décisionnelle

L'interface principale pour la génération des cartes décisionnelles est donnée dans la Figure 11.4. L'utilisateur doit préciser la liste de cartes critères et les paramètres pour l'algorithme PARTIAL-EVALUATION (cf. §4.4.2.2). Il s'agit d'associer à chaque carte critère deux mécanismes d'agrégation (désignés par Υ^j et Θ^j dans §4.4.2.2) qui seront utilisés lors du groupement des unités spatiales adjacentes et qui sont affectées à la même catégorie.

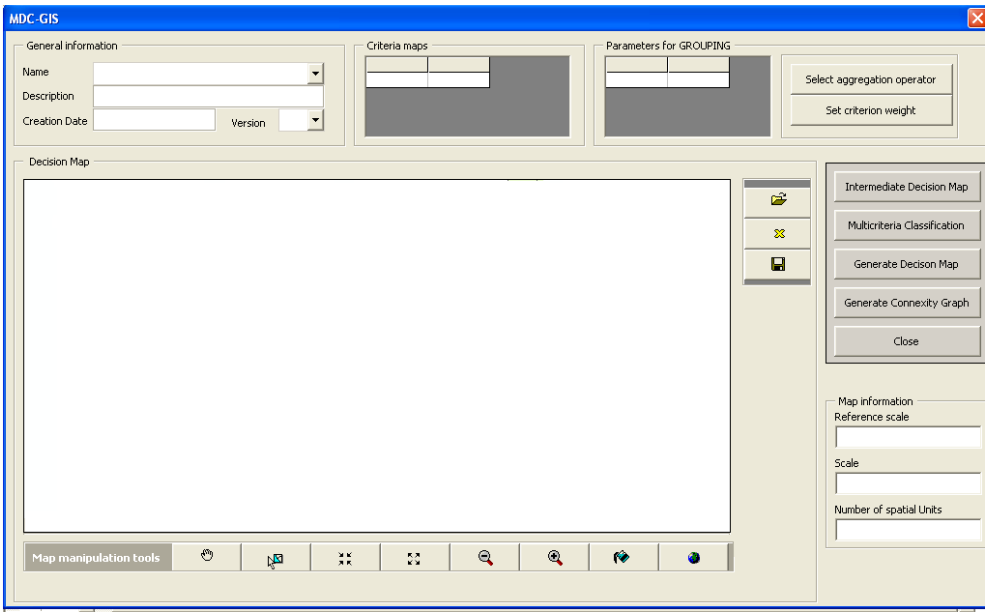


FIG. 11.4 – Interface pour la génération d'une carte décisionnelle

11.3.3 Module d'inférence des paramètres de préférence

Le module d'inférence des paramètres de préférence n'est pas accessible directement à l'utilisateur. Il est activé à partir de l'interface de génération de carte décisionnelle (en activant le button "Multicriteria Classification"). L'architecture de ce module est donnée dans la Figure 11.5. La description qui suit permet d'expliquer le fonctionnement de ce module.

L'utilisateur commence par fournir les exemples d'affectation. Pour ce faire, il lui suffit de cliquer sur une unité spatiale et la boîte de dialogue donnée dans la Figure 11.6 s'affiche. Elle permet au décideur de spécifier la rangé des catégories où il souhaite affecter cette unité. Pour minimiser l'effort cognitif du décideur et faciliter l'opération d'affectation, les évaluations partielles de l'unité spatiale considérée, en plus des informations relatives à la localisation géographique de cette unité, sont fournies au décideur (cf. §11.6).

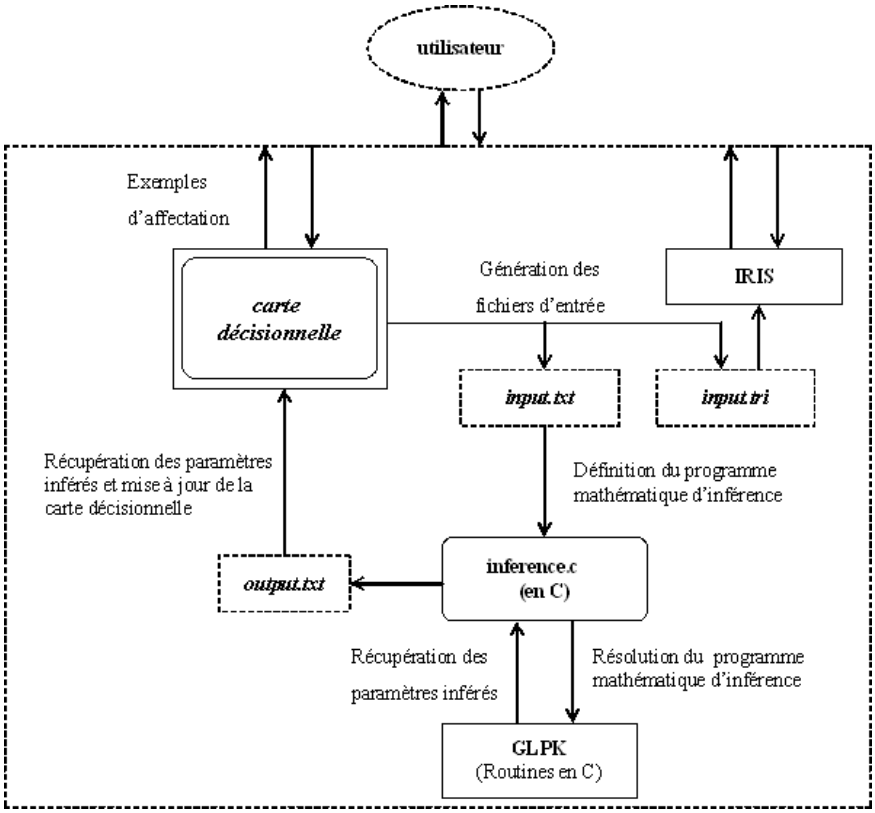


FIG. 11.5 – Architecture du module d'inférence

Une fois les exemples d'affectation sont fournis, l'utilisateur doit fournir les différents paramètres nécessaires à l'inférence en se servant de l'interface donnée dans la Figure 11.7.
Comme nous l'avons déjà mentionné dans le quatrième chapitre (cf. §4.4.1.3), les exemples d'affectation sont traduits en un programme mathématique dont la résolution permet de déterminer les paramètres de préférence. L'Annexe D présente les différents programmes mathématiques intégrés dans le prototype. Pour la résolution des ces programmes, nous avons utilisé le solveur GLPK (cf. Makhorin (2005)). La procédure d'inférence est implémentée en C. Cette procédure est complètement transparente à l'utilisateur. Ce dernier, utilise l'interface principale du module de génération de carte décisionnelle pour lancer la procédure d'inférence (via l'option "Multicriteria Classification"). Lorsque l'utilisateur active le module d'inférence, quatre étapes se déroulent :

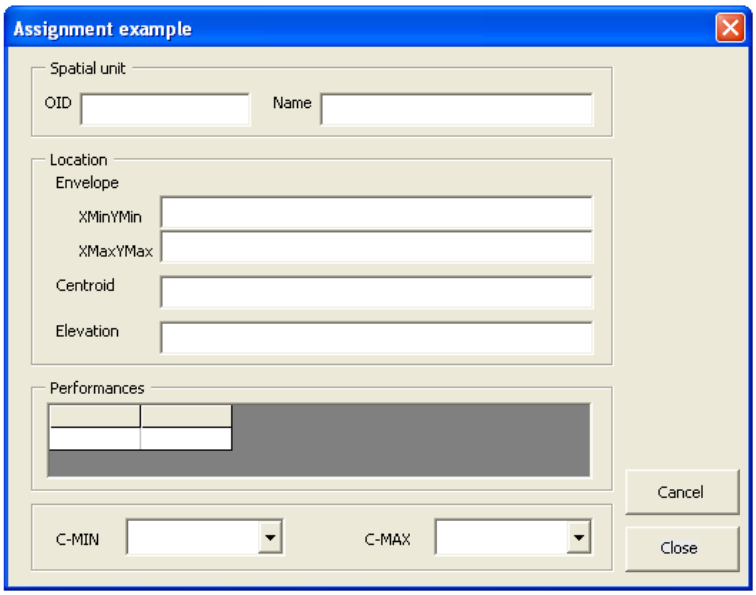


FIG. 11.6 – Interface pour l'introduction d'un exemple d'affectation

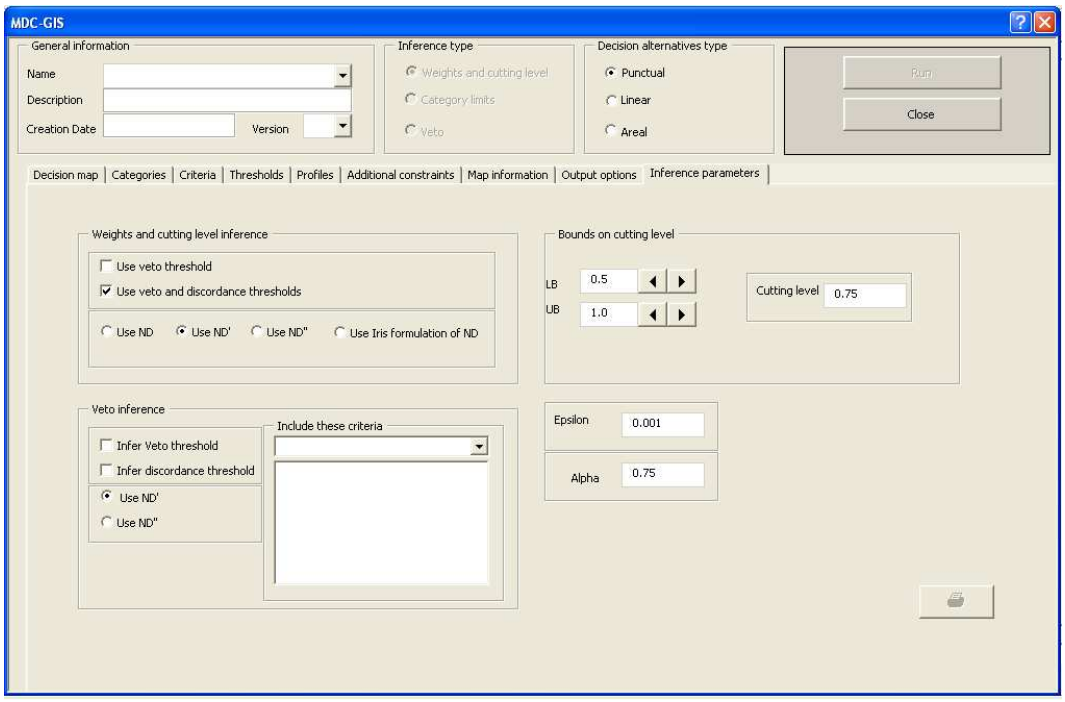


FIG. 11.7 – Interface pour l'introduction des paramètres de préférence

1. Génération des fichiers d'entrée :
   - "input.txt" pour la procédure d'inférence,
   - "input.tri" pour le logiciel IRIS (voir ci-après).
2. Résolution du programme mathématique (par GLPK) et génération du fichier "output.txt" contenant les solutions du programme mathématique.
3. Récupération des valeurs de paramètres inférés (contenues dans le fichier "output.txt") et application de la méthode de classification multicritère ELECTRE TRI en utilisant les valeurs inférées.
4. Mise à jour de la carte décisionnelle.

Si l'utilisateur n'est pas satisfait par le résultat de l'inférence, il peut réitérer le processus précédent tant que nécessaire.
Comme c'est illustré dans la Figure 11.5, le module d'inférence permet également d'utiliser le logiciel IRIS[3]. Ce dernier est un SIAD dédié à l'analyse de robustesse et d'inférence des paramètres de préférence (cf. Dias et *al*. (2003)). Il est intégré dans le prototype (selon le mode d'intégration indirecte—cf. §1.7) puisque il offre plusieurs autres fonctionnalités (e.g. inférence des profils limites, analyse de consistence, etc.) qui ne sont pas disponibles dans la version actuelle du prototype.
Le dialogue entre ArcMap d'une part, et les logiciels GLPK et IRIS, d'autre part, se fait via de fichiers textes (nommés "input.txt", "input.tri" et "output.txt" dans la Figure 11.5). Les structures générales de ces fichiers sont données dans l'Annexe G. Le fichier d'entrée "input.txt" n'est pas directement utilisable par le solveur GLPK. En effet, les programmes mathématiques relatifs aux différents types d'inférence n'ont pas la même structure. Le rôle du programme "inference.c" est de transformer ces différents programmes mathématiques en une syntaxe compréhensible par GLPK.
Le prototype que nous avons développé intègre deux procédures d'inférence :

- Procédure d'inférence des poids $k_j, j \in F$ et de seuil de coupe λ
- Procédure d'inférence des seuils de veto $v_j, j \in F$

Affectation robuste Déterminer l'affectation robuste d'une action a compte tenu d'une information préférentielle $\mathfrak{I}$ (induisant un ensemble de valeurs possibles pour les paramètres) consiste à identifier les catégories auxquelles l'action a est susceptible d'être affectée compte tenu de $\mathfrak{I}$. Dias et Clímaco (2000) ont proposé des algorithmes déterminant les affectations robustes dans le cadre de la méthode ELECTRE TRI. Pour une meilleure analyse de sensibilité/de robustesse, ces algorithmes ont été intégrés dans le prototype.
Ces algorithmes sont fondés sur le calcul de l'intervalle dans lequel varient les indices de crédibilité $\sigma(a, b_h)$ et $\sigma(b_h, a)$; $a \in A$; $h \in B$ compte tenu de l'information $\mathfrak{I}$ (cf. Dias et Clímaco (2000) pour plus de détails). Le principe est d'identifier $\max(a, \mathfrak{I})$ $(min(a, \mathfrak{I})$, respective-

[3]IRIS est l'abréviation de Interactive Robustness analysis and Parameters Inférence for multicriteria Sorting Problems.

ment) l'indice de la meilleure (moins bonne, respectivement) catégorie C_a à laquelle a peut être affectée compte tenu de $\mathfrak{I}$ en procédant comme suit (cf. Mousseau (2003), p. 39) :

Algorithm 6.1 (Calcul de cMin(a, Ω))

```
h ← p (meilleure catégorie)
Tant que ∃w ∈ Ω : ¬(aSb_{h-1})
Faire
    h ← h − 1
Fin tant que
cMin(a, Ω) ← h
```

Algorithm 6.2 (Calcul de cMax(a, Ω))

```
h ← p (meilleure catégorie)
Tant que ¬(aSb_{h-1}), ∀w ∈ Ω
Faire
    h ← h − 1
Fin tant que
cMax(a, Ω) ← h
```

Ces algorithmes permettent notamment d'identifer les actions les moins (les plus) affectées par la mauvaise connaissance des valeurs des paramètres préférentiels. Chaque itération dans ces algorithmes nécessite la résolution d'un programme mathématique. Ces programmes sont traités de même la manière que les programmes mathématiques relatifs aux problèmes d'inférence.

11.4 Application au problème de génération des corridors

Dans cette section nous présentons un exemple relatif à un problème hypothétique pour l'identification d'un corridor. Il peut servir, par exemple, pour la recherche d'un tracé pour une ligne de métro ou de tramway, une ligne de haute tension, une autoroute, etc. Les données utilisées dans cet exemple sont réelles. Mais nous n'avons pas pu trouver un problème concret pour illustrer les solutions proposées dans le cadre de cette thèse.
Les données dont nous disposons sont relatives à la région Ile-de-France. Ils s'agit essentiellement des données socio-économiques relatives aux communes de cette région. Dans la suite, nous supposons que le problème consiste à chercher un corridor entre les communes de BLARU et ORSAY. Ces deux communes seront colorées en bleue claire dans les cartes décisionnelles présentées dans la suite de cette section.
Ce problème peut être résolu en suivant les étapes suivantes :

1. Construction des cartes critères.
2. Construction d'une carte décisionnelle.
3. Application de la version révisée de l'algorithme de Martins (1984) dont une adaptation est introduite dans la deuxième section de ce chapitre.

Dans la suite de cette section, nous décrivons le déroulement de ces différentes étapes. Notons d'abord que toutes les données socio-économiques dont on dispose sont relatives aux communes de la région Ile-de-France et donc le corridor qu'on cherche à identifier prendra la forme d'une suite de communes adjacentes. Notons également que notre objectif n'est pas de trouvé un tracé "précis" mais plutôt une zone plus au moins large où le tracé peut passer. La définition d'un tracé "précis" nécessite des données de résolution meilleure que celles des données dont on dispose actuellement.

11.4.1 Construction des cartes critères

La première étape pour la résolution de notre problème consiste à construire les différentes cartes critères. Supposons que les trois critères suivants ont été retenus pour ce problème :

- g_1 : Favoriser les communes à forte densité démographique.
- g_2 : Favoriser les communes ayant un niveau d'emploie élevé.
- g_3 : Minimiser la surface bâtie totale des communes traversées par le tracé.

Il s'agit de favoriser les communes ayant une forte densité démographie, une population active importante mais au même temps disposent d'assez d'espace pour faire passer le tracé.
Les trois cartes critères correspondants aux fonctions critères g_1, g_2 et g_3 peuvent être construites en utilisant, respectivement, les formules suivantes :

$$\text{Densité démographique} = \frac{\text{Population Totale}}{\text{Surface Totale}} * 100 \tag{11.1}$$

$$\text{Niveau d'emploie} = \frac{\text{Population Active}}{\text{Population Totale}} * 100 \tag{11.2}$$

$$\text{Surface non bâtie} = \text{Surface Totale} - \text{Surface Bâtie} \tag{11.3}$$

La carte critère donnée en Figure 11.3 mesure le niveau d'emploie pour toutes les communes de la région Ile-de-France. Elle a été générée en applicant l'équation 6.2. Au terme de cette opération, une nouvelle carte nommée "Niveau d'emploie" est obtenue. Chaque unité spatiale (i.e. commune dans notre cas) de cette carte est associée à une valeur unique représentant le niveau d'emploie relatif à cette unité. Ces valeurs ne sont directement visibles sur la crate. Cependant, elles peuvent être consultées par simple clique sur les unités spatiales de la carte critère.
Les autres cartes "Densité démographique" et "Surface non bâtie" ont été construites de manière similaire en utilisant les équations 6.1 et 6.3, respectivement.

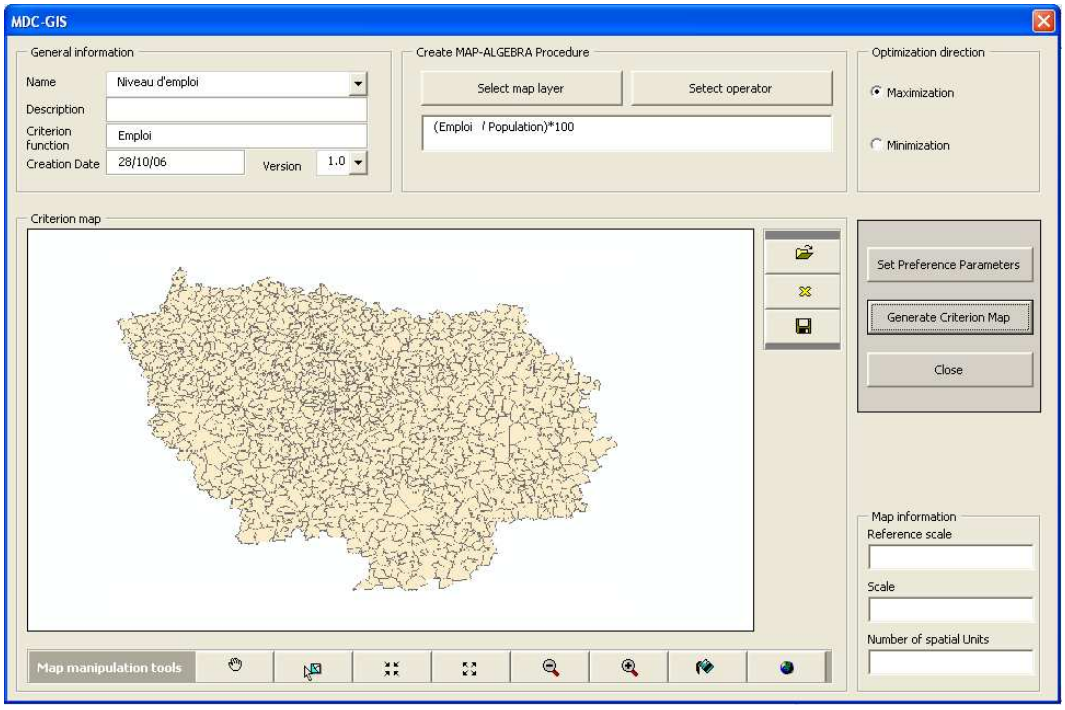


FIG. 11.8 – Carte critère "Niveau d'emploie"

11.4.2 Construction d'une carte décisionnelle

L'étape suivante consiste à combiner les trois crates critères précédentes pour construire une carte intermédiaire (cf. §4.4.1.1). Il est important de noter que les cartes critères ont toutes la même typologie. L'application de l'opérateur d'union $\oplus$ (cf. §4.4.1.1) n'implique donc que les attributs descriptifs des ces cartes (cf. §5.2). Le résultat est une carte intermédiaire où chaque unité spatiale est associée à trois évaluations relatives aux trois critères précédents (i.e. la densité démographique, niveau d'emploie, et la surface non bâtie). La Figure 11.9 présente la carte intermédiaire obtenue au terme de cette étape.
L'étape suivante est celle de la classification multicritère en utilisant l'algorithme ELECTRE TRI. Nous supposons que le décideur n'arrive pas à spécifier de manière explicite les paramètres nécessaires à l'application d'ELECTRE TRI et préfère utiliser la procédure d'inférence pour déterminer les valeurs de ces paramètres.
Pour appliquer cette procédure, nous supposons que quatre catégories ont été considérées. Ces catégories seront colorées en noir, rouge, orange et vert (avec la couleur verte correspondant à la meilleure évaluation et la noire à la plus mauvaise) dans les cartes décisionnelle présentées dans la suite de cette section. Nous supposons dans la suite que le décideur peut fournir les profils limites de catégories mais il trouve de difficulté à expliciter les valeurs des poids de critères k_1, k_2 et k_3 ; et du seuil de coupe λ. Nous supposons également que le décideur ne veut pas utiliser le seuil de veto.

Ensuite, l'utilisateur doit donner les valeurs des paramètres préférentiels (fixes) relatives aux différentes catégories. Nous supposons qu'il/elle a fourni les informations données dans le Tableau 11.2. Les valeurs relatives au critère g_3 (Surface non bâties) sont exprimés en km^2.

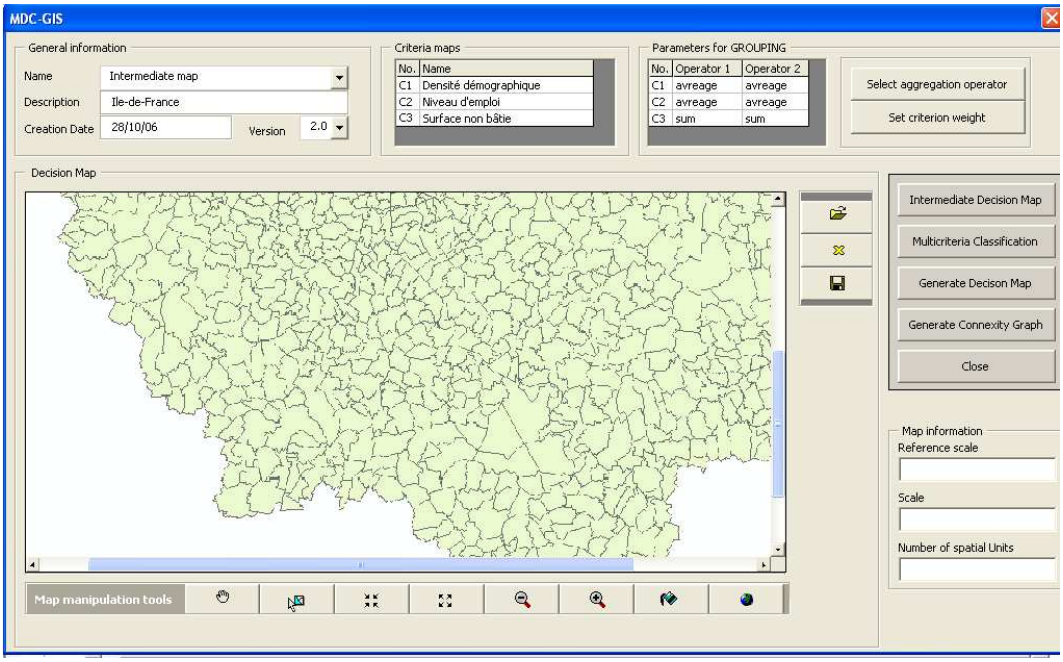


FIG. 11.9 – Carte intermédiaire

$g(b_4)$	g_1	g_2	g_3
$g(b_4)$	4.5	3.5	30
q_4	0.2	0.2	2
p_4	0.3	0.3	3
$g(b_3)$	3.5	2	20
q_3	0.2	0.2	2
p_3	0.3	0.3	3
$g(b_2)$	2.5	3.5	15
q_2	0.2	0.2	2
p_2	0.3	0.3	3
$g(b_1)$	0.25	4	10
q_1	0.2	0.2	2
p_1	0.3	0.3	3

TAB. 11.2 – Valeurs des paramètres de préférence fixes

Dans l'étape suivante, le décideur est appelé à fournir quelques exemples d'affectation. Comme nous avons mentionné plus haut, ces exemples seront traduits en un programme ma-

thématique dont la résolution permet de déterminer les valuers des poids (k_1, k_2 et k_3) et du seuil de coupe λ.
Nous supposons que le décideur a spécifié les exemples d'affectation représentés sur la carte de la Figure 11.10. Il est possible maintenant de lancer la procédure d'inférence. Nous avons reportées dans le Tableau 11.3 les valeurs obtenues au terme de la procédure d'inférence. L'étape suivante consiste à utiliser ces paramètres pour appliquer la méthode de classification multicritère ELECTRE TRI. Le résultat de cette étape est donné dans la Figure 11.11.

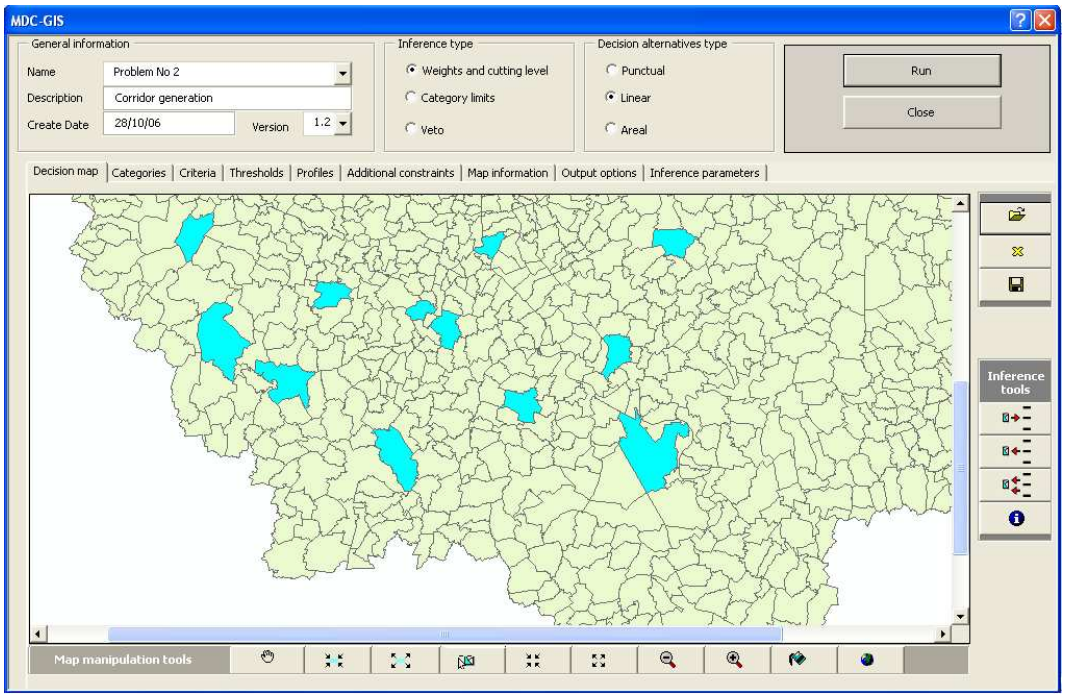


FIG. 11.10 – Exemples d'affectation

Paramètres	λ	k_1	k_2	k_3
Valeurs	0.5	0.5	0.2	0.3

TAB. 11.3 – Résultats de l'inférence

Il est aisé de remarquer que dans la Figure 11.11 plusieurs unités spatiales adjacentes ont la même évaluation. Il est donc nécessaire de grouper ces unités spatiales. Pour ce faire, il faut appliquer l'algorithme `GROUPEMENT` avec les paramètres donnés dans le Tableau 11.4. L'application de cet algorithme sur la carte de la Figure 11.11 a permis de générer la carte décisionnelle finale donnée dans la Figure 11.12. Il est maintenant possible d'utiliser cette carte pour la génération des corridors.

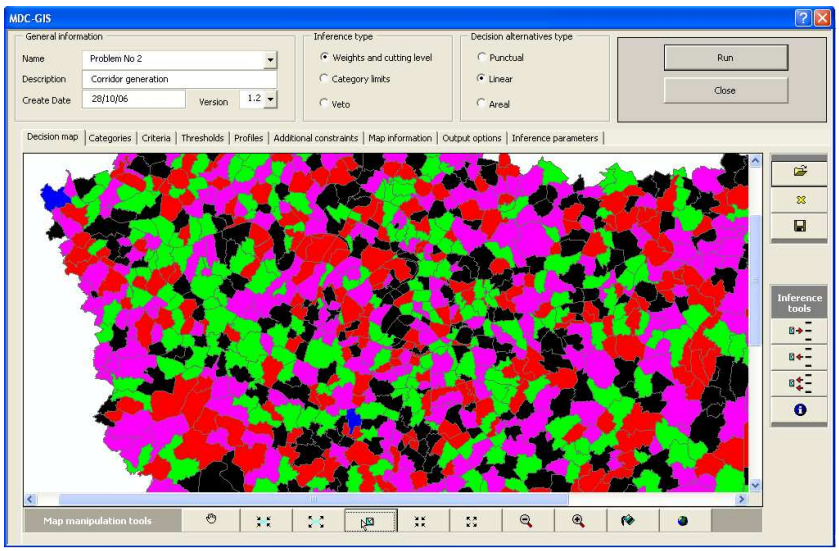


FIG. 11.11 – Carte décisionnelle avant regroupement

Carte critère ($\mathbf{c}_j$)	Υ^j	Θ^j
$\mathbf{c}_1$: Densité démographique	moyenne	moyenne
$\mathbf{c}_2$: Niveau d'emploie	moyenne	moyenne
$\mathbf{c}_3$: Surface non bâtie	somme	somme

TAB. 11.4 – Les paramètres de l'algorithme GROUPEMENT

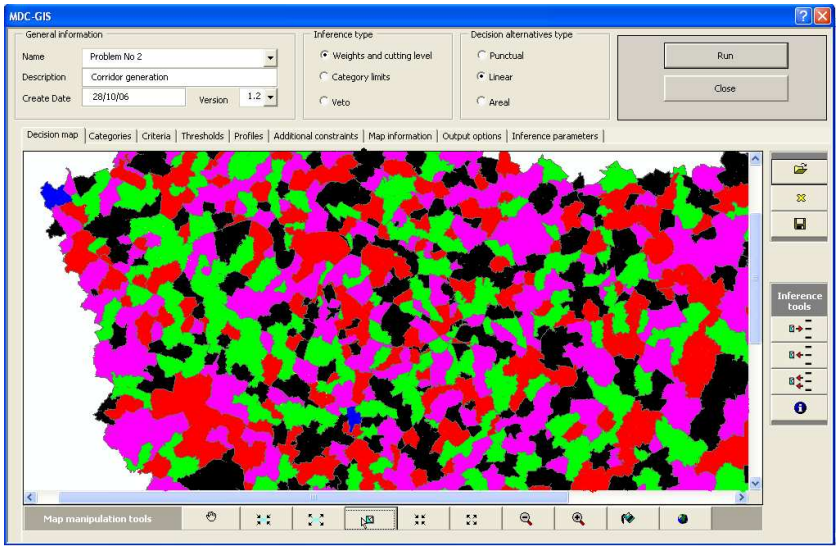


FIG. 11.12 – Carte décisionnelle après regroupement

11.4.3 Application de la version révisée de l'algorithme de Martins

La dernière étape consiste à appliquer l'algorithme révisée de Martins (1984) sur la carte décisionnelle obtenue au terme de l'étape précédente (cf. Figure 11.12). Pour appliquer cet algorithme, il est nécessaire de générer le graphe de connexité en utilisant l'option "Generate Connexity Graph" dans l'interface de génération des cartes décisionnelles (cf. §11.3.2). Dans la version actuelle du prototype, l'utilisateur ne peut pas voir le graphe de connexité. Ce dernier est en fait est sous format texte et sera utilisé comme entrée pour l'algorithme `CORRIDOR` qui n'est autre que la version révisée de l'algorithme de Martins. Cet algorithme a été développé en VBA.

Le résultat de l'application de l'algorithme `CORRIDOR` est donné dans la Figure 11.13. On y trouve les différents chemins efficaces (colorés en jaunes).

Notons enfin que les corridors générés en se basant sur une carte décisionnelle ont une taille plus large que le nécessaire. Ceci peut être sans conséquences pour quelques problèmes de gestion et de planification d'infrastructure linéaire. Autrement, nous pouvons appliquer un des *algorithmes des chemins polygonaux*[4], développés essentiellement dans le domaine de *computational geometry* (cf., e.g., Rigaux et *al*. 2002, Chap. 5, pp.149-199), pour résoudre ce problème.

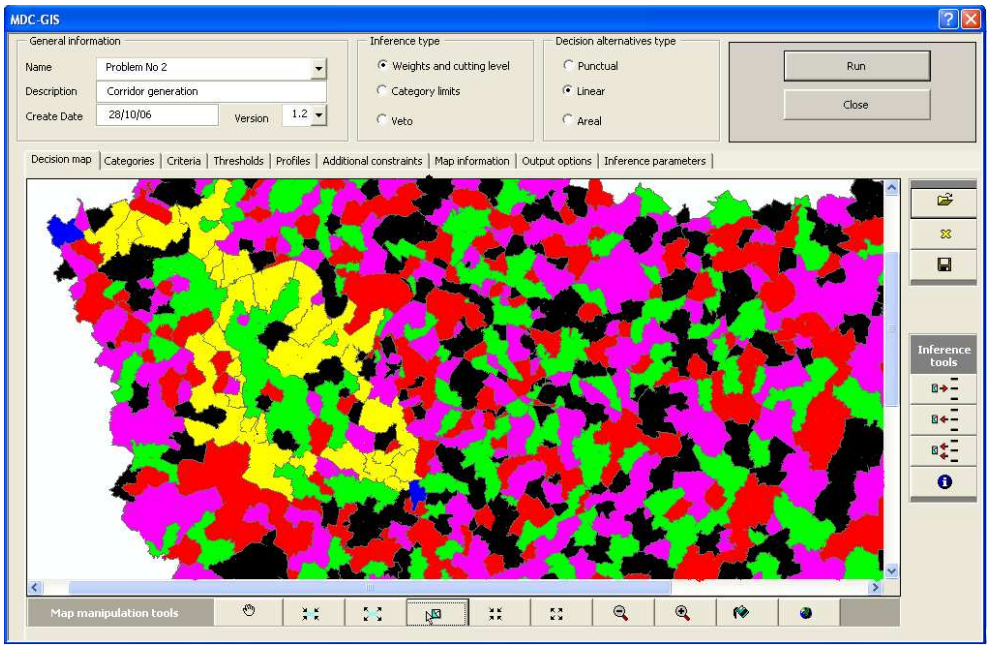


FIG. 11.13 – Chemins efficaces

[4]Notre traduction de *polygonal paths algorithms*.

11.5 Étude comparative

Plusieurs chercheurs se sont intéressés au problème de génération des corridors (e.g. Goodchild, 1977 ; Huber et Church, 1985 ; Moreno et *al*., 1988 ; Lombard et Church, 1993 ; Kavouras et Stefanakis, 1995 ; McIlhagga, 1997 ; Berry, 2000 ; Cova et Church, 2000 ; Molines et Chevallier, 2001 ; Yu et *al*., 2003 ; Dillon, 2005). Nous discutons quelques uns dans la suite de cette section.

Pour éviter les problèmes d'erreurs de mesure dans les problèmes de génération des corridors, Huber et Chruch (1985) ont proposé d'étendre la notion de voisinage au delà des cellules voisines directes pour incorporer les 15 voire les 24 cellules adjacentes. Cela permet en particulier de "lisser" le corridor et éviter les "zigzags".

Moreno et *al*. (1988) ont utilisé le SIG dans le cadre d'un projet d'autoroute en Arizona. Les auteurs ont adopté une méthodologie comportant deux phases. La première phase est effectuée pour (i) identifier les facteurs pertinents pour un tracé d'autoroute ; et (ii) concevoir et mettre en place une méthode d'évaluation de site basée sur ces facteurs ; la méthode "Delphi modifiée" est utilisée. Cette première phase consiste à caractériser la région d'étude par un degré relatif de convenance (*suitability*) pour la localisation d'une autoroute, basée sur cinq facteurs géotechniques et environnementaux[5]. À l'intérieur de cette zone d'étude, un nombre virtuellement illimité de tracés est initialement possible. Ainsi, la première phase est conçue pour réduire le nombre de solutions de routes à un ensemble de corridors candidats plus facile à gérer. Elle s'est concrétisée à travers le développement de cartes de convenance de ressources, par l'application de la technique de superposition de poids composites.

Dans la deuxième phase, les corridors candidats sont évalués de manière plus détaillée pour permettre une comparaison et aboutir à la recommandation d'une seule autoroute. Chacun des cinq facteurs a été examiné à travers une étude détaillée d'analyse d'impact. Par exemple, le facteur des ressources culturelles a été évalué en considérant les sites archéologiques connus et en analysant d'autres critères observables (terrain, aspects relatifs à l'eau, etc.) qui devraient indiquer l'existence possible de sites non encore découverts. Le SIG a permis, donc, de quantifier et de comparer les impacts environnementaux associés à chaque tracé.

Lombard et Church (1993) ont introduit ce qu'ils appellent *gateway shortest-path algorithm* (GSP) dans le but de trouver le plus court chemin mais. L'algorithme GSP permet de générer n^2 chemins pour un réseau composé de n sommets. Il utilise deux fois l'algorithme de Dijkstra : (i) une première fois pour identifier un chemin allant de l'origine à la destination, et (ii) une deuxième fois pour identifer un chemin allant de la destination à l'origine. Les chemins trouvés sont ensuite combinés et le chemin final est composé par les cellules ayant le coût (combiné) le moins élevé.

McIlhagga (1997) introduit le concept de *distance à coût fixe* (*fixed-cost distance*), par opposition au concept d'*effort-distance* appliqué traditionnellement. Le coût associé avec le concept effort-distance est comptabilisé pour tout déplacement d'une cellule à une autre. En revanche, le coût fixe est comptabilisé une seule fois (lorsque le chemin a été identifié). Ainsi, minimiser

[5]Il s'agit de : (i) habitats sensibles (notamment les zones riverains et les habitats d'aigles chauve), (ii) les resources culturelles (notamment archéologiques et historiques), (iii) impacts sur le paysage, (iv) impacts sur la communauté (reflétant l'intérêt du public pour le trafic sur autoroute, l'utilisation du sol, le bruit et la qualité de l'air) et (v) les contraintes techniques et géotechniques.

le coût associé avec le concept effort-distance revient à minimiser le coût d'un point origine à n'importe quel point destination ; minimiser le coût fixe revient à identifer le chemin qui connecte le point origine à toutes les destinations, sans chercher à minimiser un chemin isolé.
Berry (2000), dans son Map Analysis Package—et ensuite dans le SIG MapCalc—introduit le concept de *surface d'accumulation graduée* (*stepped accumulation surface*) pour identifier le chemin entre plusieurs cibles. Dans un premier temps, le chemin est calculé entre la première et deuxième cible, ensuite entre la deuxième et la troisième cible, et ainsi de suite jusqu'à l'examen de toutes les cibles. Cependant, la procédure de surface d'accumulation graduée ne permet pas d'indiquer quel est le meilleur ordre pour examiner les différentes cibles.
Cova et Church (2000) modélisent le problème d'identification d'un corridor comme un problème de localisation dans lequel les sites incluent l'origine, la destination et le corroder lui même, et minimisent en même temps l'emprise spatiale et maximise la convenance.
Molines et Chevallier (2001) (voir également Molines (2002)) ont proposé une approche qui procède par des réductions spatiales successives pour déterminer un corridor de moindre coût. Cette approche comporte trois phases :

1. *Définition d'une grille de sensibilité*. En agrégeant les sensibilités des différentes composantes environnementales, cette grille met en évidence les zones plus au moins sensibles au passage d'une nouvelle infrastructure linéaire.
2. *Recherche d'un couloir de moindres contraintes environnementales*. Les objectifs de cette étape sont : (i) soustraire de l'étude, les zones les plus sensibles à l'introduction d'une nouvelle infrastructure, et (ii) définir un couloir de x kilomètres de large, qui relie d'une manière la plus directe possible, les deux extrémités du projet.
3. *Définition d'un corridor de moindre coût*. La définition de ce corridor se base sur l'utilisation des méthodes multicritères.

Yu et al. (2003), pour améliorer les algorithmes utilisés traditionnellement dans le plus court chemin, proposent l'incorporation d'autres facteurs comme les coûts anisotropes, les distances spatiales, et la présence des tunnels et ponts. Le coût anisotrope permet en particulier de tenir compte du fait que dans une surface complexe, les pentes ne sont pas toujours constantes dans toutes directions. Les distances spatiales désignent les distances entre deux cellules différentes lors du calcul du coût anisotrope. Les auteurs illustrent leur approche en utilisant des données relatives au MNT.
Dillon et son équipe (cf. Dillon, 2005) s'inspirent du travail de McHarg dans les années soixante et proposent une méthodologie de cinq étapes pour l'identification d'un tracé destiné au passage d'une ligne de haute tension :

1. Identification des "macros" corridors.
2. Définition de l'emprise spatiale du projet.
3. Identification des corridors potentiels pour chaque "macro" corridor.
4. Identification des tracés potentiels dans chaque corridor potentiel.
5. Selection d'un tracé.

Pratiquement, tous les travaux cités plus haut considèrent des données du type *raster*. En plus, seulement deux travaux (ceux de Moreno et *al*. (1988) et Molines et Chevallier (2001))

font usage du SIG et de l'analyse multicritère. Le travail de Dillon (2005) considère un nombre relativement importants des facteurs mais l'inconvénient qu'on peut adresser à ce travail est l'utilisation de la règle d'agrégation ordinale (similaire à celle utilisée initialement par McHarg dans son livre de 1969—voir aussi McHarg (1992, 1996)). En revanche, l'approche proposée dans ce chapitre peut être utilisée aussi bien avec des données vectorielles que matricielles. En plus, la manière dont le graphe de connexité est généré est originale dans le sens où nous n'avons trouvé aucun papier qui propose une approche similaire i.e., que se base sur une subdivision du territoire d'étude en zones homogènes pour en extraire le graphe de connexité et l'application d'un algorithme de plus court chemin sur ce graphe.

11.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé une formulation du problème de génération des corridors où nous avons apporté quelques transformations au graphe de connexité, introduit au niveau du quatrième chapitre. Cela nous a permis d'appliquer une version révisée pour l'identification des corridors potentiels. Ces transformations augmentent le temps de calcul mais permettent d'appliquer différents types de fonctions objectifs.
Dans la deuxième partie du présent chapitre, nous avons d'abord proposé une brève description du prototype développé et par la suite nous avons illustré quelques solution proposées dans cette thèse via un problème hypothétique relatif à l'identification d'un corridor dans la région Ile-de-France.
Comme nous l'avons déjà précisé, la version actuelle du prototype ne comporte pas toutes les solutions proposées dans le cadre de cette thèse. Cependant, nous envisageons de les ajouter prochainement.

Conclusion générale et perspectives

Les problèmes de décision à référence spatiale sont complexes et de nature multicritère. Le traitement de ces problèmes requiert en entrée un ensemble de données géo-référencées. Le système d'information géographique, SIG, par sa capacité dans le stockage, la gestion, l'analyse, la modélisation et l'affichage de données à référence spatiale, se présente comme l'outil le plus adéquat pour appréhender ces problèmes. Néanmoins, la technologie SIG actuelle souffre encore de plusieurs lacunes dans le domaine de l'aide à la décision à référence spatiale. Particulièrement, les SIG ne disposent pas (ou très peu) de capacités analytiques capables de supporter la nature multicritère des problèmes spatiaux. Pour renforcer les SIG en aide à la décision à référence spatiale, la plupart des chercheurs adoptent l'idée de coupler la technologie SIG avec des fonctionnalités analytiques plus sophistiquées issues de la recherche opérationnelle. Une solution possible consiste en l'intégration du SIG et de l'analyse multicritère (AMC).

En effet, l'analyse multicritère offre plusieurs avantages par rapport aux autres outils : prise en compte des critères conflictuels, des préférences et des objectifs divergents, de systèmes de valeurs différents. L'apport de l'analyse multicritère en aide à la décision à référence spatiale est bien confirmé aujourd'hui au vu du nombre important de travaux d'intégration SIG-AMC qui ont été publiés depuis le début des années 1990. Cependant ces travaux présentent plusieurs limites qui les empêchent à être diffusés au delà du contexte académique : (i) utilisation du mode d'intégration indirecte ou encastrée, (ii) intégration d'une seule ou d'un nombre limité de méthodes, (iii) absence d'une méthodologie pour le choix de la méthode à appliquer dans un problème donné, (iv) intégration des méthodes du critère unique de synthèse, et (v) nécessité d'une connaissance approfondie du SIG et de l'AMC. Dans ce travail de thèse, notre effort a porté sur la proposition de solutions conceptuelles, méthodologiques et informatiques afin de palier ces limites et, par voie de conséquence, promettre les SIG au rang de véritables outils d'aide à la décision à référence spatiale.

Contributions

Parmi les limites concernant les travaux d'intégration SIG-AMC, les plus importantes sont celles relatives au mode d'intégration adopté et au nombre insuffisant de méthodes d'AMC généralement incorporées dans le SIG. Pour combler conjointement ces deux lacunes, nous avons proposé une stratégie d'intégration SIG-AMC dont l'idée est assez intuitive. Plus précisément, la stratégie consiste en l'identification d'un nombre restreint de fonctions d'évaluation multicritère et leur incorporation dans le SIG. Ces fonctions représentent les opérations élémentaires

nécessaires à l'implémentation de la majorité des méthodes multicritères. La stratégie proposée diffère des travaux précédents dans le sens où il n'est pas nécessaire de programmer une ou plusieurs méthodes, comme c'est le cas dans la plupart de ces travaux. En outre, elle possède plusieurs avantages dont les plus importants consistent au fait qu'elle (i) permet une intégration complète dans le sens où les fonctions d'évaluation multicritère sont définies individuellement de manière générique, et peuvent facilement être incorporées dans un SIG ; (ii) donne la possibilité d'appliquer différentes méthodes multicritères existantes ou même de créer des méthodes *ad hoc* adaptées au problème en considération.

Disposer d'un grand nombre de méthodes d'AMC au sein du SIG permet de renfoncer les potentialités analytiques de celui-ci et d'étendre son champ d'application en aide à la décision à référence spatiale. Néanmoins, un nouveau problème apparaît : comment choisir la méthode à appliquer dans un problème donné. En effet, chaque méthode a des avantages et des inconvénients de telle manière qu'elle ne peut pas être appliquée dans tous les cas de prise de décision à référence spatiale. Pour résoudre ce problème, nous avons préconisé l'idée d'utiliser un module à base de règles. Le module consiste en un système expert simple dont la base de connaissances contient les caractéristiques des méthodes multicritères. Les règles sont issues d'une correspondance entre les caractéristiques (i) des problèmes de décision à référence spatiale, (ii) des méthodes d'AMC et (ii) du décideur. En s'appuyant sur la base de connaissances et selon les spécificités du problème étudié, le module utilisera la collection de règles pour proposer au décideur la méthode la plus appropriée à ce problème.

Notre étude bibliographique nous a permis de constater que les méthodes multicritères de surclassement de synthèse ont reçu peu d'attention dans les travaux d'intégration SIG-AMC. Cependant, ces méthodes sont généralement bien adaptées au contexte spatial. L'explication la plus naturelle à ce constat est que ces méthodes sont sujettes à des "limitations informatiques" par rapport au nombre d'actions. Pour faciliter l'intégration des méthodes de surclassement de synthèse dans les SIG, nous avons introduit une méthodologie en deux phases. La première phase est consacrée à la construction d'une carte décisionnelle, i.e., une subdivision planaire du domaine d'étude, obtenue par la combinaison d'un ensemble de cartes critères. La deuxième phase, quant à elle, a pour but d'utiliser la carte décisionnelle obtenue au terme de la première phase pour la génération des actions et pour l'évaluation multicritère. En effet, les actions atomiques ponctuelles, linéaires ou surfaciques conventionnelles seront alors construites comme une unité spatiale individuelle, une collection d'unités spatiales adjacentes linéairement ou une collection d'unités spatiales contiguës. Ceci permet de réduire considérablement le nombre d'actions et rendre possible l'utilisation des méthodes multicritères de surclassement de synthèse. Les solutions proposées pour la génération des actions atomiques ont servi de base pour la génération des actions composées.

En plus d'un éventail des méthodes d'AMC, il est important qu'un système SIG-AMC dispose d'un langage adéquat pour la modélisation spatiale multicritère. Dans ce sens et en s'inspirant de l'Algèbre des cartes de Tomlin (1990), nous avons proposé une nouvelle algèbre, que nous avons nommée DMA (pour Decision Map Algebra), destinée spécifiquement à la modélisation spatiale multicritère. Elle représente une formalisation à la fois de la stratégie d'intégration

SIG-AMC, proposée dans le deuxième chapitre, et de la méthodologie de cartographie décisionnelle multicritère, présentée dans le quatrième chapitre. Elle représente également une première étape vers le développement d'un langage générique pour la modélisation spatiale multicritère.

Le prototype a permis l'illustration de plusieurs solutions proposées dans le cadre de cette thèse. La version actuelle de ce prototype permet la construction des cartes décisionnelles et la génération des solutions linéaires. Quelques fonctions d'évaluation multicritère ont été également incorporées dans le prototype. Appliqué à un problème de génération des corridors, en utilisant des données réelles relatives à la région Ile-de-France, ce prototype a donné plein satisfaction.

Perspectives

Nous terminons cette conclusion en évoquant les différentes perspectives de recherche que nous envisageons d'aborder dans le futur.

Perspectives à court et à moyen terme

1. *Finalisation du prototype*. Le prototype développé ne comporte pas toutes les solutions proposées dans le cadre de cette thèse. Notre première préoccupation dans le futur concerne l'incorporation de ces solutions pour la génération des autres types d'actions (i.e. ponctuelles, polygonales et composées). Nous prévoyons également d'implémenter l'algèbre proposée.

2. *Développement d'une version Web du concept de la carte décisionnelle.* Nous envisageons aussi le développement d'une version Web du concept de la carte décisionnelle. Cette extension se situe dans la tendance actuelle des travaux de recherche qui s'efforcent à combiner Internet et les SIG dans le but de "démocratiser" et généraliser l'utilisation de la technologie SIG. Nous pouvons citer par exemple les travaux suivants, qui traitent du contexte précédent : Lotov et *al*. (1997), Carver (1999), Carver et Peckham (1999), Zhu et Dale (2001), Rinner et Malczewski (2002), Borhers et *al*., 2003 ; Rinner (2003), et Mathiyalagan et *al*. (2005).

3. *Choix de la technique de pondération/de normalisation*. Parmi les problèmes qui n'étaient pas abordés dans les travaux d'intégration SIG-AMC, on trouve celui qui correspond au choix de la technique de pondération/normalisation à utiliser dans un problème donné (Malczewski, 2004). Le fait que le nombre des méthodes de pondération (c.f. 2.4.12) est relativement grand et que ces différentes méthodes n'ont pas la même interprétation (cf. Choo et *al*. (1999)) prête à confusion pour les utilisateurs potentiels des systèmes SIG-AMC quant au choix de la méthode à utiliser. À l'instar des techniques de pondération, il existe plusieurs techniques de normalisation qui mènent souvent à des résultats différents (Malczewski, 2004). La technique de normalisation la plus utilisée dans les travaux d'intégration SIG-AMC est celle de transformation linéaire (*linear transformation method*). Cependant, il n'existe ni une base théorique solide, ni une justification empirique pour utiliser cette technique (Jiang et Eastman, 2000). Le développement d'une approche formelle pour assister le décideur lors du choix de la procédure de

pondération/normalisation, d'une manière similaire à celle utilisé dans ce travail de recherche pour le choix de la procédure d'agrégation multicritère, nous semble une bonne initiative.

Perspectives à long terme

1. *Prise en compte des dimensions spatiale et temporelle dans la modélisation multicritère*. Deux aspects méritent d'être abordés dans ce contexte : la construction des critères issus de conséquences dispersées (dans l'espace et/ou dans le temps) et la modélisation des préférences qui varient aussi bien dans l'espace que dans le temps. Les critères sont construits sur la base d'un ensemble de conséquences qui résultent de l'implémentation des actions. Ces conséquences peuvent être ponctuelles ou dispersées et cette dispersion peut être locale, régionale, nationale ou même internationale. Cela implique une nécessité de définir des mécanismes appropriés pour agréger ces conséquences. Lorsque la distribution est à la fois spatiale et temporelle, deux mécanismes d'agrégation sont nécessaires. Dans la littérature, il existe peu de travaux pour la modélisation des critères issus des conséquence dispersées (e.g. Azibi et Vanderpooteen, 2002, 2003). Dans les travaux d'intégration SIG-AMC, la modélisation de la distribution spatiale des préférences a été abordée par quelques auteurs (e.g. Feick et Hall, 2002 ; Phua et Minowa, 2005 ; Koo et O'Connell, 2006). Il existe des méthodes multicritères récentes qui supportent la modélisation des préférences variant dans le temps (e.g. Kornbluth, 1992 ; Atherton et Simon, 1998 ; Vo et *al*., 2002). Mais, à notre connaissance, aucune des ces méthodes n'a été incorporée dans un SIG.
Coté SIG, différents modèles de données ont été proposés dans la littérature (Langran, 1993 ; Bauzer-Medeiros et Jomier, 1993, 1994 ; Bauzer-Medeiros, 2001 ; Grumbach et *al*., 2001 ; du Mouza et Rigaux, 2001 ; Peerbocus et *al*., 2004 ; Bauzer-Medeiros et *al*., 2005 ; du Mouza et Rigaux, 2005 ; Parent et *al*., 2006) pour supporter la dimension temporelle. Dans le cadre de cette perspective, nous envisagerons d'utiliser un modèle parmi ceux cités pour se concentrer sur la prise en compte de la dimension temporelle au niveau de la modélisation multicritère (i.e. par rapport à la modélisation, représentation et évaluation des actions, la construction des cartes critères et la modélisation des préférences). Une première tentative a été l'exploration des concepts de concordance et de non-discordance pour modéliser des préférences qui varient dans le temps (cf. Chakhar et Mousseau, 2004a, 2005). Néanmoins, le champ d'investigation est très large dans ce contexte.

2. *Prise en compte de l'incertitude et de l'imprécision*. Malczewski (2006) estime que les travaux d'intégration SIG-AMC publiés entre 1990 et 2004 utilisent de l'information déterministe dans 77% des cas et dans les 23% qui restent, il estime que 64.1% de travaux utilisent de l'information probabiliste et 35.9% des cas utilisent de l'information floue. Les principaux outils pour la prise en compte de l'incertitude et l'imprécision sont la théorie de la logique floue (*fuzzy logic theory*), la théorie de possibilité (*possibility theory*) et la théorie de l'évidence (*evidence theory*). Nous pensons que l'incorporation des méthodes multicritères supportant l'incertitude et l'imprécision dans les SIG n'a pas reçu une attention particulière dans les travaux d'intégration (e.g. Banai, 1993 ; Jiang et Eastman, 2000 ; Malczewski et Rinner, 2005). Actuellement, il existe des méthodes multicritères pour traiter différents types d'incertitude et d'imprécision comme les méthodes FLIP, STRANGE et Fuzzy TOPSIS (cf., e.g., Yong (2006)). Il serait donc

plus raisonnable de les considérer dans les travaux d'intégration SIG-AMC.
Cette perspective rejoint en quelque sorte un autre volé de recherche que nous avons entamé depuis quelques années et qui concerne la prise en compte de l'incertitude et de l'imprécision dans les base de données. En effet, nous avons proposé récemment un modèle de base de données flou (cf. Chakhar et Telmoudi, 2004, 2006 ; Bouaziz et *al*., à paraître) nommé FSM (pour Fuzzy Semantic Model). FSM a été transformé en un modèle relational objet FRO (Fuzzy Relational Object) et implémenté sous le SGBD PostgreSQL (cf. Bahri et *al*., 2005b). Nous avons également proposé un langage de requête—dont nous envisageons l'implémentation—adapté à FSM (cf. Telmoudi et Chakhar, 2004b ; Bouaziz et Chakhar, 2006). Nous pensons étendre FSM afin qu'il supporte la dimension spatiale.

3. *Développement d'une version visuelle de l'algèbre*. À la fin du cinquième chapitre, nous avons donné une modélisation orientée objet de quelques TAD de l'algèbre DMA. Nous envisageons dans un premier temps d'implémenter cette algèbre en utilisant C++. Dans un deuxième temps, nous entendons développer une version visuelle plus élaborée supportant la *modélisation multicritère visuelle*. En fait, il existe plusieurs travaux de recherche pour le développement des langages de manipulation et de modélisation visuelle (e.g. Kirby et Pazner, 1990 ; Egenhofer et Bruns, 1995 ; Murray et *al*., 2000 ; Laurini et *al*., 2003). À notre connaissance, il n'existe aucun travail destiné à la modélisation multicritère visuelle. L'incorporation d'une telle option renforcera considérablement les systèmes SIG-AMC et facilitera leur utilisation pour les non spécialistes.

Bibliographie

[1] J.C.J.H. Aerts and G.B.M. Heuvelink. Using simulated annealing for resource allocation. *International Journal of Geographical Information Science*, 16(6) :571–587, 2002.

[2] T. Al-Shemmeri, B. Al-Kloub, and A. Pearman. Model choice in multicriteria decision aid. *European Journal of Operation Research*, 97 :550–560, 1997.

[3] J. Albrecht. *Universal analytical GIS operations : A task-oriented systematisation of data structure-independent GIS functionality leading towards a geographic modelling language*. PhD thesis, University of Vechta, Germany, 1995.

[4] J. Albrecht, S. Jung, and S. Mann. VGIS : A GIS shell for the conceptual design of environmental models. In Z. Kemp, editor, *Innovations in GIS 4*, pages 154–165. Taylor & Francis, London, 1997.

[5] E. Allen. INDEX : Software for community indicators. In R.K. Brail and R.E. Klosterman, editors, *Planning Support Systems*, pages 229–261. ESRI Press, Redlands, CA, USA, 2001.

[6] G. Andrienko and N. Andrienko. Interactive maps for visual data exploration. *International Journal of Geographical Information Science*, 13(4) :355–374, 1999.

[7] A. Angehrn and T. Jelassi. DSS research and practice in perspective. *Decision Support Systems*, 12 :267–275, 1994.

[8] L. Anselin. What special about special data ? Technical Paper 89-4, Alternative perspectives on spatial data analysis, NCGIA, 1989.

[9] J. Antoine, G. Fischer, and M. Makowski. Multiple criteria land use analysis. *Applied Mathematics and Computation*, 83 :195–215, 1997.

[10] C. Araujo and A. Mecedo. Multicriteria geologic data analysis for mineral favourability mapping : Application to a metal sulphide mineralized area, Ribeira Valley Metalogenic Province, Brazil. *Natural Ressources Research*, 11 :29–43, 2002.

[11] M.P. Armstrong and P.J. Densham. Toward a network map algebra. In *Thirteenth International Symposium on Automated Cartography (Auto-Carto 13)*, pages 1–10. American Congress on Surveying and Mapping, Bethesda, MD, 1996.

[12] S. Aronoff. *Geographic information systems : A management perspective*. WLD Publications, Ottawa, Canada, 1989.

[13] E. Atherton and F. Simon. Valuing the future : A MADA example involving nuclear waste storage. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 7 :304–321, 1998.

[14] R. Azibi and D. Vanderpooten. Construction of rule-based assignment models. *European Journal of Operation Research*, 138(2) :274–293, 2002.

[15] R. Azibi and D. Vanderpooten. Aggregation of dispersed consequences for constructing criteria : The evaluation of flood risk reduction strategies. *European Journal of Operation Research*, 144 :397–411, 2003.

[16] A. Bahri, L. Bejaoui, and S. Chakhar. On the similarity relation within fuzzy ontology components. In *The International Symposium on Computational Intelligence and Intelligent Informatics (ISCIII'05)*, Tunis-Gammarth, Tunisia, October 14-16 2005.

[17] A. Bahri, R. Bouaziz, S. Chakhar, and Y. Naïja. Implementing imperfect information in fuzzy databases. In *The International Symposium on Computational Intelligence and Intelligent Informatics (ISCIII'05)*, Tunis-Gammarth, Tunisia, October 14-16 2005.

[18] J. Ball. Towards a methodology for mapping regions of sustainability using PPGIS. *Progress in Planning*, 58(2) :81–140, 2002.

[19] S. Bally, C. Parent, and S. Spaccapietra. Modelling geographic data with multiple representation. *International Journal of Geographical Information Science*, 18(4) :327–352, 2004.

[20] C. Bana e Costa. *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*. Springer-Verlag, Berlin, 1990.

[21] C. Bana e Costa. Les problématiques de l'aide à la décision : Vers l'enrichissement de la trilogie choix-tri-rangement. *Recherche opérationnelle/Operations Research*, 30(2) :191–216, 1996.

[22] C. Bana e Costa, T.J. Stewart, and J.-C. Vansnick. Multicriteria decision analysis : Some thoughts based on the tutorial and discussion sessions of the ESIGMA meetings. *European Journal of Operation Research*, 99(1) :28–37, 1997.

[23] R. Banai. Fuzziness in geographical information systems : Contributions from the analytical hierarchy process. *International Journal of Geographical Information Systems*, 7 :315–329, 1993.

[24] C. Banville, C. Boulaire, M. Landry, J.-M., and Martel. A stakeholders approach to multiple criteria decision aid. *Systems Research Behavioral Sciences*, 14 :15–32, 1997.

[25] R. Barrera, M.J. Egenhofer, and A.U. Frank. Robust evaluation of spatial queries. In *5th International Symposium on Spatial Data Handling*, volume 1, pages 241–248, Charlestion, South Carolina, August 3-7 1992.

[26] M. Batty and Y. Xie. Modelling inside GIS : Part 1. Model structures, exploratory spatial data analysis and aggregation. *International Journal of Geographical Information Systems*, 8(3) :291–307, 1994.

[27] M. Batty, Y. Xie, and Z. Sun. Modelling urban dynamics through GIS-based cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems*, 23 :205–233, 1999.

[28] C. Bauzer-Medeiros. Spatio-temporal database systems : Foundations and applications. In *Proceedings of the VI Regional Informatics School*, Sao Carlos, Brazil, 2001.

[29] C. Bauzer-Medeiros, M.-J. Bellosta, and G. Jomier. Managing multiple representations of geo-referenced elements. In *Proceedings of the Database and Expert Systems Applications (DXSA'96)*, pages 364–370, September 1996.

[30] C. Bauzer-Medeiros, M.A. Casanova, and G. Câmara. The DOMUS projet—building an OODB GIS for environmental control. In *International Workshop on Advanced Research in GIS (IGIS'94)*, volume 856 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 45–54, 1994.

[31] C. Bauzer-Medeiros, M. Egenhofer, and E. Bertino, editors. *Advances in spatial and temporal databases, Proceedings 9th International Symposium, SSTD 2005*, volume 3633 of *Lecture Notes in Computer Science*, Angra dos Reis, Brazil, August 22-24 2005.

[32] C. Bauzer-Medeiros and G. Jomier. Managing alternatives and data evolution in GIS. In *Proceedings of the ACM/ISCA Workshop on Advances in Geographic Information Systems*, pages 36–39, 1993.

[33] C. Bauzer-Medeiros and G. Jomier. Using versions in GIS. In *Proceedings of the Database and Expert Systems Applications (DEXA'94)*, volume 856 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 465–474, 1994.

[34] Y. Bedard. Géomatique et systèmes d'information à référence spatiale en milieu municipal. *Journées de l'Association de Géomatique Municipale de Québec (AGMQ)*, Laval, Mars 1991.

[35] E. Beinat and P. Nijkamp. Land-use management and the path toward sustainability. In E. Beinat and P. Nijkamp, editors, *Multicriteria Analysis for Land-Use Management*, pages 1–13. Kluwer, 1998.

[36] N. Belacel. Multicriteria assignment method PROAFTN : Methodology and medical application. *European Journal of Operation Research*, 125(1) :175–183, 2000.

[37] V. Belton and T.J. Stewart. *Multiple criteria decision analysis : An integrated approach*. Clawer Academic Publishers, Boston, 2002.

[38] R. Benayoun, J. de Montgolfier, J. Tergny, and O.I. Larichev. Linear programming with multiple objective functions : STEp Method (STEM). *Mathematical Programming*, 1(3) :366–375, 1971.

[39] D.A. Bennett, M.P. Armstrong, and G.A. Wade. Agent mediated consensus-building for environmental problems : A genetic algorithm approach. In *Proceedings of the Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*, Santa Barbara, CA, 1996. Santa Fe, NM, National Center for Geographic Information and Analysis.

[40] D.A. Bennett, G.A. Wade, and M.P. Armstrong. Exploring the solution space of semi-structured geographical problems using genetic algorithms. *Transactions in GIS*, 3 :51–71, 1999.

[41] J. Berry. Analyzing accumulation surfaces, Map Analysis : Procedures and Applications in GIS Modeling. Technical report, Berry and Associates, Spatial Information Systems Inc., 2000.

[42] J.K. Berry. Cartographic modelling : Computer assisted analysis of maps. In *Papers in Spatial Information Systems*, New Haven, CT, USA, 1982. Yale University School of Forestry and Environmental Studies.

[43] J.K. Berry. A mathematical structure for analyzing maps. *Journal of Environmental Management*, 11 :317–325, 1987.

[44] J.K. Berry. Cartographic modeling : The analytical capabilities of GIS. In M.F. Goodchild, B.O. Parks, and L.T. Steyaert, editors, *Environmental Modeling with GIS*, pages 58–74, New York, 1993. Oxford University Press.

[45] K.J. Beven, R. Lamd, P. Quinn, R. Romanowicz, and J. Freer. TOPMODEL. In V.P. Singh, editor, *Computer Models of Watershed Hydrology*, pages 627–668. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, 1995.

[46] Y. Bishr. Overcoming the semantic and other barries to GIS interoperability. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(4) :299–314, 1998.

[47] G.F. Bonham-Carter. *Geographic information systems for geoscientists modeling in GIS*. Elsevier Science, New York, 1994.

[48] J.C. Borda. Mémoire sur les élections au scrutin, histoire de l'académie royale des sciences, Paris, 1781.

[49] K. Borhes, A. Laender, C. Bauzer-Medeiros, A. Silva, and C. Davis. The Web as a data source for spatial databases. In *Proceedings V Brazilian Geoinformatics Symposium GOEINFO 2003*, 2003.

[50] R. Bouaziz and S. Chakhar. Towards a flexible query language for FSM-based databases. In *Proceedings The 2006 ACM/IEEE International Conference on Signal-Image Technology and Internet-Based Systems (SITIS 2006)*, Lecture Notes in Computer Science, Hammamet, Tunisia, December 17-21 2006. Springer-Verlag. A paraître.

[51] R. Bouaziz, S. Chakhar, V. Mousseau, Sudha Ram, and A. Telmoudi. Database design and querying within the fuzzy semantic model. *Information Sciences*. A paraître.

[52] R. Bouaziz, S. Chakhar, and I. Saad. Membership functions definition in the fuzzy semantic model. In *The IEEE 3rd International Conference : Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT'05)*, Sousse, Tunisia, March 27-31 2005.

[53] D. Bouyssou. Some remarks on the notion of compensation in MCDM. *European Journal of Operation Research*, 26(1) :150–160, 1986.

[54] D. Bouyssou. Building criteria : A prerequisite for MCDA. In C.A. Bana e Costa, editor, *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*, pages 58–80. Springer-Verlag, Berlin, 1990.

[55] D. Bouyssou. Décision multicritère ou aide multicritère ? *Newsletter of the European Working Group "Multicriteria Aid for Decisions"*, Series 2(2) :1–2, Spring 1993.

[56] D. Bouyssou. Outranking relations : Do they have special properties ? *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 5 :99–111, 1996.

[57] D. Bouyssou, P. Perny, M. Pirlot, A. Tsouskias, and Ph. Vincke. A manifesto for the new MCDA era. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 2/3 :125–127, 1993.

[58] D. Bouyssou and J.-C. Vansnick. Noncompensatory and generalized noncompensatory preference structures. *Theory and Decision*, 21 :251–266, 1986.

[59] I. Bracken and C. Webster. *Information technology in geography and planning*. Routledge, London, 1990.

[60] J.P. Brans, B. Mareschal, and Ph. Vincke. PROMETHEE : A new family of outranking methods in multicriteria analysis. In J.P. Brans, editor, *Operational Research'84*, pages 408–421, North Holland, 1984. Elsevier Science Publishers, B.V.

[61] C. Braux. Cartographie multicritère : Guide méthodologique. Technical Report R 39146, BRGM, Novembre 1999. 71 pages.

[62] R. Breu. *Algebraic specification techniques in object oriented programming environments*. Number 562 in Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag, Berlin, 1991.

[63] C.J. Brooks. A parameterized region-growing programme for site allocation on raster suitability maps. *International Journal of Geographical Information Science*, 11 :375–396, 1997.

[64] C.J. Brooks. A genetic algorithm for designing optimal patch configurations in GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 15(6) :539–559, 2001.

[65] S. Brown, H. Schreier, and L. Vertinsky. Linking multiple accounts with GIS as decision support system to resolve forestry wildlife conflicts. *Journal of Environmental Management*, 42(4), 1994.

[66] M.J. Bruns and M.J. Egenhofer. User interface for map algebra. *Journal of the Urban and Regional Information Systems Associations*, 9(1) :44–54, 1997.

[67] P.A. Burrough. Environmental modelling with geographical information systems. In Z. Kemp, editor, *Innovations in GIS 4*, pages 143–153. Taylor & Francis, London, 1997.

[68] P.A. Burrough. GIS and geostatistics : Essential partners. *Environmental and Ecological Statistics*, 8 :361–377, 2001.

[69] P.H.A. Burrough. Methods of spatial analysis in GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, 4(3) :221–223, 1990.

[70] P.H.A. Burrough. Development of intelligent geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 6(1) :1–11, 1992.

[71] P.H.A. Burrough and A.U. Frank. Concepts and paradigms in spatial information : Are current geographic information systems truly generic ? *International Journal of Geographical Information Systems*, 9(2) :101–116, 1995.

[72] P.H.A. Burrough and A.U. Frank, editors. *Geographical objects with indeterminate boundaries*. Taylor & Francis, London, 1996.

[73] P.H.A. Burrough and R.A. McDonnell. *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press, New York, 1998.

[74] P.H.A. Burrough, R. van Rijn, and M. Rikken. Spatial data quality and error analysis issues : GIS functions and environmental modeling. In M.F. Goodchild, L.T. Steyaert, and B.O. Parks, editors, *GIS and Environmental Modeling : Progress and Research Issues*, pages 29–34. GIS World Books, Fort Collins, 1996.

[75] R. Caillet. Analyse multicritère : Étude et comparaison des méthodes existantes en vue d'une application en analyse de cycle de vie. Séries Scientifique 2003s-53, Centre Interuniversitaire de Recherche en Analyse des Organisation (CIRANO), Québec, Canada, 2003.

[76] D.R. Caldwell. Extending map algebra with flag operators. In *Proceedings of GeoComputation 2000*, 2000.

[77] G. Câmara, U.M. De Freitas, and M.A. Casanova. Fields and objects algebras for GIS operations. In *Proceedings of III Brazilian Symposium on GIS*, pages 407–424, 1995.

[78] G. Câmara, U.M. De Freitas, and J.P.C. Cordeiro. Towards an algebra of geographical fields. In *5th Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing*, pages 205–212, Anais, Curitiba, 1994.

[79] J.C. Cambell, J. Radke, J.T. Gless, and R.M. Whirtshafter. An application of linear programming and geographic information systems : Cropland allocation in Antigua. *Environment and Planning A*, 24 :535–549, 1992.

[80] A. Can. Residential quality assessment : Alternative approaches using GIS. *The Annals of Regional Science*, 23 :97–110, 1992.

[81] A. Can. Residential quality assessment : Alternative approaches using GIS. In M.M. Fischer and P. Nijkamp, editors, *Geographic Information Systems, Spatial Modelling, and Policy Evaluation*. 1993.

[82] P.P. Cao and F.V. Brustein. An asynchronous group decision support system study for intelligent multicriteria decision making. In *Proceedings of the 32rd IEEE Hawaii International Conference on System Sciences*, 1999.

[83] F. Caro, T. Shirabe, M. Guignard, and A. Weintraub. School redistricting : Embedding GIS tools with integer programming. *Journal of the Operational Research Society*, 55(8) :836–849, 2004.

[84] S. Carver. Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 5(3) :321–339, 1991.

[85] S. Carver. Developing web-based GIS/MCE : improving access to data and spatial decision support tools. In *Multi-criteria decision-making and analysis : a geographic information sciences approach*, pages 49–75. Ashgate, 1999.

[86] S. Carver and R. Peckham. Internet-based applications of GIS in planning. In S. Geertman, S. Openshaw, and J. Stillwell, editors, *Geographical information and planning : European perspectives*. Springer-Verlag, 1999.

[87] S. Chakhar. Toward a spatial decision support system : Multi-criteria evaluation functions into geographical information systems. Mémoire de DEA, Institut Supérieur de Gestion, Université de Tunis, 2001. 79 pages.

[88] S. Chakhar and J.-M. Martel. Enhancing geographical information systems capabilities with multi-criteria evaluation functions. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 7(2) :47–71, 2003.

[89] S. Chakhar and J.-M. Martel. *Towards a spatial decision support system : Multi-criteria evaluation functions inside geographical information system, Annales du LAMSADE*, pages 97–123. Number 2. 2004.

[90] S. Chakhar and V. Mousseau. Towards a typology of spatial decision problems. In *The 58th Meeting of the European Working Group Multiple Criteria Decision Aiding (MCDA'58), Moscow, Russia*, October 9-11 2003.

[91] S. Chakhar and V. Mousseau. Modélisation des préférences temporelles fondée sur les concepts de concordance et non-discordance. In *Francoro IV, Fribourg, Suisse*, pages 28–29, June 18-21 2004a.

[92] S. Chakhar and V. Mousseau. *Towards a typology of spatial decision problems, Annales du LAMSADE*, pages 125–154. Number 2. 2004b.

[93] S. Chakhar and V. Mousseau. Modélisation des préférences temporelles dans un contexte d'aide multicritère à la décision. In *ROADEF'05, Tours, France*, Febrary 14-16 2005.

[94] S. Chakhar and V. Mousseau. DMA : An algebra for multicriteria spatial modeling. In *ICA Workshop on Geospatial Analysis and Modeling, Vienna, Austria*, pages 155–185, 8 July 2006a.

[95] S. Chakhar and V. Mousseau. Generation of spatial decision alternatives based on a planar subdivision of the study area. In *Proceedings The 2006 ACM/IEEE International Conference on Signal-Image Technology and Internet-Based Systems (SITIS 2006)*, Lecture Notes in Computer Science, Hammamet, Tunisia, December 17-21 2006b. Springer-Verlag. A paraître.

[96] S. Chakhar and V. Mousseau. DMA : An algebra for multicriteria spatial modelling. *Computers, Environment and Urban Systems*, En révision.

[97] S. Chakhar, V. Mousseau, C. Pusceddu, and B. Roy. Decision map for spatial decision making. In *The 9th International Computers in Urban Planning and Urban Management Conference (CUPUM'05)*, London, UK, 29 July-1 August 2005.

[98] S. Chakhar and A. Telmoudi. Extending database capabilities : Fuzzy semantic model. In *The IEEE 2nd Conference on Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT'04)*, Sousse, Tunisia, March 15-20 2004.

[99] S. Chakhar and A. Telmoudi. Conceptual design and implementation of the fuzzy semantic model. In *The 11th International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty (IPMU 2006)*, volume III, pages 2438–2445, Paris, France, July 2-7 2006.

[100] K. Chan and D. White. Map Algebra : An object-oriented implementation. In R. Angeebrug and Y. Schiffman, editors, *International Geographic Information Systems (IGID) Symposium : The Research Agenda*, volume II, pages 127–150, Arlington, VA, 1987. Association of American Geographers.

[101] V. Chankong and Y.Y. Haimes. *Multiobjective decision making theory and methodology*. Elsevier Science, New York, 1983.

[102] S.J. Chen and C.L. Hwang. *Fuzzy multiple attribute decision making : Methods and applications*. Springer-Verlag, Berlin, 1992.

[103] X. Chen, M. Ni, and J. McCalley. Use of multicriterion techniques for control-room security economy decision-making. In *Proceedings of the 2002 Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Naples, Italy, Septembre 2002.

[104] J.-J. Chevallier. De l'information à l'action : Vers des systèmes d'aide à la décision à référence spatiale (SADRS). In *EGIS/MARI'94*, Paris, 1994.

[105] E. Choo, B. Schoner, and W.C. Wedley. Interpretation of criteria weights in multicriteria decision-making. *Computers & Industrial Engineering*, 37(11) :527–541, 1999.

[106] N. Chrisman. *Exploring geographic information systems*. John Whiley & Sons, NY, 1st edition, 1996.

[107] N. Chrisman. *Exploring geographic information systems*. John Whiley & Sons, NY, 2nd edition, 2002.

[108] R.L. Church. Geographical information systems and location science. *Computers and Operational Research*, 29(6) :541–562, 2002.

[109] R.L. Church, A.T. Murray, M.A. Figueroa, and K.H. Barber. Support system development for forest ecosystem management. *European Journal of Operation Research*, 121 :247–258, 2000.

[110] E. Chuvieco. Integration of linear programming and GIS for land use modeling. *International Journal of Geographical Information Systems*, 7(1) :71–83, 1993.

[111] C. Claramunt, M. Thériault, and C. Parent. *Innovations in GIS*, chapter A qualitative representation of evolving spatial enties in two-dimensional topological spaces, pages 128–139. Taylor & Francis, London, 1998.

[112] K. Clarke and L. Gaydos. Loose-coupling a cellular automaton model and GIS : Long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(7) :699–714, 1998.

[113] M. Clarke. *Geographical information systems for urban and regional planning*, chapter Geographic information systems and model based analysis : Towards effective decision support, pages 165–175. Kluwer Academic Publishers, Dorchecht, 1990.

[114] E. Clementini and P. Di Felice. A comparison of methods for representing topological relationships. *Information sciences*, 3(3) :149–178, 1995.

[115] E. Clementini, P. Di Felice, and P. van Oosterrom. A small set of formal topological relationships suitable for end-user interaction. In D. Abel and B.C. Ooi, editors, *3rd International Symposium on Large Spatial Databases*, number 692 in Lecture Notes in Computer Science, pages 277–295, Singapore, June 1993. Springer-Verlag.

[116] CLIPS. CLIPS reference manual : Advanced programming guide, Vol. 3, 2002.

[117] J.N. Clímaco, C.H. Antunes, and M.J. Alves. Interactive decision support for multiobjective transportation problems. *European Journal of Operation Research*, 65(1) :58–67, 1993.

[118] M.G. Collins, F.R. Steiner, and M.J. Rushman. Land-use suitability analysis in the united states : Historical development and promising technological achievement. *Environmental Management*, 28(5) :611–621, 2001.

[119] T.H. Cormen, C.E. Leiserson, R.L. Rivest, and C. Stein. *Introduction to Algorithms*. MIT PressMcGraw-Hill, 2nd edition, 2001.

[120] J.G. Corripio. Vectorial algebra algorithms for calculating terrain parameters from DEMs and solar radiation modelling in mountainous terrain. *International Journal of Geographical Information Science*, 17(1) :1–23, 2003.

[121] H. Coucelelis and M. Monmonnier. Using SUSS to resolve NIMBY : How spatial understanding support systems can help with the "Not in My Back Yard" syndrome. *Geographical Systems*, 2 :83–101, 1995.

[122] H. Couclelis. People manipulate objects (but cultivate fields) : Beyond the raster vector debate in GIS. In A.U. Frank and I. Campari, editors, *Theories and methods of spatio-temporal reasoning in geographic space*, number 639 in Lecture Notes in Computer Science, pages 65–77, Berlin, 1992. Springer-Verlag.

[123] T.J. Cova and R.L. Church. Contiguity constraints for single-region site search. *Geographical Analysis*, 32 :306–329, 2000.

[124] T.J. Cova and M.F. Goodchild. Extending geographical representation to include fields of spatial objects. *International Journal of Geographical Information Science*, 16(6) :509–532, 2002.

[125] D.J. Cowen. GIS versus CAD versus DBMS : What are the differences ? *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54 :1551–1554, 1988.

[126] D.J. Cowen and W.L. Shirley. Integrated planning information systems. In D.J. Maguire, M.F. Goodchild, and D.W. Rhind, editors, *Geographical Information Systems : Principles and Applications*, volume 2, pages 297–310. Longman, London, UK, 1991.

[127] R.G. Cromley. A comparison of suitability mapping and multiobjective programming techniques for performing spatial searches. *The Pennsylvania Geographer*, 32 :37–46, 1994.

[128] R.G. Cromley and D.M. Hanink. Coupling land use allocation models with raster GIS. *Journal of Geographical Systems*, 1 :137–153, 1999.

[129] F.C. Dai, C.F. Lee, and X.H. Zhang. GIS-based geo-environmental evaluation for urban and land-use planning : A case study. *Engineering Geology*, 61 :257–271, 2001.

[130] B.E. Davis. *GIS : A visual approach*. OnWord Press, Canada, 2nd edition, 2001.

[131] M. Dear. Understanding and overcoming the NIMBY syndrome. *Journal of the American Planning Association*, 58(5) :288–300, 1992.

[132] M. Gómez Delgado and S. Tarantola. Global sensitivity analysis, GIS and multi-criteria evaluation for a sustainable planning of a hazardous waste disposal site in Spain. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(4) :449–466, 2006.

[133] M.N. DeMers. *Fundamentals of geographical information systems*. John Wiley & Sons, New York, 1997.

[134] P.J. Densham. Spatial decision support systems. In D.J. Maguitre, M.F. Goodchild, and D. Rhind, editors, *Geographical information systems : Principles and applications*, volume 1, pages 403–412. Longman, London, 1991.

[135] P.J. Densham and G. Rushton. Decision support systems for locational planning. In R.G. Golledge and H. Timmermans, editors, *Behaviorial modelling in geography and planning*, pages 56–90. Croom Helm, London, 1988.

[136] B. Dente. Présentation du projet européen : Comparative study on successful siting processes for waste facilities in Europe. Séminaire IDHEAP : Politique de l'environnement : Mise en oeuvre d'un nouveau type, Institut des Hautes Etudes en Administration Publique, Berne, October 5-7 1995.

[137] T. Devogele, C. Parent, and S. Spaccapietra. On spatial database integration. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(4) :335–352, 1998.

[138] J.T. Diamond and J.R. Wright. Design of an integrated spatial information system for multiobjective land-use planning. *Environment and Planning B*, 15(2) :205–214, 1988.

[139] L. Dias, V. Mousseau, J. Figueira, and J. Clímaco. An aggregation/disaggregation approach to obtain robust conclusions with ELECTRE TRI. *European Journal of Operation Research*, 138 :332–348, 2002.

[140] L.C. Dias and J.N. Clímaco. ELECTRE TRI for groups with imprecise information on parameter values. *Group Decision and Negotiation*, 9 :355–377, 2000.

[141] L.C. Dias and V. Mousseau. IRIS : A DSS for multiple criteria sorting problems. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 12 :285–298, 2003.

[142] L.C. Dias and V. Mousseau. Inferring ELECTRE's veto-related parameters from outranking examples. *European Journal of Operation Research*, 170(1) :172–191, 2006.

[143] Y. Ding and A.S. Fotheringham. The integration of spatial analysis and GIS. *Computers, Environment and Urban Systems*, 16(1) :3–19, 1992.

[144] C. Dorenbeck and M. Egenhofer. Algebraic optimization of combined overlay operations. In D. Mark and D. White, editors, *Auto-Carto 10 : Technical Papers of the 1991 ACSM-ASPRS Annual Convention*, pages 296–312, Baltimore, Maryland, USA, March 1991. ACSM-ASPRS.

[145] M. Doumpos and C. Zopounidis. *Multicriteria decision aid classification methods*. Kluwer Academic Publishers, 2002.

[146] M. Doumpos and C. Zopounidis. On the development of an outranking relation for ordinal classification problems : An experimental investigation of a new methodology. *Optimization Methods and Software*, 17(2) :293–317, 2002.

[147] E.I. Ducheyne, R.R. De Wulf, and B. De Baets. A spatial approach to forest-management optimization : Linking GIS and multiple objective genetic algorithms. 20(8) :917–928, 2006.

[148] P. Dumolard. Valider un découpage territorial. In G. Desplanques, editor, *Actes des Entretiens Jacques Cartier : Découpages territoriaux*, Paris, 1999. INSEE.

[149] J.S. Dyer. Interactive goal programming. *Management Science*, 19(1) :62–70, 1972.

[150] J.R. Eastman. IDRISI for Windows, Version 2.0 : Tutorial exercises. Technical report, Graduate School of Geography—Clark University, Worcester, MA, 1997.

[151] J.R. Eastman, W. Jin, P.A.K. Kyem, and J. Toledano. Raster procedures for multicriteria/multi-objective decisions. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61 :539–547, 1995.

[152] J.R. Eastman, P.A.K. Kyem, J. Toledano, and W. Jin. GIS and decision making. Technical report, The United Nations Institue for Training and Research (UNITAR), Geneva, 1993a.

[153] R.J. Eastman, P.A.K. Kyem, and J. Toledno. A procedure for multiple-objective decision making in GIS under conditions of conflicting objectives. In J. Hents, H.F.L. Ottens, and H.J. Scholten, editors, *Fourth European Conference on GIS (ESIG'93) Proceedings*, volume 1, pages 438–447. 1993b.

[154] M.J. Egenhofer and H.T. Bruns. Visual map algebra : A direct manipulation user interface for GIS. In S. Spaccapietra and R. Jain, editors, *Visual Database Systems 3, Visual Information Management, Proceedings of the Third IFIP 2.6 Working Conference on Visual Database Systems*, pages 235–253, Lausanne, Switzerland, 1995. Chapman & Hall.

[155] M.J. Egenhofer and A.U. Frank. LOBSTER : Combining AI and database techniques for GIS. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56(6) :919–926, 1990.

[156] M.J. Egenhofer and F.R. Franzona. A point-set topological spatial relations. *International Journal of Geographical Information Systems*, 5(2) :161–174, 1991.

[157] M. Ehrgott. *Multicriteria optimization*, chapter Combinatorial problems with multiple objectives, pages 153–220. Number 491 in Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer-Verlag, 2000.

[158] K. Eldrandaly, N. Eldin, and D. Sui. A COM-based spatial decision support system for industrial site selection. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 7(2) :72–92, 2003.

[159] K.A. Eldrandaly. A COM-based expert system for selecting the suitable map projection in ArcGIS. *Expert Systems with Applications*, 31(1) :94–1000, 2006.

[160] G. Engelen, S. Geertman, P. Smits, and C. Wessels. Dynamic GIS and strategic physical planning support : A practical application. In J.C. Stillwell, S. Geertman, and S. Openshaw, editors, *Geographical information and planning*, pages 87–111, New York, 1999.

[161] E.F. Epstein. Development of spatial information systems in public agencies. *Computers, Environment and Urban Systems*, 13(3) :141–154, 1989.

[162] ESRI. Arcobjects Developer Help, Environmental Systems Research Institute, Inc., 2002.

[163] G.W. Evans. An overview of techniques for solving multiobjective mathematical problems. *Management Science*, 30(11) :1268–1282, 1984.

[164] R.D. Feick and B.G. Hall. Balacing consensus and conflict with a GIS-based multi-participant, multi-criteria decision support tool. *GeoJournal*, 53 :391–406, 2002.

[165] R.D. Feick and B.G. Hall. A method for examining the spatial dimension of multi-criteria weight sensitivity. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7) :703–726, 2004.

[166] J. Figueira, S. Greco, and M. Ehrgott, editors. *Multiple Criteria Decision Analysis : State of the Art Surveys*. Springer-Verlag, New York, 2005a.

[167] J. Figueira, V. Mousseau, and B. Roy. *Multiple Criteria Decision Analysis : State of the Art Surveys*, chapter ELECTRE methods, pages 133–162. Springer-Verlag, New York, 2005b.

[168] J.R. Figueira, Y. DE Smet, B. Marechall, and J.-P. Brans. MCDA methods for sorting and clustering problems : PROMETHEE TRI and PROMETHEE CLUSTER. *European Journal of Operation Research*, A paraître.

[169] M.M. Fischer. From conventional to knowledge-based geographic information systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, 18(4) :233–242, 1994.

[170] M.M. Fischer and P. Nijkamp. Geographic information systems and spatial analysis. *The Annals of Regional Sciences*, 26 :3–17, 1992.

[171] M.M. Fischer and P. Nijkamp. Design and use of geographic information systems and spatial models. In M.M. Fischer and P. Nijkamp, editors, *Geographic information systems, spatial modelling, and policy evaluation*. Springer-Verlag, New York, 1993.

[172] P.C. Fishburn. *Utility theory for decision making*. John Wiley & Sons, New York, 1970.

[173] P. Fisher. Fuzzy modelling. In S. Openshaw and R.J. Abrahart, editors, *GeoComputation*, pages 161–186, London, 2000. Taylor & Francis.

[174] G. Fleming, M. van der Merwe, and G. McFerren. Fuzzy expert systems and GIS for cholera health risk prediction in southern Africa. *Environmental Modelling & Software*, 22 :442–448, 2007.

[175] L. de Floriani, P. Magillo, and E. Puppo. *Handbook of Computational Geometry*, chapter Applications of computational geometry to geographic information systems, pages 333–386. Elsevier Science B.V., 1999.

[176] K.E. Foote and M. Lynch. Geographic information systems as an integrating technology : Context, concepts and definitions. Technical report, Department of Geography, University of Texas at Austin, 1996. [URL : `http ://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/intro/intro-f.html`].

[177] E.H. Forman. Multicriteria decision making and the analytical hierarchy process. In C.A. Bana e Costa, editor, *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*, pages 296–318. Springer-Verlag, Berlin-, 1990.

[178] A.S. Fotheringham and P.A. Rogerson. GIS and spatial analytical problems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 7(1) :3–19, 1993.

[179] A.U. Frank and D.M. Mark. *Geographic Information Systems : Principles and Applications*, volume 1, chapter Languages issues for GIS, pages 147–163. Longman Scientific & Technical Inc, Esses, 1991.

[180] P. Frank. The great LULU trading game. *Planning*, 58(5) :15–17, 1992.

[181] S. Gallant. *Neural Network Learning*. MIT Press, 1993.

[182] X. Gandibleux, F. Beugnies, and S. Randriamasy. Martins' algorithm revisited for multi-objective shortest path problems with a MaxMin cost function. *4OR : A Quarterly Journal of Operations Research*, 4(1) :47–59, 2006.

[183] P. Gao, C. Zhan, and S. Menon. An overview of cell-based modeling with GIS. In M. Goodchild, L.T. Steyaert, B.O Parks, C. Johnstone, D. Maidment, M. Crane, and S. Glendinning, editors, *GIS and environmental modeling : Progress and research issues*, pages 325–331, Fort Collins, CO, 1996. GIS World.

[184] X. Gao and Y. Asami. Estimating the boundary lines of land lots with a multiobjective optimization approach. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 32(4) :581–596, 2005.

[185] L.R. Gardiner and R.E. Steuer. Unified interactive multiple objective programming. *European Journal of Operation Research*, 74 :391–406, 1994a.

[186] L.R. Gardiner and R.E. Steuer. Unified interactive multiple objective programming : An open architecture for accommodating new procedures. *Journal of the Operational Research Society*, 45(12) :1456–1466, 1994b.

[187] M. Gershon. *Model choice in multi-objective decision making in natural resource systems*. PhD thesis, University of Arizona, 1981.

[188] M. Gershon and L. Duckstein. A procedure for selection of a multiobjective technique with application to water and mineral ressources. *Applied Mathematics and Computation*, 14 :245–271, 1984.

[189] A. Getis and J.K. Ord. Local spatial statistics : An overview. In P. Longley and M. Batty, editors, *Spatial analysis : Modelling in a GIS environment*, pages 261–277. Geoinformation International, Cambridge, 1996.

[190] I. Gilboa and D. Schmeidler. Case-based knowledge and induction. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics : Part A*, 30(2) :85–95, 2000.

[191] H.R. Gimblett, editor. *Integrating geographic information systems and agent-based modeling techniques for simulating social and ecological processes*. Oxford University Press, London, 2002.

[192] R.H. Gimblett, G.L. Ball, and A.W. Guise. Autonomous rule generation and assessment for complex spatial modeling. *Landscape and Urban Planning*, 30 :13–26, 1994.

[193] C. Giupponi, B. Eiselt, and P.F. Ghetti. A multicriteria approach for mapping risks or agricultural pollution for water resources : They Venice Lagon watershed case study. *Journal of Environmental Management*, pages 259–269, 1999.

[194] A. Goicoechea, E.Z. Stakhiv, and F. Li. Experimental evaluation of multiple criteria decision models for application to water resources planning. *Water Resource Bulletin*, 28(1) :89–102, 1992.

[195] E.G. Gomes and M.P.E. Lins. Integrating geographical information systems and multicriteria methods : A case study. *Annals of Operations Research*, 116 :243–269, 2002.

[196] M.F. Goodchild. An evaluation of lattice solutions to the corridor location problem. *Environment and Planning*, A9 :727–738, 1977.

[197] M.F. Goodchild. Towards an enumeration and classification of GIS functions. In R.T. Angeenberg and Y.M. Sciffman, editors, *International Geographic Information Systems (IGIS) : The research agenda NASA Symposium*, volume 2, pages 62–77, Arlington, Virginia, 1987.

[198] M.F Goodchild. Process on the GIS research agenda. In *Second European Conference on GIS (ESIG'91) Proceedings*, volume 1, pages 342–350, Brussels, Belgium, April 2-5 1991.

[199] M.F Goodchild. Geographical data modeling. *Computers & Geosciences*, 18 :401–408, 1992a.

[200] M.F Goodchild. Geographical information science. *International Journal of Geographical Information Systems*, 6(1) :31–45, 1992b.

[201] M.F. Goodchild. *Environmental modeling with GIS*, chapter The state for GIS for environmental problem solving, pages 8–15. Oxford University Press, New York, 1993.

[202] M.F. Goodchild. Part 1 Spatial analysts and GIS practitioners : The current status of GIS and spatial analysis. *Journal of Geographical System*, 2(1) :5–10, 2000.

[203] M.F. Goodchild, R. Haining, and S. Wise. Integrating GIS and spatial data analysis : Problems and possibilities. *International Journal of Geographical Information Systems*, 6 :407–423, 1992.

[204] M.F. Goodchild, B.O. Parks, and L.T. Steyaert, editors. *Environmental modeling with GIS*. Oxford University Press, New York, 1993.

[205] S. Greco. A new PCCA method : IDRA. *European Journal of Operation Research*, 98(3) :587–601, 1997.

[206] D.J. Grimshaw. *Bringing geographical information systems into business*. Longman Scientic and Technical, Harlow, Essex, England, 1994.

[207] S. Grumbach, P. Rigaux, and L. Segoufin. Spatio-temporal data handling with constraints. *GeoInformatica*, 5(1) :95–115, 2001.

[208] W. Grunberg, J.C. Dale, M. Haseltine, N. Lerman, A. Olsson, and B.J. Orr. Web-based map-algebra challenges : A polygon solution. In *Proceedings of the 24th Annual ESRI International User Conference*, San Diego, California, August 9-10 2004.

[209] A. Guimarães-Pereira. *Extending environmental impact assessment processes : Generation of alternatives for siting and routing infrastructural facilities by multi-criteria and genetic algorithms*. PhD thesis, New University of Lisbon, Lisbon, Portugal, 1998.

[210] A. Guitouni. *L'ingénierie du choix d'une procédure d'agrégation multicritère*. PhD thesis, FSA, Université Laval, Québec, 1998.

[211] A. Guitouni and J.-M. Martel. Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. *European Journal of Operation Research*, 109 :501–521, 1998.

[212] A. Guitouni, J.-M. Martel, and M. Bélanger. Plusieurs PAMC : Est-ce une nécessité ? Document de Travail 1999-019, Centre de recherche en modélisation, information et décision (CERMID), Faculté des Sciences de l'Administration, Université Laval, 1999a. 27 pages.

[213] A. Guitouni, J.-M. Martel, and Ph. Vincke. Un cadre de référence pour le choix d'une procédure d'agrégation multicritère. Document de Travail 1999-013, Centre de recherche sur l'aide à l'évaluation et à la décision dans les organisations (CRAEDO), Faculté des Sciences de l'Administration, Université Laval, 1999b. 24 pages.

[214] A. Guitouni, J.-M. Martel, and Ph. Vincke. A framework to choose a discrete multicriterion aggregation procedure. Discussion Papers IS-MG 2000/03, Institut de Statistique et de Recherche Opérationnelle, Université Libre de Bruxelles, Belgique, 2000.

[215] R.H. Güting. Geo-Relational algebra : A model and query language for geometric database systems. In J. Schmidt, S. Ceri, and M. Missikof, editors, *Advances in Database Technology—EDBT'88 Proceedings of the International Conference on Extending Data Base Technology*, number 303 in Lecture Notes in Computer Science, pages 506–527, Venice, Italy, 1988.

[216] J. Guttag. Abstract data types and the development of data structures. *Communications of the ACM*, 20(6) :396–404, 1977.

[217] J. Guttag and J.J. Horning. The algebraic specification of abstract data types. *Acta Informatica*, 10(1) :27–52, 1978.

[218] M.M. Haklay. Map calculus in GIS : A proposal and demonstration. *International Journal of Geographical Information Science*, 18(2) :107–125, 2004.

[219] G.B. Hall, F. Wang, and Subaryono. Comparison of boolean and fuzzy classification methods in land suitability analysis by using geographical information systems. *Environment and Planning A*, 24 :497–516, 1992.

[220] R.M. Haralick, S. R. Sternberg, and X. Zhuang. Image analysis using mathematical morphology. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 9(4) :532–550, 1987.

[221] Healey. A planner's day : Knowledge and action in communicative practice. *Journal of the American Planning Association*, 58 :9–20, 1992.

[222] P. Healey. *Collaborative planning*. Macmillan, London, 1997.

[223] M. Heiman. From the 'Not in My Backyard !' to 'Not in Anybody's Backyard !'. *Journal of the American Planning Association*, 56(3) :359–362, 1990.

[224] P. Hendriks. Collaborative exploration of spatial problems. In *The 7th Collaborative Spatial Decision Making Research Initiative*, Santa Barbara, USA, 16-19 June 1995. NCGIA.

[225] M. Herwijnen and P. van Rietveld. *Multicriteria decision-making and analysis : A geographic information sciences approach*, chapter Spatial dimensions in multicriteria analysis, pages 77–99. Ashgate, New York, 1999.

[226] G.B.M. Hevelink, P.H.A. Burrough, and A. Stein. Propagation of errors in spatial modeling with gis. *International Journal of Geographical Information Systems*, 3(4) :303–322, 1989.

[227] I. Heywood, J. Olivier, and S. Tomlinson. Building an exploratory multi-criteria modelling environment for spatial decision support. In *Innovations in GIS 2*, pages 127–136, London, 1995. Taylor & Francis.

[228] E. Hinloopen, P. Nijkamp, and P. Rietveld. Qualitative discrete multiple criteria choice models in regional planning. *Regional Science and Urban Economics*, 13 :77–102, 1983.

[229] B.F. Hobbs. A comparison of weighting methods in power plant siting. *Decision Sciences*, 11 :725–737, 1980.

[230] B.F. Hobbs, V. Chankong, W. Hamadeh, and E.Z. Stakhiv. Does choice of multicriteria method matter ? An experiment in water resource planning. *Water Resources Research*, 238 :1767–1779, 1992.

[231] B.F. Hobbs and P.M. Meier. Multicriteria methods for resource planning : An experimental comparison. *IEEE Transactions on Power Systems*, 9 :1811–1817, 1994.

[232] L.D. Hopkins. Design method evaluation : An experiment with corridor selection. *Socio-economic Planning Sciences*, 7 :423–436, 1973.

[233] L.D. Hopkins. Methods for generating land suitability maps : A comparative evaluation. *Journal of the American Institute of Planners*, 43(4) :386–400, 1977.

[234] D.L. Huber and R.L. Church. Transmission corridor location modeling. *Journal of Transportation Engineering*, 111(2) :114–130, 1985.

[235] C. Hwang and A. Masud. *Multiobjective decision making methods and applications*. Springer-Verlag, Berlin, 1979.

[236] C.-L. Hwang and K.L. Yoon. *Multiple attribute decision making -Methods and applications : A state of the art survey*. Number 186 in Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems (LNEMS). Springer-Verlag, New York, 1981.

[237] C.L. Hwang, S.R. Paidy, K. Yoon, and Masud. Mathematical programming with multiple objectives : A tutorial. *Computer & Operations Research*, 7 :5–31, 1980.

[238] R.M. Itami, G.S. MacLaren, and K.M. Hirst. Integrating the analytical hierarchy process with GIS to capture expert knowledge for land capability assessment. In *Proceedings 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4) : Problems, Prospects and Research Needs*, Banff, Canada, September 2-8 2000.

[239] O. Jaakkola. Multi-scale categorical data bases with automatic generalization transformations based on map algebra. *Cartography and Geographical Information Systems*, 25(4) :195–207, 1998.

[240] E. Jacquet-Lagrèze. *Systèmes de décision et acteurs multiples—Contribution à une théorie de l'action pour les sciences des organisations*. Thèse d'État, Université Paris Dauphine, Paris, France, 1981.

[241] E. Jacquet-Lagrèze. Interactive assessment of preferences using holistic judgments : The PREFCALC system. In C. Bana e Costa, editor, *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*, pages 335–350. Springer-Verlag, Berlin, 1990.

[242] E. Jacquet-Lagrèze and J. Siskos. Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision making, the UTA method. *European Journal of Operation Research*, 10(2) :151–164, 1982.

[243] D.K. Jain, U.S. Tim, and R. Jolly. Spatial decision support system for planning sustainable livestock production. *Computers, Environment and Urban Systems*, 19(1) :57–75, 1995.

[244] P. Jankowski. Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9(3) :251–273, 1995.

[245] P. Jankowski, N. Andrienko, and G. Andrienko. Map-centered exploratory approach to multiple criteria spatial decision making. *International Journal of Geographical Information Science*, 15(2) :101–127, 2001.

[246] P. Jankowski and G. Ewart. Spatial decision support system for health practitioners : Selecting a location for rural health practice. *Geographical Systems*, 3(2) :297–299, 1996.

[247] P. Jankowski, T.L. Nyerges, A. Smith, T.J. Moore, and E. Horvath. Spatial group choice : A SDSS tool for collaborative spatial decision-making. *International Journal of Geographical Information Systems*, 11 :566–602, 1997.

[248] P. Jankowski and L. Richard. Integration of GIS-based suitability analysis and multi-criteria evaluation in a spatial decision support system for route selection. *Environment and Planning B*, 21 :323–340, 1994.

[249] P. Jankowski and C. ZurBrunnen. A model management approach to modelling simulation to natural systems. In *Proceedings of the 4th international Symposium on Spatial Data Handling*, volume 1, Zurich, Switzerland, 1990.

[250] R. Janssen, P. Nijkamp, and H. Voogd. Environmental policy analysis : Which method for which problem. *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, 5 :839–855, 1984.

[251] R. Janssen and P. Rietveld. *Multicriteria analysis and geographical information systems : An application to agriculture land-use in Netherlands*, pages 129–139. Kluwer Academic Publishers, Dorchecht, 1990.

[252] R. Janssen and M. van Herwijnen. Map transformation and aggregation methods for spatial decision support. In E. Beinat and P. Nijkamp, editors, *Multicriteria Analysis for Land-Use Management*, Number 9 in Environment and Management Series, pages 253–270. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1998.

[253] R. Janssen, M. van Herwijnen, and E. Beinat. DEFINITE for Windows. a system to support decisions on a finite set of alternatives. Technical report, Institute for Environmental Studies (IVM), Amsterdam, 2001. [URL : http ://www.definite-bosda.nl].

[254] R.G. Javalgi and H.K. Jain. Integrating multiple criteria decision making models into the decision support system framework for marketing decisions. *Naval Research Logistics*, 35(6) :575–596, 1988.

[255] R.G. Javalgi and H.K. Jain. Integrating multiple decision making models into the decision support system framework for marketing decisions. *Naval Research Logistics*, 35(6) :575–596, 1999.

[256] T. Jelassi. Multicriteria decision-making : From "stand-alone" methods to integrated and intelligent DSS. In Y. Sawaragi, K. Inoue, and H. Nakayama, editors, *Toward interactive and intelligent decision support systems*, volume 2, pages 90–99, Berlin, 1987. Springer-Verlag.

[257] H. Jiang and J.R. Esatman. Applications of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(2) :173–184, 2000.

[258] F. Joerin. *Décider sur le territoire. Proposition d'une approche par utilisation du SIG et de méthodes d'analyse multicritère*. PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, 1998.

[259] F. Joerin and A. Musy. Land management with gis and multicriteria analysis. *International Transactions on Operational Research*, 7 :67–87, 2000.

[260] F. Joerin, M. Thériault, and A. Musy. Using GIS and outranking multicriteria analysis for land-use suitability assessment. *International Journal of Geographical Information Science*, 15 :153–174, 2001.

[261] C. Jun. Design of an intelligent geographic information system for multi-criteria site analysis. *URISA Journal*, 12 :5–17, 2000.

[262] S. Kalogirou. Expert systems and GIS : An application of land suitability application. *Computers, Environment and Urban Systems*, 26(2-3) :69–112, 2002.

[263] H.A. Karimi and B.H. Houston. Evaluating strategies for integrating environmental models with GIS : Current trends and future needs. *Computers, Environment and Urban Systems*, 20(6) :413–425, 1996.

[264] D. Karssenberg, P.A. Burrough, R. Sluiter, and K. de Jong. The PCRaster software and course materials for teaching numerical modelling in the environmental sciences. *Transactions in GIS*, 5 :99–110, 2001.

[265] M. Kavouras and E. Stefanakis. Determination of the optimum path on the Earth's surface. In *Proceedings of the 17th International Cartographic Association Conference*, Barcelona, Spain, September 1995.

[266] H. Kächele and S. Dabbert. An economic approach for a better understanding of conflicts between farmers and nature conservationists—an application of the decision support system MODAM to the Lower Odra Valley National Park. *Agricultural Systems*, 74 :241–255, 2002.

[267] R.L. Keeney. *Valued-focused thinking : A path to creative decision*. Harvard University Press, Cambridge, USA, 1992.

[268] R.L. Keeney and H. Raffia. *Decisions with multiple objectives : Preferences and value trade-offs*. John Wiley & Sons, New York, 1976.

[269] C.P. Keller and J.D. Strapp. Design of a multi-criteria decision support system for land reform using GIS and API. In *Proceedings of the Second International Conference on Integrating Geographic Information Systems and Environmental Modelling*, Breckenridge, Colorado, September 1993.

[270] W. A.-S. Khalil, A. Goonetilleke, and S. Kokot ans S. Carroll. Use of chemometric methods and mulitcriteria decision-making for site selection for sustainable on-site sewage effluent disposal. *Analytica Chimica Acta*, 506(1) :41–56, 2003.

[271] M. Kii and K. Doi. Multiagent land-use and transport model for the policy evaluation of a compact city. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 32(4) :485–504, 2005.

[272] G.A. Kiker, T.S. Bridges, I. Linkov, A. Varghese, and T.Seager. Application of multicriteria decision analysis in environmental decision-making. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 1(2) :1–14, 2005.

[273] K. Kirby and M. Pazner. Graphic map algebra. In *Proceedings of the 4th International Symposium on Spatial Data Handling*, volume 1, pages 413–422, 1990.

[274] M. Kokla and M. Kavouras. Fusion of top-level and geographical domain ontologies based on context formation and complementarity. *International Journal of Geographical Information Science*, 15(7) :679–687, 2001.

[275] B.K. Koo and P.E. O'Connell. An integrated modelling and multicriteria analysis approach to managing nitrate diffuse pollution : 1. Framework and methodology. *International Journal of Science of the Total Environment*, 359 :1–16, 2006.

[276] P. Korhonen and J. Laakso. A visual interactive method for solving the multiple criteria problem. *European Journal of Operation Research*, 24(2) :277–287, 1986.

[277] J.S.H. Kornbluth. Dynamic multi-criteria decision making. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 1 :81–92, 1992.

[278] R. Krzanowski and J. Raper. *Spatial evolutionary modeling*. Oxford University Press, Oxford, UK, 2001.

[279] A. Laaribi. *Systèmes d'information géographique et analyse multicritère : Intégration pour l'aide à la décision à référence spatiale*. PhD thesis, Université Laval, Québec, 1994.

[280] A. Laaribi. *SIG and analyse multicritère*. Hermès Sciences Publications, Paris, 2000.

[281] A. Laaribi, J.J. Chevallier, and J.-M. Martel. Méndhodologie d'intégration des SIG et de l'analyse multicritère. *Revue Internationale de Géomatique*, 3(4) :415–435, 1993.

[282] A. Laaribi, J.J. Chevallier, and J.-M. Martel. A spatial decision aid : A multicriterion evaluation approach. *Computers, Environment and Urban Systems*, 20(6) :351–366, 1996.

[283] R. Lahdelma, P. Salminen, and J. Hokkanen. Using multicriteria methods in environmental planning and management. *Environment Management*, 26(6) :595–605, 2000.

[284] R. W. Lake. Planners' alchemy transforming NIMBY to YIMBY. *Journal of the American Planning Association*, 59(1) :87–93, 1993.

[285] M. Landry. L'aide à la décision comme support à la construction du sens dans l'organisation. *Systèmes d'Information et Management*, 3(1) :5–39, 1998.

[286] G. Langran. *Time in geographical information systems*. Taylor & Francis, 1993.

[287] S. Lardon, T. Libourel, and J.-P. Cheylan. Concevoir la dynamique des entités spatio-temporelles. *Revue Internationale de Géomatique*, 1(9) :45–65, 1999.

[288] R. Laurini. Spatial multi-database topological continuity and indexing : A step towards seamless GIS data interoperability. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(4) :373–402, 1998.

[289] R. Laurini, L. Paolino, M. Sebillo, G. Tortora, and G. Vitiello. Phenomena—A visual query language for continuous fields. In *Proceedings of 11th ACM-GIS'03*, New Orleans, Louisiana, USA, November 7-8 2003.

[290] R. Laurini and D. Thompson. *Fundamental of spatial information systems*. Academic Press, 1992.

[291] J.P. Leclercq. Propositions d'extension de la notation de dominance en présence de relations d'ordre sur les pseudo-critères : MELCHIOR. *Revue Belge de Recherche Opérationnelle, de Statistique et d'Informatique*, 24(1) :32–46, 1984.

[292] Y.C. Lee, Z. Li, and Y.L. Li. Taxonomy of space tessellation. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 55 :139–149, 2000.

[293] Y. Leung, K.S. Leung, and J.Z. He. A generic concept-based object-oriented geographical information system. *International Journal of Geographical Information Science*, 13(5) :475–498, 2002.

[294] L. Li, J. Wang, and C.Wang. Typhoon insurance pricing with spatial decision support tools. 19(3) :363–384, 2005.

[295] S. Li. A complete classification of topological relations using the 9-intersection method. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(6) :589–610, 2006.

[296] S. Li and M. Ying. Region connection calculus : Its models and composition table. *Artificial Intelligence*, 145(1-2) :121–146, 2003.

[297] S. Li and M. Ying. Generalized region connection calculus. *Artificial Intelligence*, 160(1-2) :1–34, 2004.

[298] X. Li and A.G. Yeh. Modeling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(2) :131–152, 2000.

[299] A. Ligtenberg, A.K. Bregt, and R. van Lammeren. Multi-actor-based land use modelling : Spatial planning using agents. *Landscape and Urban Planning*, 56(1-2) :21–33, 2001.

[300] F.-T. Lin. Many sorted algebraic data models for GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(8) :765–788, 1998.

[301] R.J. Liu, K.L. Poh, and C.U.Lee. An outranking analysis of MCDM methods. In Z. Jiang, X. Qian, and Z Jiang, editors, *Proceedings of The 10th International Conference on Industrial Engineering & Engineering Management : Global Industrial Engineering in E-century*, pages 273–279, Shanghai, December 2003. China Machine Press.

[302] W.A. Lodwick, W. Monson, and L. Svoboda. Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographic information systems : Suitability analysis. *International Journal of Geographical Information Science*, 4 :413–428, 1990.

[303] K. Lombard and R.L. Church. The gateway shortest path problem : Generating alternative routes for a corridor routing problem. *Geographical Systems*, 1 :25–45, 1973.

[304] P.A. Longley and M. Batty, editors. *Advanced spatial analysis : The CASA book of GIS*. ESRI Press, Relands, California, USA, 2003.

[305] P.A. Longley, M.F. Goodchild, D.J. Maguire, and D.W. Rhind. *Geocomputation : A prime*. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 1998.

[306] P.A. Longley, M.F. Goodchild, D.J. Maguire, and D.W. Rhind. *Geographic information systems*. John Wiley & Sons, New York, 1999.

[307] P.A. Longley, M.F. Goodchild, D.J. Maguire, and D.W. Rhind. *Geographic information systems and science*. John Wiley & Sons, Chichester, 2001.

[308] A.V. Lotov, V.A. Bushenkov, A.V. Chernov, D.V. Gusev, and G.K. Kamenev. Internet, GIS, and interactive decision map. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1(1) :118–149, 1997.

[309] J. Lu, M.A. Quaddus, K.L. Poh, and R. Williams. The design of a knowledge-based guidance system in intelligent mulptiple objective decision support system (IMODSSS). In B. Hope and P. Yoong, editors, *Proceedings of The 10th Australasian Conference on Information Systems*, pages 542–553, 1999.

[310] J. Lu, M.A. Quaddus, and R. Williams. Developing a knowledge-based multi-objective decision support system. In *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2000.

[311] P. Lévine and J.-C Pomerol. PRIAM, an interactive program for choosing among multiple attribute alternatives. *European Journal of Operation Research*, 25(2) :272–280, 1986.

[312] R.K. MacCrimmon. An overview of multiple objective decision making. In J.L. Cochrane and M. Zeleny, editors, *Multiple criteria decision making*, pages 18–44. The University of South Carolina Press, 1973.

[313] J. Maczewski and C. Rinner. Exploring multicriteria decision strategies in GIS with linguistic quantifiers : A case study of residential quality evaluation. *Journal of Geographical Systems*, 7 :249–468, 2005.

[314] D. Maguire, M.F. Goodchild, and D. Rhind, editors. *Geographic information systems : Principales and applications*. Longman Scientific and Technical, Harlow, Essex, England, 1991.

[315] M.R. Mahmoud and L.A. Gracia. Comparison of different multicriteria evaluation methods for the Red Bluff diversion dam. *Environmental Modelling & Software*, 15 :471–478, 2000.

[316] A. Makhorin. GNU linear programming kit reference manual version 4.8. Technical report, Department for Applied Informatics, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia, Janvier 2005. 84 pages.

[317] J. Malczewski. A GIS-based approach to multiple criteria group decision making. *International Journal of Geographical Information Systems*, 10(8) :955–971, 1996.

[318] J. Malczewski. *GIS and mutlicriteria decision analysis*. John Wiley & Sons, New York, 1999.

[319] J. Malczewski. On the use of weighted liner combination method in raster GIS : Common and best practice approaches. *Transactions in GIS*, 4(1) :5–22, 2000.

[320] J. Malczewski. GIS-based land-use suitability analysis : A critical overview. *Progress in Planning*, 62 :3–65, 2004.

[321] J. Malczewski. A GIS-based multicriteria decision analysis : A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7) :703–726, 2006.

[322] J. Malczewski, T. Chapman, C. Flegel, D. Walters, D. Shrubsole, and M.A. Healy. Gis multicriteria evaluation with ordered weighted averaging (OWA) : Case study of developing watershed management strategies. *Environment and Planning A*, 35 :1769–1784, 2003.

[323] O. Marinoni. Implementation of the analytical hierarchy process with VBA in arcgis. *Computer & Geosciences*, 30 :637–646, 2004.

[324] O. Marinoni. A stochastic spatial decision support system based on PROMETHEE. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(1) :51–68, 2005.

[325] O. Marinoni. A discussion on the computational limitations of outranking methods for land-use suitability assessment. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(1) :69–87, 2006.

[326] J.-M Martel. Caractérisation des situations de décision et des procédures d'agrégation d'agrégation multicritères. Working paper, Faculté des Sciences de l'Administration, Université Laval, 1995.

[327] J.-M Martel. Multicriteria analysis under uncertainty : The approach of outranking synthesis. Working Paper 1998-039, Faculté des Sciences de l'Administration, Université Laval, 1998.

[328] J.-M. Martel. L'aide multicritère à la décision : Méthodes et applications. In *CORS-SCRO Annual Conference*, Windsor, Ontario, June, 7-9 1999.

[329] J.-M Martel and B. Aouni. Méthode multicritère de choix d'un emplacement : Le cas d'un aéroport dans le Nouveau Québec. *INFOR*, 30(2) :97–117, 1992.

[330] N. Martin, B. St-Onge, and J.-P. Waaub. An integrated decision aid system for the development of Saint-Charles River's alluvial plain, Québec, Canada. *International Journal of Environmental Pollution*, 12 :264–279, 2003.

[331] E.Q.V. Martins. On a special class of bicriterion path problems. *European Journal of Operation Research*, 17 :85–94, 1984.

[332] A.S. Masud and C.L. Hwang. Interactive sequential goal programming. *Journal of the Operational Research Society*, 32 :391–400, 1981.

[333] V. Mathiyalagana, S. Grunwaldb, K.R. Reddyb, and S.A. Bloomb. A WebGIS and geodatabase for Florida's wetlands. *Computers and Electronics in Agriculture*, 47 :69–75, 2005.

[334] K.B. Matthews, A.R. Sibbald, and S. Craw. Implementation of a spatial decision support system for rural land use planning : Integrating geographic information system and environmental models with search and optimisation algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 23 :9–26, 1999.

[335] L.Y. Maystre, J. Pictet, and J. Simos. *Méthodes multicritères ELECTRE. Description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 1994.

[336] I.L. McHarg. *Design with nature*. Natural History Press, New York, 1969.

[337] I.L. McHarg. *Design with nature*. John Wiley & Sons, New York, 1992.

[338] I.L. McHarg. *A quest for life : An autobiography Ian L. McHarg*. 1996.

[339] I.L. McHarg. *To heal the Earth : Selected writings of Ian L. McHarg*. 1998.

[340] D. McIlhagga. *Optimal path delineation to multiple targets incorporating fixed cost distance*. Honors thesis for bachelor of arts, Carleton University, 1997.

[341] J. Mennis. Spatial and temporal vegetation variability in Africa : An application of temporal map algebra. In *Proceedings of ASPRS Annual Conference*, Baltimore, Maryland, USA, May 7-11 2005.

[342] J. Mennis, J. Leong, and R. Khanna. Multidimensional map algebra. In *Proceedings of the 8th International Conference on GeoComputation*, Ann Arbor, MI, 2005a.

[343] J. Mennis and R. Viger. Analyzing time series of satellite imagery using temporal map algebra. In *Proceedings of ASPRS Annual Conference*, Denver, Colorado, USA, May 23-27 2004.

[344] J. Mennis, R. Viger, and C.D. Tomlin. Cubic map algebra functions for spatio-temporal analysis. *Cartography and Geographical Information Science*, 32(1) :17–32, 2005b.

[345] S. Menon, P. Gao, and C. Zhan. GRID : A data model and functional map algebra for raster geo-processing. In *Proceedings of GIS/LIS'92*, Bethesda, 1992. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

[346] B. Meyer. *Object-Oriented Software Construction*. Prentice Hall, New York, 1988.

[347] MICROSOFT CORPORATION. White papers on COM technologies, MICROSOFT CORPORATION, 1997.

[348] MICROSOFT CORPORATION. SQL server online books MICROSOFT CORPORATION, 2002.

[349] K. Miettinen and M. Mäkelä. Comparative evaluation of some interactive reference point-based methods for multi-objective optimisation. *Journal of the Operational Research Society*, 50(9) :949–959, 1999.

[350] W. Miller, W.M.G. Collins, F.R. Steiner, and E. Cook. An approach for greenway suitability analysis. *landscape and Urban Planning*, 42(2-4) :91–105, 1998.

[351] H. Mintzberg, D. Raisinghani, and A. Théorêt. The structure of "unstructured" decision process. *Administrative Science Quarterly*, 21 :246–275, 1976.

[352] N. Molines. SIG et analyse multicritère : Des outils au service de l'amélioration du processus décisionnel des projets autoroutiers. In *Colloque Géomatique et Aide à la Aécision (GEOAD)*, Paris, November 21 2002. LAMSADE, U. Paris-Dauphine.

[353] N. Molines and J.-J. Chevalier. SIG et analyse multicritère : Une association novatrice au service du processus d'évaluation des grandes infrastructures linéaires. In A. Colorni, M. Paruccini, and B. Roy, editors, *AMCDA - Aide Multicritère à la décision*, pages 195–212. Joint Research Center, EUR Report, 2001.

[354] P. Moor. *Définir l'intérêt public : Une mission impossible ?* Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 1994.

[355] F. Morari, E. Lugato, and M. Borin. An integrated non-point source model-GIS system for selecting criteria of best management practices in the Po Valley, North Italy. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 102 :247–262, 2004.

[356] D. Moreno and M. Seigel. A GIS approach for corridor siting and environmental impact analysis. In *GIS/LIS'88, Proceedings of the Third Annual International Conference, Exhibitions and Workshops*, pages 507–514, San Antonio, November 30-December 2 1988. American Congress on Surveying and Mapping, Falls Church, VA, USA.

[357] H.M. Moshkovich, R. Schellenberger, and D.L. Olson. Data influences the result more than preferences : Some lessons from implementation of multiattribute techniques in a real decision task. *Decision Support Systems*, 22 :73–84, 1998.

[358] V. Mousseau. *Problèmes liés à l'évaluation de l'importance relative des critères en aide multicritère à la décision : Réflexions théoriques, expérimentations et implémentations informatiques*. PhD thesis, Université Paris-Dauphine, 1993.

[359] V. Mousseau. *Elicitation des préférences pour l'aide multicritère à la décision*. PhD thesis, Mémoire présenté en vue de l'obtention de l'habilitation à diriger des recherches, Université Paris-Dauphine, 2003.

[360] V. Mousseau. A general framework for constructive learning preference elicitation in multiple criteria decision aid. Cahiers du LAMSADE 223, University of Paris Dauphine, France, 2005.

[361] V. Mousseau and L.C. Dias. Valued outranking relations in ELECTRE providing manageable disaggregation procedures. *European Journal of Operation Research*, 156(2) :467–482, 2004.

[362] V. Mousseau, L.C. Dias, and J. Figueira. Dealing with inconsistent judgments in multiple criteria sorting models. *4OR*, 4(3) :145–158, 2006.

[363] V. Mousseau, L.C. Dias, J. Figueira, C. Gomes, and J.N. Clímaco. Resolving inconsistencies among constraints on the parameters of an MCDA model. *European Journal of Operation Research*, 147(1) :72–93, 2003.

[364] V. Mousseau, J. Figueira, and J.P. Naux. Using assignment examples to infer weights for ELECTRE TRI method : Some experimental results. *European Journal of Operation Research*, 130(2) :263–275, 2001.

[365] V. Mousseau and R. Slowinski. Inferring an ELECTRE TRI model from assignment examples. *Journal of Global Optimization*, (12) :157–174, 1998.

[366] C. du Mouza and P. Rigaux. *Documents et évolution*, chapter Bases de données spatio-temporelles. Cépaduès, 2000. Publié dans le cadre de l'école thématique du GDR I3.

[367] C. du Mouza and P. Rigaux. Mobility patterns. *GeoInformatica*, 9(4) :297–319, 2005.

[368] G. Munda. *Multicriteria evaluation in fuzzy environment*. Springer-Verlag, Berlin, 1995.

[369] S. Murray, P. Breslin, T. Ormsby, and B. Miller. A visual framework for spatial modeling. In *Proceedings of the 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4) : Problems, Prospects and Research Needs*, Banff, Alberta, Canada, 2000.

[370] A. Ngo The and V. Mousseau. Using assignment examples to infer category limits for the ELECTRE TRI method. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 11(1) :29–43, 2002.

[371] J. Nievergelt and P. Widmayer. Spatial data structures : Concepts and design choices. In J.R. Sack and J. Urrutia, editors, *Handbook of Computational Geometry*, pages 725–764. Elsevier, 2000.

[372] P. Nijkamp, P. Rietveld, and H. Voogd. *Multicriteria evaluation in physical planning*. North-Holland, 1990.

[373] T.L. Nyerges. Coupling GIS and spatial analytic models. In *Proceedings of the 5th International Symposium on Spatial Data Handling*, volume 2, pages 534–543, Charleston, South Carolina, USA, 1992.

[374] T.L. Nyerges. *Environmental Modeling within GIS*, chapter Understanding the scope of GIS, its relationship to environmental modeling, pages 75–93. Oxford University Press, 1993.

[375] J. Oksanen and O. Jaakkola. Map algebra-based DEM interpolation using existing cartographic data. In *Proceedings of the 3rd AGILE Conference on Geographic Information Science*, page 111, Hanasaari Conference Center, Helsinki/Espoo, May 25-27, 2000.

[376] J.L. Oliveira and C. Bauzer-Medeiros. A direct manipulation user interface for querying geographic databases. In *Proceedings International Conference Applications of Databases (ADB'95)*, San Jose, USA, December 1995.

[377] J. O'Looney. *Beyond maps : GIS and decision making in local government*. ESRI Press, New York, 2nd edition, 2001.

[378] S. Openshaw. Developing appropriate spatial analysis methods for GIS. In D. Maguire, M.F. Goodchild, and D. Rhind, editors, *Geographic information systems : Principales and applications*, volume 2, pages 389–402. Longman Scientific and Technical, Harlow, Essex, England, 1991.

[379] S. Openshaw and R.J. Abrahart. *GeoComputation*. Taylor & Francis, London, 2000.

[380] S. Opricovic and G.-H. Tzeng. Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. *European Journal of Operation Research*, In press.

[381] D. O'Sullivan and D.J. Unwin. *Geographic information analysis*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA, 2003.

[382] V.M. Ozernoy. A framework for choosing the most appropriate discrete alternative multiple criteria decision-making method in decision support systems and expert systems. In Y. Sawaragi, K. Inoue, and H. Nakayama, editors, *Toward interactive and intelligent decision support systems : Proceedings of the seventh international conference on multiple criteria decision making*, volume 2 of *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, pages 56–64, Kyoto, Japan, 1987. Springer-Verlag.

[383] V.M. Ozernoy. Choosing the "best" multiple criteria decision-making method. *INFOR*, 32(2) :159–171, 1992.

[384] V.M. Ozernoy. Some fundamental problems in the selection and justification of discrete MCDM methods. In J. Climaco, editor, *Multicriteria analysis : Conference on MCDM, Coimbra, Portugal, 1-6 August 1994*, volume 2, pages 103–112, Berlin, 1997. Springer-Verlag.

[385] D.A. Padgett. Public participation and geographical information systems in siting decisions for locally unacceptable land uses. In *Proceedings of URISA'93*, pages 38–50, 1993.

[386] M.A. Peerbocus, C. Bauzer-Medeiros, G. Jomier, and A. Voisard. A system for change documentation based on a spatiotemporal database. *GeoInformatica*, 8(2) :173–204, 2004.

[387] J.-P. Peloux and P. Rigaux. A loosely coupled interface to an object-oriented geographic database. In *Proceedings International Conference on Spatial Information Theory (COSIT'95)*, 1995.

[388] Z.R. Peng. An assessment framework of the development strategies of Internet GIS. *Environment and Planning B : Design and Planning*, 26(1) :117–132, 1999.

[389] Z.R. Peng and M.H. Tsou. *Internet GIS*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2003.

[390] A.G. Pereira. Evolutionary modelling of routes. In R. Krzanowski and J. Raper, editors, *Spatial Evolutionary Modeling*, pages 180–202. Oxford University Press, New York, 2001.

[391] A.G. Pereira, G. Munda, and M. Paruccini. Generating alternatives for siting retail and service facilities using genetic algorithms and multiple criteria decision techniques. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 1 :40–47, 1994.

[392] F. Pereira, J. Figueira, V. Mousseau, and B. Roy. Multiple criteria districting problems : The public transportation network pricing system of the Paris region. *Annals of Operations Research*, 2006. to appear.

[393] F. Pereira, J. Figueira, V. Mousseau, and Bernard Roy. Multiple criteria districting problems : The public transportation network pricing system of the Paris region. *Annals of Operations Research*, A paraître.

[394] J.M.C. Pereira and L. Duckstein. A multiple criteria decision-making approach to GIS-based land suitability evaluation. *International Journal of Geographical Information Systems*, 7(5) :407–424, 1993.

[395] D.J. Peuquet. *Representations of space and time*. The Guilford Press, New York, 2002.

[396] D.J. Peuquet and D.F. Marble, editors. *Introductory readings in geographic information systems*. Taylor & Francis, 1990.

[397] M.-H. Phua and M. Minowa. A GIS-based multi-criteria decision making approach to forest conservation planning at a landscape scale : A case study in the Kinabalu Area, Sabah, Malaysia. *Landscape and Urban Planning*, 71(2-4) :207–222, 2005.

[398] F. Pires, C. Bauzer-Medeiros, and A. Baros-Silva. Modeling geographic information systems using an object oriented framework. In *Proceedings of the XIII International Conference of the Chilean Computer Science Society*, pages 217–232, La Serena, Chile, October 1993.

[399] M. Pirlot. Why trying to characterize the procedures used in multi-criteria decision aid. *Cahiers du CERO*, 36 :283–292, 1994.

[400] C. Plazanet, J.-G. Affholder, and E. Fritsch. The importance of geometric modelling in linear generalization. *Cartographic and Geographic Information Systems*, 22(4) :291–305, 1996.

[401] B. Plewe. *GIS online : Information retrieval, mapping and the Internet*. OnWord Press, Santa Fe, New Mexico, USA, 1997.

[402] K.L. Poh. Knowledge-based guidance system for multi-attribute decision making. *Artificial Intelligence in Engineering*, 12 :315–326, 1998.

[403] K.L. Poh, Quaddus, and K.L. Chin. MOLP-PC : An integrated decision support environment for multiple objective linear optimization. In M.C.T.L. Goh, editor, *OR Applications in Singapore*, pages 25–39. Operation Research Society of Singapore, 1995.

[404] J.-Ch. Pomerol and S. Barba-Romero. *Choix multicritère dans l'entreprise*. Hermès, Paris, 1993.

[405] D. Pullar. MapScript : A map algebra programming language incorporating neighborhood analysis. *GeoInformatica*, 5(2) :145–163, 2001.

[406] D. Pullar. Simulation modelling applied to runoff modelling using MapScript. *Transactions in GIS*, 7(2) :267–283, 2003.

[407] D. Pullar. SimuMap : A computational system for spatial modelling. *Environmental Modelling & Software*, 19 :235–243, 2004.

[408] D.V. Pullar and M.J. Egenhofer. Towards formal definitions of topological relationships among spatial objects. In *3rd Inter. Symp. on SDH*, pages 225–241, Sydney, Australia, 1988.

[409] C. Pusceddu and S. Chakhar. Un processus pour la prise de décision spatiale. In *ROADEF'05, Tours, France*, Febrary 14-16 2005.

[410] M.A. Quaddus. Computer aided learning of multiple criteria decision making : An integrated system and its effectiveness. *Computers and Education*, 28(2) :103–111, 1997.

[411] J. Quinlan. Induction of decision trees. *Machine Learning*, 1, 1986.

[412] K.S. Raju and C.R.S. Pillai. Multicriterion decision making in performance evaluation of an irrigation system. *European Journal of Operation Research*, 112(3) :479–488, 1999a.

[413] K.S. Raju and C.R.S. Pillali. Multicriterion decision making in river basin planning and development. *European Journal of Operation Research*, 112(2) :249–257, 1999b.

[414] P. Ramsey. The state of open source GIS. Technical report, Refractions Research Inc., Victoria, Australia, 2006. 42 pages.

[415] D. Randell, Z. Cui, and A. Cohn. A spatial logic based on regions and connection. In B. Nebel, W. Swartout, and C. Rich, editors, *Proceedings of the 3rd International Conference on Knowledge Representation and Reasoning*, pages 165–176, Los Altos, 1992. Morgan Kaufmann.

[416] L. Riedl, H. Vacik, and R. Kalasek. MapModels : A new approach for spatial decision support in silvicultural decision making. *Computers and Electronics in Agriculture*, 27 :407–412, 2000.

[417] P. Rigaux. La représentation multiple dans les systèmes d'information géographiques. *Revue de Géomatique*, 4(2), 2001.

[418] P. Rigaux and M. Scholl. Multiple representation modelling and querying. In *Proceedings International Workshop on GIS (IGIS'94)*, 1994.

[419] P. Rigaux, M. Scholl, and A. Voisard. *Spatial databases with application to GIS*. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, USA, 2002.

[420] J.P. Rigol, C.H. Jarvis, and N. Stuart. Artificial neural networks as a tool for spatial interpolation. *International Journal of Geographical Information Science*, 15(4) :323–343, 2001.

[421] C. Rinner. Web-based spatial decision support : Status and research directions. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 7 :14–31, 2003.

[422] C. Rinner and J. Maczewski. Web-enabled spatial decision analysis using ordered weighted averaging (OWA). *Journal of Geographical Systems*, 4 :385–403, 2002.

[423] G.X. Ritter, J. Wilson, and J. Davidson. Image algebra : An overview. *Computers Vision, Graphics, and Image Processing*, 49 :297–331, 1990.

[424] M. Rogers and M. Bruen. A new system for weighing environmental criteria for use within ELECTRE III. *European Journal of Operation Research*, 107 :552–563, 1998.

[425] M. Roubens. Preference relations on actions and criteria in multiple criteria decision making. *European Journal of Operation Research*, 10 :51–55, 2000.

[426] B. Rousval. *Aide multicritère à l'évaluation de l'impact des transports sur l'environnement*. PhD thesis, Université Paris Dauphine, Paris, 2005.

[427] B. Roy. Classement et choix en présence de points de vue multiples : La méthode ELECTRE. *Revue Française d'Informatique et de recherche Opérationnelle*, 2(8) :57–75, 1968.

[428] B. Roy. From optimization to multicriteria decision aid : Three main operational attitudes. In H. Thiriez et S. Zionts, editor, *Multiple criteria decision making*, pages 1–32. Springer-Verlag, 1976.

[429] B. Roy. ELECTRE III : Algorithme de classement basé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples. *Cahier du CERO*, 20(1) :3–24, 1978.

[430] B. Roy. *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Economica, Paris, 1985.

[431] B. Roy. Des critères multiples en recherche opérationnelle : Pourquoi ? In Rand, editor, *Operational Research '87*, pages 829–842. North-Holland, Amsterdam, 1988.

[432] B. Roy. Main sources of inaccurate determination, uncertainty and imprecision. *Mathematical and Computer Modelling*, 12(10/11) :1245–1254, 1989.

[433] B. Roy. Decision-aid and decision-making. In C. Bana e Costa, editor, *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*, pages 17–35. Springer-Verlag, Berlin, 1990a.

[434] B. Roy. The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. In C. Bana e Costa, editor, *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*, pages 155–183. Springer-Verlag, Berlin, 1990b.

[435] B. Roy. The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. *Theory and Decision*, 31 :49–73, 1991.

[436] B. Roy. Science de la décision ou science de l'aide à la décision. *Revue Internationale de Systémique*, 6(5) :497–529, 1992.

[437] B. Roy. Decision science or decision-aid science. *European Journal of Operation Research*, 66(2) :184–203, 1993.

[438] B. Roy. A missing link in OR-DA : Robustness analysis. *Foundations of Computing and Decision Sciences*, 23 :141–160, 1998.

[439] B. Roy and P. Bertier. La méthode ELECTRE II - Une application au média-planning. In Ross M., editor, *OR'72*, pages 291–302. North-Holland Publishing Company, 1973.

[440] B. Roy and D. Bouyssou. Famille de critères : Problème de cohérence et de dépendance. Document du LAMSADE 37, Université de Paris Dauphine, France, 1987.

[441] B. Roy and D. Bouyssou. *Aide Multicritère à la Décision : Méthodes et Cas*. Economica, Paris, 1993.

[442] B. Roy and J. Hugonnard. Ranking of suburban line extension projects for the Paris metro system by a multicriteria method. *Transportation Research*, 16A :301–312, 1982.

[443] B. Roy and J.M. Skalka. ELECTRE IS—Aspects méthodologiques et guide d'utilisation. Document du LAMSADE 30, Université Paris Dauphine, Paris, 1984.

[444] B. Roy and D. Vanderpooten. The European school of MCDM : Emergence, basic features and current works. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 5(1) :22–38, 1996.

[445] I. Saad, C. Rosenthal-Sabroux, and S. Chakhar. K-DSS : A decision support system for identifying and evaluating crucial knowledge. In *The 11th International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty (IPMU 2006)*, volume I, pages 331–338, Paris, France, July 2-7 2006.

[446] D. Saarloos, T. Arentze, A. Borgers, and H. Timmermans. A multiagent model for alternative plan generation. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 32(4) :505–522, 2005.

[447] T.L. Saaty. *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill, New York, 1980.

[448] A. Saltelli, S. Tarantola, and K. Chan. A role for sensitivity analysis in presenting the results from MCDA studies to decision-makers. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 8 :139–145, 1999.

[449] L. Sanders. Modèles en analyse spatiale : Introduction. In L. Sanders, editor, *Modèles en analyse spatiale*, pages 17–29. Hermès Sciences Publications, Paris, 2001.

[450] M. Schneider and T. Behr. Topological relationships between complex lines and complex regions. In L.M.L. Delcambre, C. Kop, H.C. Mayr, J. Mylopoulos, and O. Pastor, editors, *Proceedings of the 24th International Conference on Conceptual Modeling (ER 2005)*, volume 3716, pages 483–496, Berlin, 2005. Springer-Verlag.

[451] M. Scholl and A. Voisard. Object-oriented database systems for geographic applications : An experiment with O_2. In F. Bancilhon, C. Delobel, and P.C. Kanellakis, editors, *Building an object-oriented database system : The story of O_2*. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, USA, 1992.

[452] M. Scholl, A. Voisard, J.P. Peloux, L. Raynal, and P. Rigaux. *SGBD géographiques : Spécificités*. International Thompson Publishing, Paris, 1996.

[453] A. Schärlig. *Décider sur plusieurs critères : Panorama de l'aide à la décision multicritère*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 1985.

[454] R.R. Sengupta and D.A. Bennett. Agent-based modeling environment for spatial decision support. 17(2) :157–180, 2003.

[455] J.P. Serra. *Image analysis and mathematical morphology*. Academic Press, London, 1982.

[456] M. Shapiro and J. Westervelt. r.mapcalc : An algebra for GIS and image processing. Technical report, U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, Illinois, USA, 1992.

[457] M.A. Sharifi, W. van den Toorn, A. Rico, and M. Emmanuel. Application of GIS and multicriteria evaluation in locating sustainable boundary between the Tunari National Park and Cochabamba city (Bolovia). *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 11(3) :151–164, 2002.

[458] F. J. Sijtsma. *Project evaluation, sustainability and accountability : Combining cost-benefit analysis (CBA) and multi-criteria analysis (MCA)*. PhD thesis, University of Groningen, 2006.

[459] H.A. Simon. *Models of man*. John Wiley & Sons, New York, 1957.

[460] H.A. Simon. *The new science of management decisions*. Harper & Row, New York and Evanston, 1960.

[461] J. Simos. *Evaluer l'impact sur l'environnement : Une approche originale par l'analyse multicritère et la négociation*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 1990.

[462] A.J.V. Skriver and K.A. Andersen. A label correcting approach for solving bicriterion shortest path problems. *Computer & Operations Research*, 27(6) :507–524, 2000.

[463] R. Slowinski and J. Stefanowski. New approaches in classification and data analysis. In E. Diday, Y. Lechevallier, M. Schader, P. Bertrand, and B. Burtschy, editors, *Rough classification with valued closeness relation*. Springer-Verlag, Berlin, 1994.

[464] R. Slowinski and J. Teghem, editors. *Stochastic versus fuzzy approaches to multiobjective mathematical programming under uncertainty*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1990.

[465] R. Slowinski and J.Jr. Teghem. Fuzzy versus stochastic approches to multicriteria linear programming under uncertainty. *Naval Research Logistics*, 35(6) :673–695, 1988.

[466] Z. Pawlak R. Slowinski. Rough set approach to multi-attribute decision analysis. *European Journal of Operation Research*, 72(3) :443–459, 1994.

[467] S. Spaccapietra, C. Parent, and Y. Dupont. Model independent assertions for integration of heterogenous schemas. *The International Journal of Very Large Data Base*, 1(1) :81–126, 1992.

[468] S. Spaccapietra, C. Parent, and C. Vangenot. GIS databases : From multiscale to multirepresentation. In *Proceedings International Symposium on Abstraction, Reformulation and Approximation (SARA 2000)*, volume 1864 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 57–70, 2000.

[469] P.E. Spector. Summed rating scale construction : An introduction. Sage University Paper Series on Quantitative Applications in the Social Sciences 07-82, Sage, Thousand Oaks, CA, 1992.

[470] J. Spronk. *Interactive multiple goal programming : Applications ro financial planning*. International Series in MS/OR. Martinus Nijhoff Publishing, Boston, 1981.

[471] S. Srinivasan, V. George, and B. Aten. A computer-based tool for defining regions of similar characteristics. *Computers, Environment and Urban Systems*, 20(2) :111–137, 1996.

[472] J. Star and J. Estes. *Geographic information systems : An introduction*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1990.

[473] E. Stefanakis. A unified framework for fuzzy spatio-temporal representation and reasoning. In *Proceedings of the 20th International Cartographic Conference*, Beijing, China, August 6-10, 2001.

[474] E. Stefanakis, M. Vazirgiannis, and T. Sellis. Incorporating fuzzy logic methodologies into DBMS for the application domains of GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 13(7) :657–675, 1999.

[475] F. Steiner. *The living landscape : An ecological approach to landscape planning*. McGraw-Hill, New York, 1991.

[476] C. Steinitz, P. Parker, and L. Jordan. Hand drawn overlays : Their history and prospective uses. *Landscape Architecture*, 66(5) :444–455, 1976.

[477] R.E. Steuer. An interactive multiple objective linear programming procedure. *TIMS Studies in the Management Sciences*, 6 :225–239, 1977.

[478] R.E. Steuer and E.U. Choo. An interactive weighted Techebycheff procedure for multiple objective programming. *Mathematical Programming*, 26 :326–344, 1972.

[479] R.E. Steuer, L.R. Gardiner, and J. Gray. A bibliographical survey of the activities and international nature of multiple criteria decision making. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 5(3) :195–217, 1996.

[480] C. Stocks and S. Wise. The role of GIS in environmental modeling. *Geographical and Environmental Modeling*, 4(2) :219–235, 2000.

[481] R. Store and J. Kangas. Integrating spatial multi-criteria evaluation and expert knowledge for GIS-based habitat suitability modelling. *Landscape and Urban Planning*, 55(2) :79–93, 2001.

[482] M.P. Strager and S. R.S. Rosenberger. Incorporating stakeholder preferences for land conservation : Weights and measures in spatial MCA. *Ecological Economics*, 57(4) :627–639, 2006.

[483] B. Su, Z. Z. Li, G. Lodwick, and J.C. Müller. Algebraic models for the aggregation of area features based upon morphological operators. *International Journal of Geographical Information Science*, 11(3) :233–246, 1997.

[484] D.Z. Sui. Integrating neural networks with GIS for spatial decision making. *Operational Geographer*, 11(2) :13–20, 1993.

[485] M. Takeyama. *Geo-Algebra : A mathematical approach to integrating spatial modeling and GIS*. PhD thesis, Department of Geography, University of California at Santa Barbara, 1996.

[486] M. Takeyama and H. Couclelis. Map dynamics : Integrating cellular automata and GIS through geo-algebra. *International Journal of Geographical Information Science*, 11(1) :73–91, 1997.

[487] P. Tarp and F. Helles. Multi-criteria decision-making in forest management planning—an overview. *Journal of Forest Economics*, 1(3) :273–306, 1995.

[488] A. Tecle. *A decision methodology for the resource utilization of rangeland watersheds*. PhD thesis, School of Renewable Natural Resources, University of Arizona, 1988.

[489] A. Tecle. Selecting a multicriterion decision making technique for watershed resources management. *Water Ressources Bulletin*, 28(1) :129–140, 1992.

[490] A. Tecle and L. Duckstein. A procedure for selecting MCDM techniques for forest resources management. In A. Goicoechea, editor, *Multiple Criteria Decision Making*. Springer-Verlag, 1992.

[491] A. Tecle, B.P. Shrestha, and L. Duckstein. Multiobjective decision support system for multiresource forest management. *Group Decision and Negotiation*, 7 :23–40, 1998.

[492] J.Jr. Teghem, C. Delhaye, and P.L. Kunsch. An interactive decision support system IDSS for multicriteria decision-aid. *Mathematical and Computer Modelling*, 12(10/11) :1311–1320, 1989.

[493] A. Telmoudi and S. Chakhar. Data fusion application from evidential databases as a support for decision making. *Information and Software Technology*, 46(8) :547–555, 2004a.

[494] A. Telmoudi and S. Chakhar. Some notes on an extended query language for FSM. In *The IEEE 1st International Workshop Signaux, Circuits et Systèmes (SCS'04)*, pages 417–420, Monastir, Tunisia, March 18-21 2004b.

[495] A.T. Teng. Toward a topologically integrated geographic information system for cartographic modelling. In Urban and Regional Information Systems Association, editors, *Proceedings of the URISA 86 : Geoprocessing and Geographic Information Systems*, volume II, pages 62–74, Washington, 1986.

[496] Thill. *Multicriteria decision making and analysis : A geographic information science approaches*. Ashgate, New York, 1999.

[497] R.J. Tkach and S.P. Simonovic. A new approach to multi-criteria decision making in water resources. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1(1) :25–43, 1997.

[498] C.D. Tomlin. A map algebra. In *Proceedings of the 1983 Harvard Computer Graphics Conference*, volume 2, pages 127–150, Cambridge , Massachusetts, 1983.

[499] C.D. Tomlin. *Geographic information systems and cartographic modeling*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1990.

[500] C.D. Tomlin. Cartographic modelling. In D.J. Maguire, M.F. Goodchild, and D.W. Rhind, editors, *Geographical information systems : Principles and Applications*, pages 361–374, Harlow, Essex, UK, 1991.

[501] C.D Tomlin. Map algebra : One perspective. *Landscape and Urban Planning*, 30(1-2) :3–12, 1994.

[502] C.D. Tomlin. Map algebra : The bird's eye view from a worm's eye perspective. In *Proceedings of Nearc Conference*, 2002.

[503] C.D. Tomlin and J.K. Berry. A mathematical structure for cartographic modeling in environmental analysis. In *Proceedings of the 39th Symposium of the American Conference on Surveying and Mapping*, pages 269–283, Falls Church, Virginna, 1979. ACSM.

[504] R.F. Tomlinson. *Geographical information systems*, chapter How it all began and the importance of bright people, pages 17–18. John Wiley & Sons, New York, 1999.

[505] A. Tsoukiàs. From decision theory to decision aiding methodology. DIMACS Technical report 2003-21, Rutgers University, 2003.

[506] A. Tversky. Elimination by aspects : A theory of choice. *Psychological Review*, 79 :281–299, 1972.

[507] M.J. Ungerer and M.F. Goodchild. Integrating spatial data analysis and GIS : A new implementation using the Component Object Model (COM). 16(1) :41–53, 2002.

[508] D. Vanderpooten. L'approche interactive dans l'aide à la décision multicritère. Document du Lamsade 38, Université de Paris Dauphine, France, 1987. 41 pages.

[509] D. Vanderpooten. Multiobjective programming : Basic concepts and approches. In R. Slowinski and J. Teghem, editors, *Stochastic versus fuzzy approches to multiobjective mathematical programming under uncertainty*, pages 7–22, Dorchecht, 1990a. Kluwer Academic Publishers.

[510] D. Vanderpooten. The construction of prescription in outranking methods. In C. Bana e Costa, editor, *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*, pages 184–215. Springer-Verlag, Berlin, 1990b.

[511] D. Vanderpooten. Three basic conceptions underlaying multiple criteria interactive procedures. In A. Goicoechea, L. Duckstein, and S. Zionts, editors, *Proceedings of the Ninth International Conference : Theory and Applications in Business, Industry, and Government*, pages 441–448, NY, 1993. Springer-Verlag.

[512] D. Vanderpooten and Ph. Vincke. Description and analysis of some representative interactive multicriteria procedures. *Mathematical and Computer Modelling*, 12 :1221–1238, 1989.

[513] J.-C. Vansnick. Principes et applications des méthodes multicritères. Technical report, Université de Mons-Hainaut, 1988.

[514] J.-C. Vansnick. Measurement theory and and decision aid. In C. Bana e Costa, editor, *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*, pages 81–100. Springer-Verlag, Berlin, 1990.

[515] J.C Vansnick. On the problem of weights in multiple criteria decision making : The noncompensatory approach. *European Journal of Operation Research*, 24 :288–294, 1986.

[516] K.R. Varadarajan and P.K. Agarwal. Approximating shortest paths on a nonconvex polyhedron. In *IEEE proceedings*, pages 182–191, 1997.

[517] F. Villa, M. Ceroni, and A. Mazza. A gis-based method for multi-objective evaluation of park vegetation. *Landscape and Urban Planning*, 35 :203–212, 1996.

[518] Ph. Vincke. *L'aide multicritère à la décision*. Éditions de l'Université de Bruxelles, Bruxelles, 1989.

[519] Ph. Vincke. *Multicriteria decision-aid*. John Wiley & Sons, Chichester, 1992.

[520] Ph. Vincke. Comment choisir une méthode d'aide à la décision ? *Cahiers du CERO*, 36 :339–343, 1994.

[521] Ph. Vincke. A short note on a methodology for choosing a decision-aid method. Rapport Technique 94/07, Université Libre de Bruxelles, Faculté des Sciences Appliquées, May 1994. 8 pages.

[522] Ph. Vincke. Robust and neutral methods for aggregating preferences into an outranking relation. *European Journal of Operation Research*, 112(2) :405–412, 1999a.

[523] Ph. Vincke. Robust solutions and methods in decision-aid. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 8 :181–187, 1999b.

[524] H.V. Vo, B. Chae, and D.L. Olson. Dynamic MCDM : The case of urban infrastructure decision making. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 1(2) :269–292, 2002.

[525] D. von Winterfeldt and W. Edwards. *Decision analysis and behavioral research*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1986.

[526] H. Voogd. *Multicriteria evaluation for urban and regional planning*. Pion, London, 1983.

[527] H. Voogd. *Environmental and infrastructure planning*, chapter Formal evaluation in environmental and infrastructure planning, pages 203–230. Geo Press, Groningen, 2004.

[528] F. Wang. The use of artificial neural networks in geographical information system for agricultural land-suitability assessment. *Environment and Planning A*, 26 :265–284, 1994.

[529] F. Wang, G.B. Hall, and Subaryono. Fuzzy information representation and processing in conventional GIS software : Database design and application. *International Journal of Geographical Information Systems*, 4 :261–283, 1990.

[530] X. Wang and D. Pullar. Describing dynamic modeling for landscapes with vector map algebra in GIS. *Computers & Geosciences*, 31(8) :956–967, 2005.

[531] N.M. Waters. *Geographic information systems and environmental modeling*, chapter Modeling the environment with GIS : A historical perspective from geography, pages 1–35. Prentice Hall, New Jersey, 2002.

[532] S. Wise, R. Haining, and J. Ma. Providing spatial statistical data analysis functionality for the GIS. 15(3) :239–254, 2001.

[533] D. Wood. *The power of maps*. The Guilford Press, New York, 1992.

[534] M.F. Worboys. *GIS : A computing perspective*. Taylor & Francis, 1995.

[535] F. Wu. Simland : A prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules. *International Journal of Geographical Information Science*, 12 :63–82, 1998.

[536] Q. Wu, S. Ye, X. Wu, and P. Chen. Risk assessment of earth fractures by constructing an intrinsic vulnerability map, a specific vulnerability map, and a hazard map, using Yuci City, Shanxi, China as an example. *Environmental Geology*, 46 :104–112, 2004.

[537] Xiao. Using evolutionary algorithms to generate alternatives for multiobjective site-search problems. *Environment and Planning A*, 34(4) :639–656, 2002.

[538] J. Xu and R.G. Lathrop. Improving simulation accuracy of spread phenomena in a raster-based geographic information system. *International Journal of Geographical Information Science*, pages 153–168, 9.

[539] R.R. Yager. On ordered weighted averaging aggregation operators in multi-criteria decision making. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 18(1) :183–190, 1988.

[540] T.A. Yanar and Z. Akyürek. The enhancement of cell-based GIS analyses with fuzzy processing capabilities. *Information Sciences*, 176(8) :1067–1085, 2006.

[541] C.P. Yialouris, V. Kollias, N.A. Lorentzos, D. Kalivas, and A.B. Sideridis. An integrated expert geographical information system for soil suitability and soil evaluation. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1(2) :89–99, 1997.

[542] D. Yong. Plant location selection based on fuzzy TOPSIS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(7-8) :839–844, 2006.

[543] K.L. Yoon and C.-L. Hwang. *Multiple attribute decision making : An introduction*. Number 104 in Quantitative Applications in the Social Sciences. SAGE Publications, Thousand Oaks, California, 1995.

[544] R.A. Young, C.A. Onstad, D.D. Bosch, and W.P. Anderson. AGNPS, agricultural non-point source pollution model—A watershed analysis tool. Conservation Research Report 35, United States Department of Agriculture, 1987. 80p.

[545] C. Yu, J. Lee, and M.J. Munro-Stasiuk. Extensions to least-cost path algorithms for roadway planning. 17(4) :361–376, 2003.

[546] W. Yu. ELECTRE TRI : Aspects méthodologiques et guide d'utilisation. Document du LAMSADE 74, Université Paris-Dauphine, Paris, France, 1992.

[547] S.H. Zanakis, A. Solomon, N. Wishart, and S. Dublish. Multi-attribute decision making : A simulation comparison of selected methods. *European Journal of Operation Research*, 107 :507–529, 1998.

[548] M. Zeleny. Compromise programming. In J.L. Cochrane and M. Zeleny, editors, *Multiple Criteria Decision Making Proceedings*, pages 262–301. University of South Carolina Press, Columbia, SC, 1973.

[549] C. Zhang and D. McGrath. Geostatistical and GIS analyses on soil organic carbon concentrations in grassland of southeastern Ireland from two different points. *Geoderma*, 119 :261–275, 2004.

[550] J. Zhou and D.L. Civco. using genetic learning neural networks for spatial decision making in GIS. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 11 :1287–1295, 1996.

[551] X. Zhu and A.P. Dale. JavaAHP : a Web-based decision analysis tool for natural resource and environmental management. *Environmental Modelling and Software*, 16(3) :251–262, 2001.

[552] H.J. Zimmermann. Decision making in ill-structure environments and with multiple criteria. In C.A. Bana e Costa, editor, *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*, pages 119–151. Springer-Verlag, Berlin-, 1990.

[553] S. Zionts and J. Wallenius. An interactive multiple objective linear programming method for a class of underlying nonlinear utility functions. *Management Science*, 29(5) :519–529, 1983.

[554] H.G. Zoller and H. Beguin. *Aide à la décision : L'évaluation des projets d'aménagement*. Economica, Paris, 1992.

[555] C. Zopounidis and M. Doumpos. Building additive utilities for multi-group hierarchical discrimination : The MHDIS method. *Optimization Methods & Software*, 14(3) :219–240, 2000.

Glossaire

Nota : Les numéros renvoient à la page où l'acronyme a été cité pour la première fois dans le document.

- **AHP** : Analytic Hierarchy Process, p. 30
- **AIM** : Aspiration level Interactive Method, P. 46
- **AM/FM** : Automated Mapping and Facilities Management, p. 21
- **AMC** : Analyse MultiCritère, p. 10
- **AML** : Arc Macro Language, p. 42

- **CAD** : Computer-Aided Design, p. 20
- **CAM** : Computer-Aided Mapping, p. 20
- **CAO** : Conception/Cartographie Assistée par Ordinateur, p. 20
- **CAVE** : Citizens Against Virtually Everything, p. 18
- **CCC** : Carte Critère Composite, p. 164
- **CDC** : Carte Décisionnelle Composite, p. 164
- **CDP** : Carte Décisionnelle Partielle, p. 164
- **CIC** : Carte Intermédiaire Composite, p. 164
- **CLIPS** : C Language Integrated Production System, p. 89

- **DMA** : Decision Map Algebra, p. 167

- **ELECTRE** : ÉLimination Et Choix Traduisant la REalité, p. 35
- **EMC** : Évaluation Multi-Critère (fonction d'), p. 54
- **EVAMIX** : EVAluation of MIXed Criteria, p. 56
- **ESRI** : Environmental Systems Research Institute, p. 19

- **FEM** : File Exchange Module, p. 46

- **GLPK** : GNU Linear Programming Kit, p. 58
- **GRASS** : Geographic Resources Analysis Support System, p. 19
- **GPS** : Global Positioning System, p. 21

- **IGP** : Interactive Goal Programming, p. 57

- **IRIS** : Interactive Robustness analysis and parameters' Inference for multicriteria Sorting problems, p. 50
- **JESS** : Java Expert System Shell, p. 122
- **LULUs** : Locally Unwanted Land Uses, p. 18
- **MADM** : Multi-Attribute Decision Making, p. 46
- **MACBTH** : Measuring Attractiveness by a Categorial Based Evaluation TecHnique, p. 97
- **MAUT** : Multi-Attribute Utility Theory, p. 56
- **MCDM** : Multiple-Criteria Decision-Making, p. 68
- **MELCHIOR** : Méthode d'ÉLimination et de CHoix Incluant les relations d'ORdre, p. 56
- **MHDIS** : Multi-group Hierarchical DIScrimination, p. 142
- **MOLP** : Interactive Multiple Objective Linear Programming, p. 57
- **MODM** : Multi-Objective Decision Making, p. 54
- **MNT** : Modèles Numériques de Terrain, p. 28
- **NIMBY** : Not In My Back Yard, p. 18
- **NOPE** : Not On Planted Earth, p. 18
- **ORESTE** : Organisation, Rangement et SynThèse de données relationnelles, p. 56
- **PAMC** : Procédure d'Agrégation MultiCritère, p. 13
- **PMOM** : Programmation Mathématique à Objectifs Multiple, p. 54
- **POS** : Plans d'Occupation du Sol, p. 19
- **PRIAM** : PRogramme utilisant l'Intelligence Artificielle en Multicritère, p. 57
- **PROMETHEE** : Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation, p. 49
- **REGIME** : REGIonal Multicriteria Evaluation, p. 56
- **RS** : Remote Sensing, p. 21
- **SGBD** : Système de Gestion des Bases de Données, p. 21
- **SGC** : Spatial Group Choice, p. 47
- **SIAD** : Système Informatisé d'Aide à la Décision, p. 46
- **SIRS** : Systèmes d'Information à Référence Spatiale, p. 21
- **SIG** : Système d'Information Géographique, p. 10
- **SMART** : Simple Multi-Attribute Rating Technique, p. 56
- **STEM** : STEp Method, p. 57
- **TAD** : Type Abstraits de Données, p. 23
- **TIN** : Triangulated Irregular Network, p. 25
- **TOPSIS** : Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, p. 46
- **UML** : Unified Modeling Language, p. 174
- **UTA** : UTilités Additives, p. 50

- **UTADIS** : UTilités Additives DIScriminantes, p. 142
- **VIG** : Visual Interactive approach to Goal programming, p. 48
- **VIM** : Visual Interactive Method, p. 57

Annexe A

Construction de la prescription dans le cadre de l'approche de surclassement de synthèse

Deux types de modélisation sont possibles pour la construction de la prescription dans le cadre de l'approche de surclassement de synthèse (Roy, 1990b ; Vanderpooteen, 1990b) :

- *Type I*. Construction de r ($r \geq 1$) relations de surclassement imbriquées :

$$S_1 \subset S_2 \subset S_3 \cdots \subset S_r$$

  qui mènent à des niveaux d'exigence de plus en plus petits (et des relations de plus en plus riches) concernant l'assertion "a *est aussi moins bonne que* b" .
- *Type II*. Construction d'une relation de surclassement floue à travers un degré de crédibilité σ, mesurant pour chaque couple (a, b) le niveau de crédibilité $\sigma(a, b)$ ($0 \leq \sigma(a, b) \leq 1$)) de l'assertion "$a$ *est aussi moins bonne que* b".

La construction de la prescription dans le cadre de la problématique $P.\beta$ a été présentée dans le deuxième chapitre (cf. §2.4.15). Cette annexe est consacrée à la présentation de quelques solutions pour la construction de la prescription dans le cadre des problématiques $P.\alpha$ et $P.\gamma$. Notons d'abord que la présente annexe est extraite de Vanderpooten (1990b). Une description de toutes les solutions présentées ici peut être trouvée dans cette référence.

A.1 Construction de la prescription dans le cadre de $P.\alpha$

Dans ce cas, la procédure d'exploitation doit produire un sous ensemble A^0 qui vérifie les deux conditions suivantes :

- A^0 doit contenir les actions les plus satisfaisantes (r.1)
- $\mid A^0 \mid$ est le plus petit que possible (r.2)

Pour que le résultat soit plus consistent avec l'esprit des méthodes de surclassement de synthèse, il est plus prudent de reformuler la condition r.1 comme suit :

$$\forall b \in A \setminus A^0, \exists a \in A^0 \quad \text{tel que} \quad aSb \qquad \text{(r'.1)}$$

Tout sous ensemble A^0 satisfaisant $r'.1$ domine (ou surclasse) l'ensemble A. Dans ce cas, l'ensemble A^0 est nommé sous ensemble dominant en théorie des graphes. La relation r'.1 est aussi nommée la stabilité externe (*external stability*).

A.1.1 Représentation d'une relation de surclassement par un graphe

Chaque relation de surclassement peut être représentée par un graphe $G = (A, V)$ où A est l'ensemble des actions et $(a_i, a_j) \in V$ si et seulement si $a_i S a_j$. Les conventions graphiques généralement adoptées pour représenter les relations binaires de préférence, d'indifférence et d'incomparabilité sont représentées dans la Figure A.1.

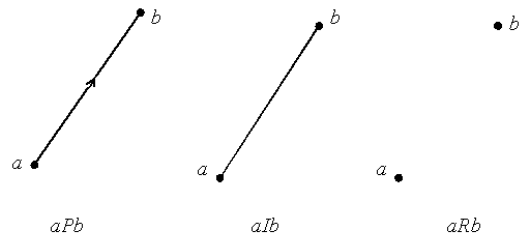


FIG. A.1 – Représentation graphique des relations binaires de préférence, d'indifférence et d'incomparabilité

Dans le cas d'une séquence de r relations de surclassement exactes, chaque relation S_i est associée à un graphe $G_i = (A, V_i)$ $(i = 1, \cdots, r)$ où $(a_i, a_j) \in V_i$ si et seulement si $a_i S_i a_j$. Le graphe $G_i(A, V_i)$ est souvent noté par $G_i(A, S_i)$. la Figure A.2 donne un exemple où : $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$; et $a_1 S_i a_2$, $a_2 S_i a_3$ et $a_3 S_i a_2$ (les surclassement du type $a_i S_i a_i$ sont omises).

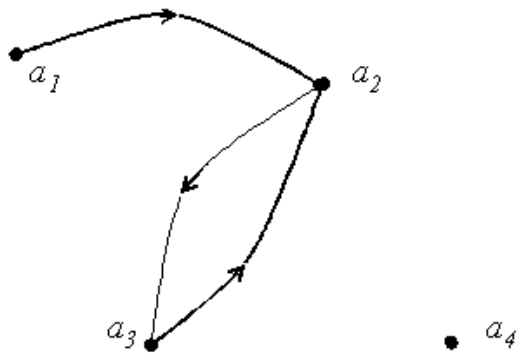


FIG. A.2 – Représentation graphique d'une relation de surclassement exacte (Vanderpooten, 1990, p.188)

Dans le cas d'une relation de surclassement floue σ, un graphe complet et symétrique G_σ est définit sur A : $G_\sigma = (A, A \times A)$. Chaque arc (a_i, a_j) dans G_σ est évalué par $\sigma(a_i, a_j)$. la Figure A.3 donne un

exemple où : $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$. Les valeurs de $\sigma(a_i, a_j) \forall (i, j) \in A \times A$ sont portées directement sur le graphe. Les arcs reflexifs, dont la valuation vaut 1, sont omis.

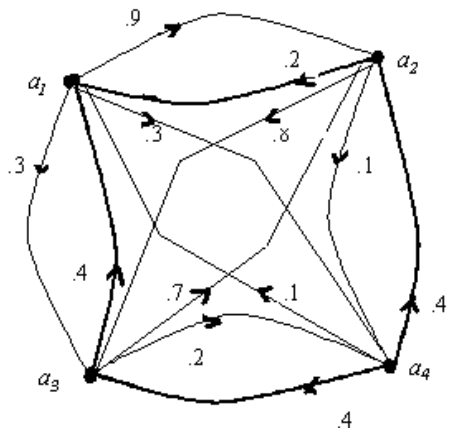


FIG. A.3 – Représentation graphique d'une relation de surclassement floue (Vanderpooten, 1990, p.188)

A.1.2 Exploitation d'une seule relation de surclassement exacte : cas transitif

Dans ce cas, A peut être partitionné de manière unique en classes d'equivalence C_i qui regroupent des actions mutuellement équivalentes. Chaque classe d'équivalence correspond à un sous-graphe complet et symétrique, nommé *clique d'indifference*. En remplaçant chaque clique par un sommet et reliant les sommets obtenus suivant les arcs originaux de V, on obtient un graphe réduit $H = (\mathrm{C}, V)$ où C est l'ensemble de classes d'équivalence et $(\mathrm{C}_i, \mathrm{C}_j) \in V$ si et seulement si $(a_i, a_j) \in U$ pour une certaine action $a_i \in \mathrm{C}_i$ et $a_j \in \mathrm{C}_j$. Étant donné la transitivité de S, H est une représentation exacte du modèle de préférence. La prescription consiste à prendre les actions contenues dans les classes d'equivalence dont les sommets associés dans H n'ont pas des prédécesseurs. Pour satisfaire $r.2$ de manière plus stricte on peut prendre une seule action de chaque classe d'équivalence sans prédécesseur.

A.1.3 Exploitation d'une seule relation de surclassement exacte : cas général

Dans ce cas, on cherche à identifier un sous-ensemble N d'actions tel que :

$$\begin{cases} \forall b \in A \setminus N, \exists a \in A : aSb \\ \forall a, b \in N \neg(aSb) \end{cases}$$

Il s'agit de trouver un sous-ensemble N d'actions tel que toute action qui n'est pas dans N est surclassée par au moins une action de N et les actions de N sont incomparables entre elles. En théorie de graphe, un tel ensemble porte le nom du *noyau du graphe*. Il existe plusieurs algorithmes pour déterminer le noyau d'un graphe. Lorsque le graphe est sans circuit, le noyau existe et est unique. Une technique possible consiste donc à réduire les circuits du graphe initial, i.e., remplacer chaque circuit par un élément unique, ce qui revient à considérer comme équivalentes les actions appartenant au même circuit. Mais cette opération peut éliminer une bonne partie de l'information contenue dans la relation de surclassement.

Dans le cas ou S est transitive, les actions appartenant à un même circuit constituent une clique d'indifférence et on revient donc au premier cas. Dans le cas général, l'idée de base consiste à juger si les actions appartenant au même circuit sont équivalentes ou non. Cela peut être basé sur des indices mesurant la densité du sous-graphe et la crédibilité des arcs manquants.

A.1.4 Exploitation de plusieurs relations exactes et imbriquées ou d'une seule relation floue

Si le modèle de préférence consiste en r $(r > 1)$ relations $S_1 \subset S_2 \subset \cdots \subset S_r$, la procédure d'exploitation consiste d'abord à exploiter la relation S_1 en utilisant la procédure de base décrite dans le paragraphe §A.1.3. Notons par K_1 la prescription (noyau) obtenu en appliquant la procédure de base à $G'_1 = (A, S_1)$. Si K_1 est suffisamment réduit, on peut la prendre comme la prescription finale. Sinon, on peut refaire la procédure en considérant S_2 pour obtenir une nouvelle prescription $K_2 \subset K_1$ en appliquant la procédure de base à $G'_2 = (K_1, S_2)$. Le processus est répété jusqu'à obtention d'une prescription suffisamment réduite. Ce processus itératif donne généralement une prescription différente de celle issue de l'application de la procédure de base directement à $G' = (A, S_r)$.

A.2 Construction de la prescription dans le cadre de $P.\gamma$

La prescription dans ce cas doit produire un pré-ordre (non nécessairement complet).

A.2.1 Exploitation d'une relation de surclassement exacte

Différentes approches sont utilisables pour déduire une relation transitive à partir d'une relation de surclassement exacte S. Nous en présentons un exemple dans ce qui suit. Il s'agit d'utiliser des informations de discrimination afin de produire la prescription. Considérons une action a qui doit être évaluée par rapport à un sous ensemble $B \subset A$, un premier indice de discrimination est le nombre d'actions dans B qui sont surclassées par a. La *puissance* (*power*) $p_B(a)$ est définit ainsi :

$$p_B(a) = \mid \{b \in B : aSb\} \mid$$

Un deuxième indice de discrimination est le nombre d'actions dans B qui surclassent a. La *faiblesse* (*weakness*) $w_B(a)$ est définit ainsi :

$$w_B(a) = \mid \{b \in B : bSa\} \mid$$

Un troisième indice indique la position relative de a dans B nommé *qualification* et noté $q_B(a)$, est définit ainsi :

$$q_B(a) = p_B(a) - w_B(a)$$

Ces trois indices peuvent être pris en compte de plusieurs façons afin de déduire un pré-ordre complet. Considérons l'indice de qualification, trois procédures élémentaires peuvent être utilisées :

- une *procédure directe* qui produit le pré-ordre induit par q_A (elle range les actions de A selon leurs indices de qualification) ;
- une *procédure par choix itératif dans un ordre décroissant* qui choisit les actions dans $B = A$ dont la qualification q_B est maximale comme la première classe C_1, ensuite les actions dans $A \setminus \mathrm{C}_1$ dont la qualification est maximale comme la deuxième classe C_2, etc., jusqu'a ce que la dernière classe C_s soit identifiée ;

- une *procédure par choix itératif dans un ordre croissant* qui choisit les actions dans $B = A$ dont la qualification q_B est minimale comme la première classe D_1, ensuite les actions dans $A \setminus \mathrm{D}_1$ dont la qualification est minimale comme D_2, etc., jusqu'a ce que la dernière classe D_t soit identifiée.

De manière similaire, nous pouvons utiliser les indices p_A et w_A, qui donnent six autres procédures élémentaires. Notons que si S est un pré-ordre complet, chacune de ces procédures restitue S. Cependant, si S n'est pas transitive et/ou non complète, les pré-ordres obtenus peuvent être différents.
La prescription peut être construite en choisissant une de ces procédures élémentaires comme procédure d'exploitation. Étant donné que chaque procédure adopte un point de vue spécifique, il semble plus approprié d'utiliser une procédure "mixte" comme par example une procédure directe basée sur l'indice de qualification.

A.2.2 Exploitation de plusieurs relations de surclassement exactes et imbriquées

Supposons que le modèle de préférence consiste en r $(r > 1)$ relations de surclassement exactes et imbriquées $S_1 \subset S_2 \subset \cdots \subset S_r$. Comme dans le cas de la problématique $P.\alpha$, nous pouvons utiliser un processus qui consiste à raffiner progressivement la prescription en considérant successivement les relations $S_1, S_2, \cdots, S_r$. Le schéma général du processus est comme suit :

- Construire un pré-ordre complet Z_1
- Construire un pré-ordre complet Z_2
- Construire un pré-ordre partiel $Z = Z_1 \bigcap Z_2$ comme prescription

La construction de Z_1 et Z_2 sont effectués par une procédure de *distillation descendante* (*descending distillation*) et une procédure de *distillation ascendante* (*ascending distillation*) qui sont des extensions de la procédure par choix itératif basée sur l'indice de qualification.

A.2.3 Exploitation d'une seule relation floue

Supposons maintenant que le modèle de préférence consiste en une relation de surclassement floue σ. Étant donné l'équivalence entre le cas exact et le cas flou, nous pouvons adopter la procédure précédente. Il est également possible d'étendre les concepts au cas flou et utiliser les procédures décrites dans le paragraphe A.2.1. Par exemple, nous pouvons utiliser les indices suivants :

$$p'_B(a) = \sum_{b \in B} \sigma(a, b)$$

$$w'_B(a) = \sum_{b \in B} \sigma(b, a)$$

$$q'_B(a) = p'_B(a) - w'_B(a)$$

Cependant, et à cause de l'opérateur somme, ces extensions ont du sens que lorsqu'on admet que σ possède des propriétés cardinales solides.

Annexe B

Relations entre questions, réponses et caractéristiques de la situation décisionnelle

No. Question	Réponses	No. Caractéristique	Caractéristique
Q-DM-1	– hypothèses non acceptées – hypothèses plus au moins acceptées – hypothèses acceptées	C-DM-1	Acceptation des hypothèses de la méthode
Q-DM-2	– faible – moyen – élevé	C-DM-2	Effort cognitif
Q-DM-3	– un seul décideur – multiple coopératif – multiple non coopératif	C-DM-3	Nombre de décideurs
Q-DM-4	– non disponible – plus au moins disponible – disponible	C-DM-4	Disponibilité du décideur
Q-DM-5	– non coopératif – moyennement coopératif – très coopératif	C-DM-5	Niveau de coopération du décideur
Q-DM-6	– faible à très faible – moyenne – bonne à excellente	C-DM-6	Niveau des connaissances du décideur
Q-DM-7	– l'approche top-down – l'approche bottom-up – les deux approches	C-DM-7	Familiarité du décideur avec les critères/attributs

TAB. B.1 – Relation Questions-Réponses-Caractéristiques du décideur

No. Question	Réponses	No. Caractéristique	Caractéristique
Q-PB-1	– choix d'une seule action non dominée – choix d'un sous-ensemble d'actions non dominées – toutes les actions non dominées – rangement – tri – description – autres	C-PB-1	Type de problématique
Q-PB-2	– modèle du type A,A,E – modèle du type A,F,E – modèle à la AHP – autres modèles	C-PB-2	Type de formulation
Q-PB-3	– ensemble avec un nombre réduit d'éléments – ensemble avec un nombre moyen d'éléments – ensemble avec un grand nombre d'éléments	C-PB-3	Nature de l'ensemble des actions
Q-PB-4	– spécification explicite – spécification implicite	C-PB-4	Type de définition des actions
Q-PB-5	– actions ponctuelles – actions linéaires – actions surfaciques – actions complexes	C-PB-5	Représentation des actions potentielles
Q-PB-6	– par des objets géographiques ponctuels, linéaires ou surfaciques – par des unités spatiales	C-PB-6	Technique de construction
Q-PB-7	– pas – peu – beaucoup	C-PB-7	Existence des contraintes
Q-PB-8	– peu – moyen – beaucoup	C-PB-8	Nombre de critères/d'attributs
Q-PB-9	– information de type déterministe – information de type probabiliste – information de type flou – information de type mixte	C-PB-9	Type de l'information sur les critères/attributs
Q-PB-10	– niveau de mesure nominal – niveau de mesure ordinal – niveau de mesure intervalle – niveau de mesure ratio	C-PB-10	Nature de mesure de l'information sur les critères/attributs
Q-PB-11	– ponctuel ou local – régional ou national	C-PB-11	Formes de mesure de l'impact par rapport à la dimension spatiale
Q-PB-12	– ponctuel – dispersé	C-PB-12	Formes de mesure de l'impact par rapport à la dimension temporelle
Q-PB-13	– faible – moyen – excellent	C-PB-13	Degré de fiabilité de l'information

TAB. B.2 – Relation Questions-Réponses-Caractéristiques des problèmes de décision à référence spatiale

Annexe C

Méthode ELECTRE TRI

Nous présentons dans cette annexe la méthode de classification multicritère ELECTRE TRI. Signalons d'abord que cette présentation est reprise de Mousseau (2003) et Mousseau (2005). Pour plus de détails, nous renvoyons le lecteur intéressé aux deux références suivantes : Yu (1992) et Roy and Bouyssou (1993).
ELECTRE TRI est une méthode multicritère de tri qui affecte chaque action $a \in A$ à une des catégories en comparant a à des profils définissant les limites des catégories. Soit F l'ensemble des indices des m critères $g_1, g_2, \cdots, g_m$ ($F = \{1, 2, \cdots, m\}$) et $B = \{1, 2, \cdots, p\}$ l'ensemble des indices des frontières $b_1, b_2, \cdots b_p$ délimitant les $p + 1$ catégories $C_1, C_2, \cdots, C_{p+1}$ (b_h définissant la frontière haute de C_h et la frontière basse de C_{h+1}, $h = 1, 2 \cdots, p$ (cf. Figure 4.4). Dans la suite de la présentation, nous supposerons, sans perte de généralité, que le sens de préférence sur chaque critère est croissant.
ELECTRE TRI construit une relation de surclassement $S \subseteq A \times B \bigcup B \times A$, i.e., valide ou invalide la proposition aSb_h (et b_hSa), dont la signification est "a *est au moins aussi bonne que* b_h". Les préférences sur chaque critère sont définies par le biais des pseudo-critères (structure à deux seuils) (cf. Vincke (1992)). Les seuils d'indifférence et de préférence ($q_j(b_h)$ et $p_j(b_h)$) visent à prendre en compte l'imprécision liées aux performances. $q_j(b_h)$ représente la plus grande différence $g_j(a) - g_j(b_h)$ préservant une indifférence entre a et b_h sur le critère g_j ; $p_j(b_h)$ représente la plus petite différence $g_j(a) - g_j(b_h)$ compatible avec une préférence en faveur de a sur le critère g_j. Ainsi, les limites des catégories sont définies par les profils b_h ; $h \in B$ autour desquelles sont attachées deux zones d'imprécision (cf. Figure 4.4)
Pour valider l'affirmation aSb_h (ou b_hSa), deux conditions doivent être vérifiées :

- *Concordance* : pour qu'un surclassement aSb_h (ou b_hSa) soit acceptée, une majorité "suffisante" de critères doit être en accord avec cette proposition.
- *Non-discordance* : quand la condition de concordance est vérifiée, aucun des critères minoritaires ne doit s'opposer "trop fortement" à aSb_h (ou b_hSa).

Deux types de paramètres préférentiels inter-critères interviennent dans la construction de S :

- des *coefficients d'importance* $(k_1, k_2, \cdots, k_m)$ utilisés dans le test de concordance pour apprécier l'importance relative des coalitions de critères ; on supposera sans perte de généralité que $\sum_{j \in F} k_j = 1$.
- des *seuils de veto* $(v_1(b_h), v_2(b_h), \cdots, v_n(b_h))$; $h \in B$, utilisés dans le test de discordance. $v_j(b_h)$ représente la plus petite difference $g_j(b_h) - g_j(a)$ incompatible avec aSb_h.

ELECTRE TRI construit un indice $\sigma(a; b_h) \in [0, 1]$ ($\sigma(b_h, a)$, respectivement) qui représente la crédibilité de la proposition aSb_h (b_hSa, respectivement), $\forall a \in A, \forall h \in B$. La proposition aSb_h (b_hSa, respectivement) est jugée établie si $\sigma(a, b_h) \geq \lambda$ ($\sigma(b_h, a) \geq \lambda$, respectivement), λ représentant une "*seuil de coupe*" tel que $\lambda \in [0.5, 1]$. $\sigma(a, b_h)$ se définit comme suit (la valeur de $\sigma(bh, a)$ est calculée de façon analogue) :

`Algorithm SIGMA`

`1. Calculer` S_j, $\forall j \in F$:

$$S_j = \begin{cases} 0, & \texttt{if } g_j(b_h) - g_j(a) \geq p_j(b_h)\texttt{;} \\ 1, & \texttt{if } g_j(b_h) - g_j(a) \leq q_j(b_h)\texttt{;} \\ \frac{p_j(b_h) - g_j(b_h) + g_j(a)}{p_j(b_h) - q_j(b_h)}, & \texttt{otherwise.} \end{cases} \tag{C.1}$$

`2. Calculer`

$$S = \sum_{j \in F} k_j \cdot S_j \tag{C.2}$$

`3. Calculer` ND_j,$\forall j \in F$:

$$ND_j = \begin{cases} 0, & \texttt{if } g_j(a) \leq g_j(b_h) + p_j(b_h)\texttt{;} \\ 1, & \texttt{if } g_j(a) > g_j(b_h) + v_j(b_h)\texttt{;} \\ \frac{v_j(b_h) - g_j(a) + g_j(b_h)}{v_j(b_h) - p_j(b_h)}, & \texttt{otherwise.} \end{cases} \tag{C.3}$$

`4. Calculer`

$$ND = \prod_{j \in F : ND_j > S} \frac{1 - ND_j}{1 - S} \tag{C.4}$$

`5. Calculer`

$$\texttt{SIGMA} = S \cdot ND \tag{C.5}$$

Les valeurs de $\sigma(a, b_h)$, $\sigma(b_h, a)$ et λ déterminent la situation de préférence entre a et b_h :

- $\sigma(a, b_h) \geq \lambda$ et $\sigma(b_h, a) \geq \lambda \Rightarrow aSb_h$ et $b_hSa \Rightarrow aIb_h$
- $\sigma(a, b_h) \geq \lambda$ et $\sigma(b_h, a) < \lambda \Rightarrow aSb_h$ et $\neg(b_hSa) \Rightarrow aPb_h$
- $\sigma(a, b_h) < \lambda$ et $\sigma(b_h, a) \geq \lambda \Rightarrow \neg(aSb_h)$ et $b_hSa \Rightarrow b_hPa$
- $\sigma(a, b_h) < \lambda$ et $\sigma(b_h, a) < \lambda \Rightarrow \neg(aSb_h)$ et $\neg(b_hSa) \Rightarrow aRb_h$

Deux procédures d'affectation sont définies :

- Procédure pessimiste :
  - comparer a successivement à b_i ; $i = p, p-1, \cdots, 0$.
  - soit b_h le premier profil limite tel que aSb_h, alors affecter a à la catégorie C_{h+1}.
- Procédure optimiste :
  - comparer a successivement à b_i ; $i = 1, 2, \cdots p$.
  - soit b_h le premier profil limite tel que b_hPa, alors affecter a à la catégorie C_h.

Annexe D

Programmes mathématiques d'inférence

D.1 Notations

- $A = \{a_1, a_2, \cdots, a_n\}$: l'ensemble des actions
- $A^* \subset A$: exemples d'affectation (fournis par le décideur)
- $F = \{1, 2, \cdots, n\}$: indices des fonctions critères $g_1, g_2, \cdots, g_m$
- $B = \{b_1, b_2, \cdots, b_p\}$: indices des profils limites
- $K = \{C_1, C_2, \cdots, C_{p+1}\}$: ensemble de catégories
- q_j, q_j et v_j : seuils d'indifférence, de préférence et du veto associés au critère g_j (avec $q_j(g_j) \leq p_j(g_j) \leq v_j(g_j)$)
- $k_1, k_2, \cdots, k_m$: poids associés aux critères $g_1, g_2, \cdots, g_m$
- u_j : seuil de discordance (avec $p_j(g_j) \leq u_j(g_j) \leq v_j(g_j)$)
- $S^+ = \{(a, b) \in A^* : aSb\}$
- $S^- = \{(a, b) \in A^* : \neg aSb\}$
- λ : seuil de coupe (une petite valeur positive)
- ϵ : nombre positif
- C_M : catégorie haute à laquelle $a_k \in A^*$ doit être affectée
- C_m : catégorie basse à laquelle $a_k \in A^*$ doit être affectée

D.2 Programme mathématique pour l'inférence globale

Max α
s.t.
$\alpha \leq S(a, b) - \lambda, \forall\ (a, b) \in S^+$
$\alpha \leq \lambda - S(a, b)\epsilon, \forall\ (a, b) \in S^-$
$0.5 \leq \lambda$
$\lambda \leq 1$
$v_j > p_j, \forall\ j \in F$
$p_j > q_j, \forall\ j \in F$

$q_j \geq 0, \forall\, j \in F$
$\sum_{j=1}^{n} k_j = 1, \forall\, j \in F$
$k_j \geq \epsilon, \forall\, j \in F$

D.3 Programme mathématique pour l'inférence des poids k_i et du seuil de coupe λ

Max α
s.t.
$\alpha \leq \sum_{j=1}^{n} k_j S_j(a,b) ND(a,b), \forall\, (a,b) \in S^+$
$\alpha \leq \lambda - \sum_{j=1}^{n} k_j S_j(a,b) ND(a,b) + \epsilon, \forall\, (a,b) \in S^-$
$0.5 \leq \lambda$
$\lambda \leq 1$
$\sum_{j=1}^{n} k_j = 1, \forall\, j \in F$
$k_j \geq \epsilon, \forall\, j \in F$

D.4 Programme mathématique pour l'inférence du seuil du veto v_j

Max α
s.t.
$\alpha \leq \sum_{j=1}^{n} k_j S_j(a,b) ND(a,b), \forall\, (a,b) \in S^+$
$\alpha \leq \lambda - \sum_{j=1}^{n} k_j S_j(a,b) ND(a,b) + \epsilon$, for all $(a,b) \in S^-$
$0.5 \leq \lambda$
$\lambda \leq 1$
$\sum_{j=1}^{n} k_j = 1, \forall\, j \in F$
$k_j \geq \epsilon, \forall\, j \in F$

D.5 Programme mathématique pour l'inférence des profils limites b_h

Max α
s.t.
$\alpha \leq \sum_{j=1}^{n} k_j S_j(a,b) ND(a,b), \forall\, (a,b) \in S^+$
$\alpha \leq \lambda - \sum_{j=1}^{n} k_j S_j(a,b) ND(a,b) + \epsilon, \forall\, (a,b) \in S^-$
$0.5 \leq \lambda$
$\lambda \leq 1$
$\sum_{j=1}^{n} k_j = 1, \forall\, j \in F$
$k_j \geq \epsilon, \forall\, j \in F$

Annexe E

Version révisée de l'algorithme "label setting" de Martins

Notons d'abord que l'algorithme de Martins (1984) donné dans le paragraphe §E.1.3 est tiré de Ehrgott (2000). Le reste de l'annexe est extrait de Gandibleux et *al*. (2006).

E.1 Notions préliminaires

E.1.1 Définitions

Soit un graphe orienté $G = (\mathfrak{V}, \mathfrak{A})$, où $\mathfrak{V} = \{1, \cdots, n\}$ est l'ensemble de sommets avec $\mid \mathfrak{V} \mid = n$ et $\mathfrak{A} = \{(i_1, j_1), \cdots, (i_m j_m)\}$ est l'ensemble des arcs avec $\mid \mathfrak{A} \mid = m$. L'arc orienté reliant les sommets i et j est dénoté par (i, j), et le vecteur $(c_1(i, j), \cdots, c_k(i, j))$ représente la valuation associée avec l'arc (i, j). C est l'ensemble des valuations de arcs dans G. Désignons enfin par $s \in \mathfrak{V}$ un sommet origine et par $t \in \mathfrak{V}$ un sommet destination.
Un chemin r de s à t dans G est une séquence d'arcs et de sommets de s à t, où l'extrémité terminale d'un arc coincide avec l'extrémité initiale de l'arc suivant dans le chemin. L'espace de décision est désigné par $R_{s,t}$, l'ensemble de tous les chemin de s à t dans G, ou par $R_{s,\bullet}$, l'ensemble de tous les chemins de s à tous les autres sommets $V \setminus \{s\}$ dans G. Notons par $z_p(r)$ la valeur d'un chemin r par rapport à un objectif p, $p = 1 \cdots, w$, avec $w = \sigma + \mu$, le nombre d'objectifs. Le vecteur $z(r) = (z_1(r), \cdots, z_w(r))$ représente donc le *vecteur des performances* du chemin $r \in R_{s,t}$ dans l'espace des objectifs $Z = z(R_{s,t})$. La formulation des objectifs est $z_p(r) = \sum_{(i,j)\in r} c_p(i, j)$ pour les fonctions du type `S-type`, et $z_p(r) = \min_{(i,j)\in r} c_p(i, j)$ pour les fonctions du type `M-type`. Ils correspondent respectivement au problème `(1-S)` $\min \sum_{(i,j)\in r} c_p(i, j)$ et au problème `(1-M)` $\max \min_{(i,j)\in r} c_p(i, j)$.
Soient r^1 et r^2 deux chemins, et $z^1 = z(r^1)$, $z^1 = z(r^1)$ leurs vecteurs performances. Nous supposons que tous les objectifs sont à minimizer. Nous introduisons dans la suite quelques définitions utiles.

Définition E.1 *z^1 **domine** z^2, dénoter $z^1 \Delta z^2$, si et seulement si :*

$$z_p^1(r^1) \leq z_p^2(r^2), \forall p = 1 \cdots, w, \quad \textit{and} \quad z^1 \neq z^2.$$

Définition E.2 *La vecteur de performances z est **non-dominé** si et seulement si :*

$$z \in Z, \quad \textit{et} \quad \nexists z' \in Z \quad \textit{tel que} \quad z' \Delta z.$$

Définition E.3 *Un chemin r^e est **efficace** si et seulement si :*

$$r^e \in R_{s,t}, \quad \textit{et} \quad \nexists r \in R_{s,t} \quad \textit{tel que} \quad z(r)\Delta z(r^e).$$

Si r^e est une solution efficace, alors $z(r^e)$ est un *vecteur non-dominé*. Lorsque un chemin est non efficace, il est dominé.

Définition E.4 *z^1 **domine strictement** z^2 si et seulement si :*

$$z_p^1(r^1) < z_p^2(r^2), \forall p = 1 \cdots, w, \quad \textit{et} \quad z^1 \neq z^2.$$

Définition E.5 *Un chemin r^e est **faiblement efficace** si et seulement :*

$$z^e \in R_{s,t} \quad \textit{et} \quad \nexists x \in R_{s,t} \quad \textit{tel que} \quad z(x) < z(r^e).$$

Si r^e est une solution faiblement efficace, alors $z(r^e)$ est un vecteur *faiblement non dominé*. Lorsque un chemin est faiblement efficace, il est dominé.

E.1.2 Plus court chemin multi-objectifs

Le problème de plus court chemin multi-objectifs est un problème *NP-hard*. La version considéré dans cette annexe est la suivante :

$$\min_{r \in R_{s,t}} (z_1(r), \cdots, z_w(r)) \forall t \in V \setminus \{s\}$$

Notons par $E(R_{s,\bullet})$ l'*ensemble complet* (*maximal complete set*) des chemins efficaces dans $R_{s,\bullet}$ pour un sommet origine s, i.e., l'ensemble de tous les chemin de $R_{s,\bullet}$ dans lequel chaque chemin correspond à un point non-dominé. Plusieurs chemins efficaces r^1, r^2, r^3 peuvent correspondent au même point non-dominé $z(r^1) = z(r^2) = z(r^3)$ dans l'espace des objectifs. Dans ce cas, les chemin r^1, r^2, r^3 sont dits *équivalents* dans l'espace des objectifs. L'ensemble réduit (*minimal complete set*) des chemins efficace est un sous ensemble de $E(R_{s,\bullet})$ dont toutes les solutions sont non équivalentes, et pour chaque $r \in E(R_{s,\bullet})$, il existe un r' dans l'ensemble réduit tel que r et r' sont équivalents.

E.1.3 Algorithme de Martins

Martins (1984) a proposé un algorithme (nommé *label setting*) pour déterminer l'ensemble complet des chemins efficaces lorsque toutes les valuations sont non négatives ($c_p(i,j) \geq 0$ pour tout $(i,j) \in \mathfrak{A}$, et $p = 1, \cdots, w$) avec au moins une inégalité stricte. L'algorithme de Martins, présenté ci-après, est une extension multi-objectifs de l'algorithme de Dijkstra dans le lequel l'opérateur "$\min$" est remplacé par le test de dominance. L'idée de l'algorithme de Martins est assez intuitive. À chaque itération, et pour chaque sommet, deux types de marquages sont utilisés : *marquage permanent* et *marquage temporaire*. L'algorithme sélectionne l'étiquette la plus petite lexicographiquement à partir des étiquettes temporaires, la convertit en une étiquette permanente, et propage l'information contenue dans cette étiquette à toutes les étiquettes temporaires de ses successeurs. La procédure s'arrête lorsqu'il n'existe aucune étiquette temporaire. Chaque étiquette permanente correspondra à un chemin efficace.

```
Algorithme LABEL-SETTING
Input : Graphe G = (𝔙, 𝔄)
         s, t
Output : Chemins optimaux dans G de s à t
1. Marquer le sommet s par (0, 0, ··· , 0, nil, nil)
   Ajouter l'étiquette à TL
2. 2.1 Si TL = ∅ alors aller à 4.
       Soit (r_1, r_2, ··· , r_k, h, l)_α, l'étiquette d'ordre α du sommet x ≠ t,
       la plus petite lexicographiquement dans TL.
       Marquer cette étiquette comme permanente
   2.2 Tant qu'il existe un sommet y dans 𝔙 tel que (x, y) ∈ 𝔄 faire
      • Soit (r_1 + r_1(x, y), r_2 + r_2(x, y), ··· , r_k + r_k(x, y), x, k)_z,
      une étiquette temporaire d'ordre z du sommet y
      • Supprimer toutes les étiquettes temporaires du sommet y
      dominées par la nouvelle étiquette z,
      supprimer la nouvelle étiquette si elle est dominée
3. Aller à 2.
4. Utiliser les étiquettes permanentes pour retrouver
   les chemins efficaces
```

E.2 Version révisée de l'algorithme de Martins

Dans ce paragraphe, nous présentons une version révisée de l'algorithme de Martins pour les problèmes du type (σ-S|1-M) proposée par Gandibleux et *al*. (2006). Le changement principal concerne le test de dominance pour s'assurer que l'ensemble des chemins efficaces pour un problème de type (σ-S|1-M) est complet. Pour une meilleure lisibilité, les indices seront notés $1, 2, \cdots m, m+1, \cdots, m+h$ pour les fonctions objectifs de type S-type et μ correspond aux fonctions objectifs de type M-type. Une étiquette l^j peut être représenté par $l^j = [z_1, \cdots, z_k, i, h]$ (rappelons que $k = \sigma + \mu$) où $(z_1, \cdots, z_k)$ est le vecteur performances ; i est le sommet précédent à partir duquel le somme j a été marqué ; et h est la position dans la liste de étiquettes sur le sommet i. Considérons maintenant un sommet i connecté à un sommet j (cf. Figure E.1).

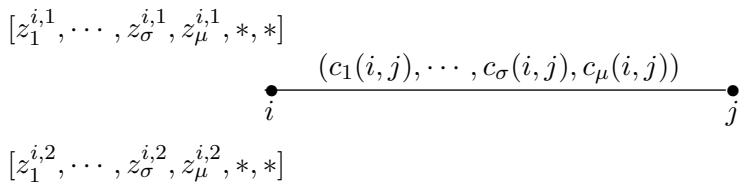


FIG. E.1 – Représentation schématique de deux étiquettes

La valuation de l'arc (i, j) est donnée par $(c_1(i, j), \cdots, c_\sigma(i, j), c_\mu(i, j))$. Considérons deux étiquettes temporaries $[z_1^{i,h}, \cdots, z_\sigma^{i,h}, z_\mu^{i,h}, *, *]$ ($h = 1, 2$) associé au sommet i. Lorsque $z_p^{i,1} = z_p^{i,2}$ $\forall p = 1, \cdots, \sigma$ et $z_\mu^{i,1} > z_\mu^{i,2}$, l'étiquette 2 est *faiblement non dominée* par l'étiquette 1. Selon le test de dominance de l'algorithme de Martins, l'étiquette 2 doit être supprimée. Considérons maintenant les étiquettes sur le sommet j. Deux cas se présentent, selon la valeur de $c_m u(i, j)$. Si $c_m u(i, j) \leq \min(z_\mu^{i,1}, z_\mu^{i,2})$, alors les deux étiquettes son équivalents et, par conséquent, l'étiquette ne doit pas être supprimée. Dans le cas contraire, l'étiquette 2 reste *faiblement non dominée*. Donc, le test de dominance

dans la version originale de l'algorithme de Martins ne peut pas d'identifier tous les chemins efficaces dans cette situation.
Étant donné que quelques étiquettes *faiblement non dominées* ne peuvent être permanentes, il n'est pas sûr que toutes les étiquettes permanentes correspondent à un chemin efficace à la fin de l'algorithme. Cependant, les étiquettes *faiblement non dominées* ne peuvent pas être supprimés car ils contribuent à la détermination des chemins efficaces. Mais au même temps, ne peuvent pas être le sommet destination d'un chemin efficace car, par définition, il n'existe pas une autre étiquette sur ce sommet avec une performance meilleure. Les étiquettes faiblement non dominées sont alors *cachées* dans la liste de étiquettes permanentes.
Pour déterminer tous les chemins efficaces, il faut choisir une étiquette permanente visible sur le sommet j et en extraire les valeurs correspondantes au sommets i et h. Ainsi, i est le sommet se trouvant juste devant j dans le chemin efficace. La valeur de h est nécessaire pour déterminer l'étiquette sur le sommet i qui a permis de produire le chemin en construction. Cette valeur indique que c'est la $h$ème étiquette sur le sommet i qui a produit ce sommet. En se déplaçant dans le sens inverse le premier sommet du (des) chemin(s) peut (peuvent) être retrouvés.
Pour résumer, la revision affecte trois aspects dans l'algorithme original :

- elle remplace la valeur 0 dans l'*étiquette* initiale par ∞ pour la fonction objectif $\max - \min$ correspondante.
- elle étend le test de dominance sur les *étiquettes*.
- elle élimine les étiquettes permanentes faiblement dominées pour la détermination des chemins efficaces à la fin de la phase de marquage.

Annexe F

Solveur GLPK

F.1 Présentation du solveur GLPK

GLPK (GNU Linear Programming Kit) is a set of routines written in the ANSI C programming language and organized in the form of a callable library. It is intended for solving linear programming (LP), mixed integer programming (MIP), and other related problems
GLPK assumes the following formulation of linear programming (LP) problem :

$$\min \ \texttt{(or} \ \max\texttt{)} \ Z = c_1 x_{m+1} + c_2 x_{m+2} + \cdots + c_n x_{m+n} + c_0 \quad \texttt{(1.1)}$$

subject to linear constraints :

$$\begin{aligned} x_1 &= a_{11} x_{m+1} + a_{12} x_{m+2} + \cdots + a_{1n} x_{m+n} \\ x_2 &= a_{21} x_{m+1} + a_{22} x_{m+2} + \cdots + a_{2n} x_{m+n} \\ &\vdots \\ x_m &= a_{m1} x_{m+1} + a_{m2} x_{m+2} + \cdots + a_{mn} x_{m+n} \end{aligned} \quad \texttt{(1.2)}$$

and bounds of variables :

$$\begin{aligned} l_1 &\leq x_1 \leq u_1 \\ l_2 &\leq x_2 \leq u_2 \\ &\vdots \\ l_{m+n} &\leq x_{m+n} \leq u_{m+n} \end{aligned} \quad \texttt{(1.3)}$$

where :
$x_1, x_2, \cdots, x_m$ are the auxiliary variables ; $x_{m+1}, x_{m+2}, \cdots, x_{m+n}$ are the structural variables ; Z is the objective function ; $c_1, c_2, \cdots, c_n$ are objective coefficients ; c_0 is a constant term (“shift") of the objective function ; $a_{11}, a_{12}, \cdots, a_{mn}$ are the constraint coefficients ; $l_1, l_2, \cdots, l_{m+n}$ are lower bounds of variables ; $u_1, u_2, \cdots, u_{m+n}$ are upper bounds of variables.

Auxiliary variables are also called rows, because they correspond to rows of the constraint matrix (i.e. a matrix built of the constraint coefficients). Analogously, structural variables are also called columns, because they correspond to columns of the constraint matrix. Bounds of variables can be finite as well as infinite. Besides, lower and upper bounds can be equal to each other. Thus, the following types of variables are possible :

Bounds of variable	Type of variable
$-\infty < x_k < +\infty$	Free (unbounded) variable
$l_k \leq x_k < +\infty$	Variable with lower bound
$-\infty < x_k \leq u_k$	Variable with upper bound
$l_k \leq x_k \leq u_k$	Double-bounded variable
$l_k = x_k = u_k$	Fixed variable

Note that the types of variables shown above are applicable to structural as well as to auxiliary variables. For solving LP problems GLPK uses a well known numerical procedure called the simplex method.
Mixed integer linear programming (MIP) problem is LP problem in which some variables are additionally required to be integer. GLPK assumes that MIP problem has the same formulation as ordinary (pure) LP problem (1.1)-(1.3), i.e. includes auxiliary and structural variables, which may have lower and/or upper bounds. However, in case of MIP problem some variables may be required to be integer. This additional constraint means that a value of each integer variable must be only integer number. Note that GLPK allows only structural variables to be of integer kind.

F.2 Comment utiliser GLPK ?

In order to understand how GLPK API routines can be used, consider the following simple LP problem :

$$\max Z = 10x_1 + 6x_2 + 4x_3$$

subject to :

$$x_1 + x_2 + x_3 \leq 100$$

$$10x_1 + 4x_2 + 5x_3 \leq 600$$

$$2x_1 + 2x_2 + 6x_3 \leq 300$$

where all variables are non-negative :

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0$$

At first this LP problem should be transformed to the standard form (1.1)-(1.3). This can be easily done by introducing auxiliary variables, by one for each original inequality constraint. Thus, the problem can be reformulated as follows :

$$\max Z = 10x_1 + 6x_2 + 4x_3$$

subject to :

$$p_1 = x_1 + x_2 + x_3$$

$$p_2 = 10x_1 + 4x_2 + 5x_3$$
$$p_3 = 2x_1 + 2x_2 + 6x_3$$

and bounds of variables :

$$-\infty < p_1 \leq 100$$
$$0 \leq x_1 < +\infty$$
$$\infty < p_2 \leq 600$$
$$0 \leq x_2 < +\infty$$
$$\infty 1 < p_3 \leq 300$$
$$0 \leq x_3 < +\infty$$

where p_1, p_2, p_3 are auxiliary variables (rows), and x_1, x_2, x_3 are structural variables (columns).

The example C program shown below uses GLPK API routines in order to solve this LP problem.

```
♯ <stdio.h>
♯ <stdlib.h>
♯ “glpk.h"
int main(void){
LPX *lp;
int ia[1+1000], ja[1+1000];
double ar[1+1000], Z, x1, x2, x3;
s1 : lp = lpx-create-prob();
s2 : lpx-set-prob-name(lp, "sample");
s3 : lpx-set-obj-dir(lp, LPX-MAX);
s4 : lpx-add-rows(lp, 3);
s5 : lpx-set-row-name(lp, 1, “p1");
s6 : lpx-set-row-bnds(lp, 1, LPX-UP, 0.0, 100.0);
s7 : lpx-set-row-name(lp, 2, “p2");
s8 : lpx-set-row-bnds(lp, 2, LPX-UP, 0.0, 600.0);
s9 : lpx-set-row-name(lp, 3, “p3");
s10 : lpx-set-row-bnds(lp, 3, LPX-UP, 0.0, 300.0);
s11 : lpx-add-cols(lp, 3);
s12 : lpx-set-col-name(lp, 1, “x1");
s13 : lpx-set-col-bnds(lp, 1, LPX-LO, 0.0, 0.0);
s14 : lpx-set-obj-coef(lp, 1, 10.0);
s15 : lpx-set-col-name(lp, 2, “x2");
s16 : lpx-set-col-bnds(lp, 2, LPX-LO, 0.0, 0.0);
s17 : lpx-set-obj-coef(lp, 2, 6.0);
s18 : lpx-set-col-name(lp, 3, “x3");
s19 : lpx-set-col-bnds(lp, 3, LPX-LO, 0.0, 0.0);
s20 : lpx-set-obj-coef(lp, 3, 4.0);
s21 : ia[1] = 1, ja[1] = 1, ar[1] = 1.0;
s22 : ia[2] = 1, ja[2] = 2, ar[2] = 1.0;
s23 : ia[3] = 1, ja[3] = 3, ar[3] = 1.0;
s24 : ia[4] = 2, ja[4] = 1, ar[4] = 10.0;
s25 : ia[5] = 3, ja[5] = 1, ar[5] = 2.0;
```

```
s26 : ia[6] = 2, ja[6] = 2, ar[6] = 4.0;
s27 : ia[7] = 3, ja[7] = 2, ar[7] = 2.0;
s28 : ia[8] = 2, ja[8] = 3, ar[8] = 5.0;
s29 : ia[9] = 3, ja[9] = 3, ar[9] = 6.0;
s30 : lpx-load-matrix(lp, 9, ia, ja, ar);
s31 : lpx-simplex(lp);
s32 : Z = lpx-get-obj-val(lp);
s33 : x1 = lpx-get-col-prim(lp, 1);
s34 : x2 = lpx-get-col-prim(lp, 2);
s35 : x3 = lpx-get-col-prim(lp, 3);
s36 : affiche(Z,x1,x2,x3);
s37 : lpx-delete-prob(lp);
return 0;
}
```

The statement s1 creates a problem object using the routine `lpx-create-prob`. Being created the object is initially empty. The statement s2 assigns a symbolic name to the problem object.
The statement s3 calls the routine `lpx-set-obj-dir` in order to set the optimization direction flag, where `LPX-MAX` means maximization.
The statement s4 adds three rows to the problem object.
The statement s5 assigns the symbolic name 'p_1' to the first row, and the statement s6 sets the type and bounds of the first row, where `LPX-UP` means that the row has an upper bound. The statements s7, s8, s9, s10 are used in the same way in order to assign the symbolic names 'p_2' and 'p_3' to the second and third rows and set their types and bounds.
The statement s11 adds three columns to the problem object.
The statement s12 assigns the symbolic name 'x_1' to the first column, the statement s13 sets the type and bounds of the first column, where LPX-LO means that the column has an lower bound, and the statement s14 sets the objective coefficient for the first column. The statements s15-s20 are used in the same way in order to assign the symbolic names 'x_2' and 'x_3' to the second and third columns and set their types, bounds, and objective coefficients.
The statements s21-s29 prepare non-zero elements of the constraint matrix (i.e. constraint coefficients). Row indices of each element are stored in the array `ia`, column indices are stored in the array `ja`, and numerical values of corresponding elements are stored in the array `ar`. Then the statement s30 calls the routine `lpx-load-matrix`, which loads information from these three arrays into the problem object. Now all data have been entered into the problem object, and therefore the statement s31 calls the routine `lpx-simplex`, which is a driver to the simplex method, in order to solve the LP problem. This routine finds an optimal solution and stores all relevant information back into the problem object.
The statement s32 obtains a computed value of the objective function, and the statements s33-s35 obtain computed values of structural variables (columns), which correspond to the optimal basic solution found by the solver.
The statement s36 call the procedure `affiche` to print the optimal solution. The result may look like follows : Z = 733.333 ; x1 = 33.3333 ; x2 = 66.6667 ; x3 = 0
Finally, the statement s37 calls the routine `lpx-delete-prob`, which frees all the memory allocated to the problem object.

Annexe G

Structures des fichiers d’entrée et de sortie pour GLPK et IRIS

G.1 Fichier "input.txt" pour GLPK

```
;--problem name
sample
;--creation date
27 10 2006
;--
;--optimization 1 : maximisation; 0 : minimisation
;--
1
;--
;--number of rows
;--
3
;--rows descriptions (bnds : 0 : LPX-LO; 1 :LPX-UP)
;--name bnds left right
;--
p1 1 0.0 100.0
p2 1 0.0 600.0
p3 1 0.0 300.0
;--number of columns
3
;--columns descriptions (bnds : 0 : LPX-LO; 1 :LPX-UP)
;--name bnds left right coef
x1 0 0.0 0.0 10.0
x2 0 0.0 0.0 6.0
x3 0 0.0 0.0 4.0
;--constraint matrix
;--ia ja ar
1 1 1.0
```

```
1 2 1.0
1 3 1.0
2 1 10.0
2 2 4.0
2 3 5.0
3 1 2.0
3 2 2.0
3 3 6.0
```

G.2 Fichier "output.txt" pour GLPK

```
;--
;--problem name
sample
;--
;--creation date
27 10 2006
;--
;--decision variables values
x1 33.3333
x2 66.6667
x3 0
;--
;--objective function value
Z 733.333
```

G.3 Fichier "input.tri" pour IRIS

```
c version 2
c Size of the problem : (nbcrit,nbcat,nbact)
t 5 4 15
c Directions of preference :
d 1 1 1 1 1
c Profiles
p 1 8 8 8 8 8
p 2 12 12 12 12 12
p 3 14 14 14 14 14
c Thresholds
s 1 1 0 0 0 0
s 1 2 0 0 0 0
s 1 3 0 0 0 0
s 1 4 0 0 0 0
s 1 5 0 0 0 0
s 2 1 0 0 0 0
s 2 2 0 0 0 0
```

```
s 2 3 0 0 0 0
s 2 4 0 0 0 0
s 2 5 0 0 0 0
s 3 1 0 0 0 0
s 3 2 0 0 0 0
s 3 3 0 0 0 0
s 3 4 0 0 0 0
s 3 5 0 0 0 0
c Actions
a 1 2 4 7 11 16 1 1 s-unit-1
a 2 5 4 7 11 11 3 4 s-unit-2
a 3 7 9 11 10 16 3 3 s-unit-3
a 4 8 5 11 10 3 1 1 s-unit-4
a 5 10 11 11 6 3 1 4 s-unit-5
a 6 10 4 12 5 14 1 4 s-unit-6
a 7 11 13 18 16 9 1 2 s-unit-7
a 8 11 16 16 12 15 1 4 s-unit-8
a 9 12 4 8 5 17 1 4 s-unit-9
a 10 13 8 15 7 6 1 4 s-unit-10
a 11 13 11 16 7 6 3 4 s-unit-11
a 12 15 10 1 5 1 1 4 s-unit-12
a 13 15 10 12 18 8 4 4 s-unit-13
a 14 18 9 1 13 8 1 4 s-unit-14
a 15 19 13 14 11 8 1 4 s-unit-15
c Upper bounds on weights :
K S 1 0.5
K S 2 0.5
K S 3 0.5
K S 4 0.5
K S 5 0.5
c Lower bounds on weights :
K I 1 0
K I 2 0
K I 3 0
K I 4 0
K I 5 0
c Additional constraints :
K N 0
c Bounds on lambda
L M 1
L m 0.5
n name of criteria
Criterion 1
Criterion 2
Criterion 3
Criterion 4
Criterion 5
** END OF FILE ***
```

G.4 Fichier "output.rpt" pour IRIS

```
INPUT FILE :
C :\glpk-4.8\input.tri

RESULTS :
ACTION Worst Cat Inferred Cat Best Cat
s-unit-1 4
s-unit-2 2
s-unit-3 4
s-unit-4 1
s-unit-5 2
s-unit-6 4
s-unit-7 3
s-unit-8 4
s-unit-9 4
s-unit-10 2
s-unit-11 2
s-unit-12 2
s-unit-13 2
s-unit-14 2
s-unit-15 3

INFERENCE PROGRAM :
Descr alpha lambda k1 k2 k3 k4 k5 <,=,> RHS Error
C( s-unit-1)<=1 1 1 0 0 0 -1 -1 >= 0.0001 0.25
C( s-unit-2)>=3 1 -1 0 0 0 0 0 >= 0 0.25
C( s-unit-3)>=3 1 -1 0 0 0 0 1 >= 0 -0.2499
C( s-unit-3)<=3 1 1 0 0 0 0 -1 >= 0.0001 0.25
C( s-unit-4)<=1 1 1 -1 0 -1 -1 0 >= 0.0001 -0.2497
C( s-unit-7)<=2 1 1 0 -1 -1 -1 0 >= 0.0001 0.25
C( s-unit-11)>=3 1 -1 1 0 1 0 0 >= 0 0.2498
C( s-unit-13)>=4 1 -1 1 0 0 1 0 >= 0 0.2498
LB lambda 1 1 0 0 0 0 0 >= 0.5 0.25
UB k1 -1 0 1 0 0 0 0 <= 0.5 -0.4998
UB k2 -1 0 0 1 0 0 0 <= 0.5 -0.0001
UB k3 -1 0 0 0 1 0 0 <= 0.5 -0.5
UB k4 -1 0 0 0 0 1 0 <= 0.5 -0.5
UB k5 -1 0 0 0 0 0 1 <= 0.5 -0.0001

INFERRED SOLUTION :
lambda k1 k2 k3 k4 k5
0.25 0.0002 0.4999 0 0 0.4999
```

Vu :
Le Président
M.

Vu :
Les Suffrageants
M.

Vu et permis d'imprimer :
Le Vice-Président du Conseil Scientifique Chargé de la Recherche de l'Université Paris Dauphine

Résumé

Les SIG, *systèmes d'information géographiques*, stockent des données géo-référencées dans des bases de données géographiques, ouvrant ainsi de grandes potentialités en terme d'exploitation. Une utilisation fréquente des SIG concerne la prise de décision à référence spatiale. Néanmoins, la technologie SIG actuelle souffre encore de plusieurs lacunes, dues en grande partie à un manque de capacités analytiques capables de supporter la nature multicritère des problèmes spatiaux. La solution la plus diffusée pour faire évoluer les SIG vers un vrai outil d'aide à la décision à référence spatiale est l'*analyse multicritère* (AMC). De nombreux travaux d'intégration SIG-AMC ont été publiés depuis le début des années 1990. Cependant, ces travaux présentent plusieurs limites qui les empêchent à être diffusés au delà du cadre académique : (i) utilisation du mode d'intégration indirecte ou encastrée, (ii) intégration d'une seule méthode ou d'un nombre limité de méthodes, (iii) absence d'une méthodologie pour le choix de la méthode à appliquer dans un problème donné, (iv) intégration des méthodes du critère unique de synthèse, et (v) nécessité d'une connaissance approfondie du SIG et de l'AMC. Dans ce travail de thèse, notre contribution a porté sur la proposition de solutions conceptuelles, méthodologiques et informatiques pour surpasser ces différentes lacunes. Plus précisément, nous proposons : (i) une stratégie d'intégration SIG-AMC, (ii) un module à base de règles pour le choix de la procédure d'agrégation, (iii) une méthodologie pour la cartographie décisionnelle multicritère facilitant l'utilisation des méthodes de surclassement de synthèse, et (iv) une algèbre destinée à la modélisation spatiale multicritère. Pour valider les solutions proposées, nous avons développé un prototype et nous l'avons appliqué à un problème de génération des corridors en utilisant des données réelles, relatives à l'Ile-de-France. Les résultats obtenus sont satisfaisants.

Mots clés : Système d'information géographique, Analyse multicritère, Cartographie décisionnelle multicritère, Algèbre des cartes, Génération des corridors

Abstract

The GIS, *geographical information systems*, store geo-referenced data in geographical databases. Storage of geographical data is of great use in many areas. One frequent use of GIS is in the context of spatial decision-making. However, GIS technology suffers from several limitations that are due to lack of analysis tools necessary for dealing with the multicriteria nature of spatial problems. To enhance the role of GIS in spatial decision-making, most of researchers support the idea of coupling the GIS with *multicriteria analysis* (MCA). A great deal of papers concerning GIS-MCA integration have been published since 1990. However, these works have several limitations that prevent them from going beyond the academic contexts : (i) the use of loose or tight integration modes, (ii) incorporation of only one or a limited number of methods, (iii) lack of a formal methodology to assist the decision maker during the selection of the method to apply in a given problem, (iv) integration of weighted-sum like decision rules, and (v) the need for a good knowledge about GIS and MCA. In this thesis, our objective is to propose conceptual, methodological and computational solutions to handle these problems. More precisely, we propose : (i) a strategy for coupling GIS and MCA, (ii) a rule-based module for the selection of the multicriteria aggregation procedure, (iii) a methodology for multicriteria decisional cartography permitting the use of outranking methods, and (iv) an algebra for multicriteria spatial modeling. To validate the solutions proposed in this research, we have developed a prototype and applied it to a problem of corridor generation using real data relative to Ile-de-France region.

Keywords : Geographical information system, Multicriteria analysis, Multicriteria decisional cartography, Map algebra, Corridors generation