HAL
open science

Méthodes d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur pour résoudre le problème de sélection dans un environnement certain/incertain : cas de la localisation des centres de distribution

Maroi Agrebi

To cite this version:

Maroi Agrebi. Méthodes d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur pour résoudre le problème de sélection dans un environnement certain/incertain : cas de la localisation des centres de distribution. Intelligence artificielle [cs.AI]. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis; Université de Sfax (Tunisie), 2018. Français. NNT : 2018VALE0013 . tel-01880087

HAL Id: tel-01880087

https://theses.hal.science/tel-01880087v1

Submitted on 24 Sep 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse de doctorat

Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université Polytechnique Hauts-de-France et l'Université de Sfax

Spécialité : **Informatique**

présentée et soutenue le 12 Avril 2018, à Valenciennes par

Maroi AGREBI

(version finale)

Écoles doctorales :
Sciences Pour l'Ingénieur (SPI)
Sciences Économiques, Gestion et Informatique (EGI)

Équipes de recherche, Laboratoires :
Département Informatique
Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines (LAMIH UMR CNRS 8201)
Laboratoire de Modélisation des Systèmes de Raisonnement Automatisés (MARS LR 17ES05)

Méthodes d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur pour résoudre le problème de sélection dans un environnement certain/incertain : Cas de la localisation des centres de distribution

JURY

Président du jury :

Prof. Saïd Hanafi	Université Polytechnique Hauts-de-France, France

Rapporteurs :

Prof. Cyrille Bertelle	Université du Havre, France
Prof. Henda Ben Ghezala	Université de la Manouba, Tunisie

Examinateur :

Prof. Marc Pirlot	Université de Mons, Belgique

Invité :

Prof. Abdelhakim Artiba	Université Polytechnique Hauts-de-France, France

Directeurs de thèse :

Prof. Mourad Abed	Université Polytechnique Hauts-de-France, France
Prof. Mohamed Nazih Omri	Université de Sousse, Tunisie

Résumé

Le travail de recherche présenté dans cette thèse s'inscrit dans la continuité des travaux de l'aide à la décision multi-critère de groupe (décideurs), particulièrement dans le champ de sélection de la localisation des centres de distribution.

Dans un environnement certain, si la décision de sélection de la localisation des centres de distribution a donné lieu à plusieurs travaux de recherche, elle n'a jamais été l'objet, à notre connaissance, d'une décision prise par plusieurs décideurs. À cet égard, le premier objectif de cette thèse est de proposer une méthode d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur (MAADM) pour résoudre le problème posé. Pour se faire, nous avons adapté et étendu la méthode ELECTRE I.

Dans un environnement incertain, au vu de l'incertitude inhérente et l'imprécision du processus décisionnel humain ainsi que les comportements futurs du marché et des entreprises, le deuxième objectif de cette thèse est de développer une méthode floue d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur (FMAADM) pour traiter le problème en question. Pour cela, nous avons couplé la méthode MAADM avec la théorie des ensembles flous.

Pour la validation des deux contributions, nous avons conçu un système d'aide à la décision (S-DSS) pour implémenter les algorithmes de la méthode MAADM et la méthode FMAADM. Sur la base du S-DSS, deux études expérimentales ont été menées. Nous avons, aussi, appliqué une analyse de sensibilité pour vérifier la sensibilité de la solution retenue vis-à-vis aux variations de poids des critères d'évaluation. Les résultats obtenus prouvent que les deux méthodes proposées répondent à l'objectif recherché et ainsi retenues pour la sélection de la meilleure localisation dans un contexte certain/incertain de multi-attribut et multi-acteur.

Mots clés : aide à la décision multi-critère, multi-attribut, multi-acteur, ELECTRE I, théorie des ensembles flous, système d'aide à la décision.

Abstract

The research work presented in this thesis is part of the works' continuity on multi-criteria group (decision-makers) decision-making, particularly in the field of the distribution centers' location selection.

Under certain environment, although the decision to select the location of the distribution centers has given rise in several research works, it has never been the object, to our knowledge, of a decision taken by several decision makers. In this regard, the first objective of this thesis is to develop a multi-attribute and multi-actor decision-making method (MAADM) to resolve the posed problem. For this purpose, we have adapted and extended the ELECTRE I method.

Under uncertain environment, In view of the inherent uncertainty and inaccuracy of human decision-making, the future behavior of the market and companies, the second objective of this thesis is to propose a fuzzy multi-attribute and multi-actor decision-making method (FMAADM) to treat the problem in question. To this end, we have coupled the MAADM method with the fuzzy set theory.

To validate the two contributions, we designed a decision support system (S-DSS) to implement the MAADM method and the FMAADM method. Based on the S-DSS, two experimental studies were conducted. We also applied a sensitivity analysis to verify the sensitivity of the solution retained vis-a-vis to weights' variations of evaluation criteria. The obtained results prove that the MAADM method and the FMAADM method meet the desired objective and thus retained for the selection of the best location under certain/uncertain context of multi-attribute and multi-actor.

Keywords : multi-criteria decision making, multi-attribute, multi-actor, ELECTRE I, fuzzy set theory, decision support system.

Remerciements

La réalisation de ce travail de recherche est le fruit d'un certain nombre d'événements, de rencontres, de discussions et de relations très fructueuses qui m'ont permis de m'entourer de ressources humaines ainsi que d'acquérir les outils scientifiques nécessaires pour la concrétisation de cette thèse de doctorat. De ce fait, je voudrais exprimer mes remerciements aux personnes qui ont contribué directement à l'aboutissement de ce travail de thèse.

Mes meilleurs remerciements vont à Madame Henda Ben Ghezala, Professeur de l'Université de la Manouba-Tunisie, et Monsieur Cyrille Bertelle, Professeur de l'Université du Havre-France, de m'avoir faite l'honneur d'être rapporteurs de ce mémoire. Je suis également reconnaissante envers Messieurs Marc Pirlot, Professeur à l'Universié de Mons-Belgique, et Said Hanafi, Professeur de l'Université Polytechnique Hauts-de-France-France, d'avoir acceptés d'examiner ce travail. Je suis aussi reconnaissante envers Monsieur le Professeur Abdelhakim Artiba, Président de l'Université Polytechnique Hauts-de-France-France, pour avoir accepté de participer au jury de cette thèse. Merci à tous d'avoir pris de votre précieux temps pour lire, juger, et critiquer ce travail.

Mes vifs remerciements s'adressent à mon directeur de thèse Monsieur Mohamed Nazih Omri, Professeur de l'Université de Sousse-Tunisie, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant de diriger cette thèse, les conseils et les commentaires toujours forts pertinents concernant mon travail de recherche.

Mes plus profondes remerciements vont tout particulièrement à mon directeur de thèse, Monsieur le Professeur Mourad Abed, Vice-Président délégué au numérique et à l'innovation pédagogique, de l'Université Polytechnique Haut-de-France, pour m'avoir proposé un sujet de thèse aussi intéressant et d'actualité, m'avoir

grandement motivée pour ajouter plus de passion et d'entrain dans mon travail de recherche, son soutien inconditionnel qu'il m'a apporté au quotidien et sa qualité humaine. Je ne saurais assez lui exprimer mes remerciements les plus sincères.

Mes meilleurs remerciements s'adressent à Monsieur le Professeur Thierry-Marie Guerra, Directeur du LAMIH pour m'avoir accueillie pendant ces années de thèse et à tous les personnels de ce laboratoire, particulièrement Messieurs les Professeurs, Said Hanafi, Directeur de l'équipe Informatique et Christophe Kolski, Directeur adjoint de l'équipe Informatique, pour toutes les discussions constructives. Je suis spécialement reconnaissante envers Monsieur le Professeur Houcine Ezzedine pour son aide et ses multiples conseils avisés.

Mes sincères remerciements vont aux personnels de l'IUT, l'ISTV, l'IAE et l'ISGIS avec lesquels j'ai eu le grand honneur d'enseigner et à tous mes chers enseignants pour la qualité de l'enseignement qu'ils ont bien voulu me prodiguer durant mes études.

Mes sincères remerciements vont également aux personnels de la DRV de l'Université Polytechnique Hauts-de-France, particulièrement à Monsieur le Directeur Christian Michel-Dansac pour son encouragement et sa bienveillance.

Un grand merci à ma chère Bako.R pour tout les vrais moments partagés ensemble, son aide, son soutien et sa générosité. Un grand merci également à mes amis Ahmed.D et Mondher.S pour m'avoir accompagnés et aidés pendant ces dernières années. Je remercie aussi mes amis avec lesquels j'ai partagé des beaux moments et souvenirs, particulièrement Sahar.H-K, Marwa.M, Mariem.B, Dorra.B, Souhir.C, Raoua.C, Hedi.G, Julien.S, Yahya.B, Tariq.K, Thibault.D, Yunfei.W, Fedy.B, Benyamine.A, Marko.M, Amir.B et Anis.T.

Mes plus profondes gratitudes vont envers mes très chers parents Moufida et Mongi, mes très chères sœurs Amira et Ines. Merci pour tout ce que vous avez fait pour moi. Merci d'avoir fait de moi ce que je suis aujourd'hui. J'ai évidemment une pensée très particulière pour mes beaux frères Mohammed et Samy, mes neveux Bayrem et Chehine et ma nièce Yasmine.

Dédicace

À la mémoire de ma grand-mère Habiba,
à mes parents Moufida et Mongi,
à mes sœurs Amira et Ines,
à mes neveux Bayrem et Chehine,
à ma nièce Yasmine,
à mon leader Mourad,
ceux qui sont toujours à mes côtés
et me donnent la force de continuer.

Table des matières

Table des figures **V**

Liste des tableaux **VII**

Introduction générale **1**

I Aide à la décision multi-critère : Notions et méthodes **5**

I.1 Introduction 6

I.2 Décision et aide à la décision 6

I.2.1 Notion de la décision 7

I.2.2 Aide à la décision : définitions, approches et processus 8

I.3 Aide à la décision multi-critère 14

I.3.1 Classification des problématiques de décision 16

I.3.2 Processus d'aide à la décision multi-critère 21

I.4 Classification des méthodes d'aide à la décision multi-critère 25

I.4.1 Étude des méthodes d'aide à la décision multi-objectif 25

I.4.2 Étude des méthodes d'aide à la décision multi-attribut 26

I.5 Conclusion 34

II Méthodes et critères d'évaluation liés à la sélection de la localisation des centres de distribution **35**

II.1 Introduction 36

II.2 Classification des méthodes de sélection de la localisation des centres de distribution dans un environnement certain 36

II.2.1 Méthodes d'aide à la décision multi-critère 37

II.2.2 Métaheuristiques pour l'aide à la décision multi-objectif 38
II.2.3 Méthodes d'optimisation combinatoire multi-objectif 44
II.3 Classification des méthodes de sélection de la localisation des centres de distribution dans un environnement incertain 45
II.3.1 Métaheuristiques floues pour l'aide à la décision multi-objectif 45
II.3.2 Méthodes floues d'aide à la décision multi-critère 48
II.4 Discussion des méthodes existantes 57
II.5 Critères d'évaluation 59
II.6 Conclusion 66

III Méthodes d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur pour résoudre le problème de sélection 67

III.1 Introduction 68
III.2 Principe général des contributions 69
III.3 Méthode d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur 71
III.3.1 Choix de la méthode ELECTRE I 71
III.3.2 Démarche de la méthode MAADM 72
III.3.3 Architecture de la méthode MAADM 77
III.4 Méthode floue d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur . . . 81
III.4.1 Approche floue de [Chen, 2001] : présentation et utilisation . . 82
III.4.2 Démarche de la méthode FMAADM 87
III.4.3 Architecture de la méthode FMAADM 92
III.5 Conclusion 94

IV Études expérimentales et analyses des résultats 95

IV.1 Introduction 96
IV.2 Modélisation conceptuelle du S-DSS 97
IV.3 Étude de cas : Application de la méthode MAADM 104
IV.3.1 Présentation de l'étude de cas 104
IV.3.2 Application de la méthode MAADM 106
IV.3.3 Analyse de sensibilité 113
IV.4 Étude de cas : Application de la méthode FMAADM 116

IV.4.1 Présentation de l'étude de cas 116
IV.4.2 Application de la méthode FMAADM 118
IV.5 Conclusion 130

Conclusion générale et Perspectives **131**

Bibliographie **135**

Table des figures

I.1 Processus de décision linaire 12
I.2 Processus de décision cyclique 13
I.3 Processus de décision mixte 13
I.4 Préférence entre les alternatives et selon le vrai critère 15
I.5 Préférence entre les alternatives et selon le quasi-critère 15
I.6 Préférence entre les alternatives et selon le pré-critère 16
I.7 Préférence entre les alternatives et selon le pseudo-critère 16
I.8 Problématique du choix 18
I.9 Problématique du tri 19
I.10 Problématique du rangement 20
I.11 Problématique de description 20
I.12 Processus de décision multi-critère 22
I.13 Classification des problèmes de localisation multi-critère 25

III.1 Structure hiérarchique dans un problème de sélection 70
III.2 Organigramme de la méthode MAADM 74
III.3 Architecture de la méthode MAADM 78
III.4 Paramétrage de l'application et attribution de l'importance des critères 79
III.5 Évaluation des alternatives 80
III.6 Génération des matrices 80
III.7 Graphe du surclassement 81
III.8 Nombre flou n 83
III.9 Nombre flou n avec α-coupes 84
III.10 Nombre flou triangulaire n 84

III.11 Organigramme de la méthode FMAADM 88
III.12 Architecture de la méthode FMAADM 92
III.13 Module flou du niveau d'application de la méthode FMAADM 93

IV.1 Architecture du S-DSS 97
IV.2 Diagramme de cas d'utilisation : Vue de l'administrateur 99
IV.3 Diagramme de cas d'utilisation : Vue du décideur 100
IV.4 Diagramme de classes 101
IV.5 Diagramme de Séquence : Évaluation des critères et des alternatives . 102
IV.6 Diagramme de Séquence : Exécution du processus de sélection 103
IV.7 Structure hiérarchique du problème de sélection de la localisation des centres de distribution dans un environnement certain 105
IV.8 Graphe des relations entre alternatives 113
IV.9 Résultats de l'analyse de sensibilité 116
IV.10 Structure hiérarchique du problème de sélection de la localisation des centres de distribution dans un environnement incertain 117
IV.11 Illustration des nombres flous triangulaires pour attribuer l'importance des critères 119
IV.12 Illustration des nombres flous triangulaires pour évaluer les alternatives potentielles 121
IV.13 Graphe des relations entre alternatives 130

Liste des tableaux

I.1 Identification des types de problématique 21

I.2 Modélisation des situations fondamentales caractéristiques des préférences dans la comparaison de deux alternatives 23

I.3 Situations et relations regroupées intervenant dans la modélisation des préférences relativement à deux alternatives 24

I.4 Principaux avantages et inconvénients des méthodes d'aide à la décision multi-attribut 32

II.1 Comparaison entre les différentes familles des méthodes proposées . . 57

III.1 Choix de méthode parmi la famille des méthodes ELECTRE 71

IV.1 Critères d'évaluation utilisés dans l'environnement certain 105

IV.2 Variables linguistiques de l'importance des critères 106

IV.3 Importance attribuée aux critères d'évaluation 107

IV.4 Matrice d'importance des critères d'évaluation 107

IV.5 Variables linguistiques pour l'évaluation des alternatives 108

IV.6 Matrice de décision 108

IV.7 Matrice de décision 109

IV.8 Résumé des relations de préférence J^+ 110

IV.9 Résumé des relations de préférence J^- 110

IV.10 Résumé des relations de préférence $J^=$ 110

IV.11 Résumé concernant les P_{ik+} 110

IV.12 Résumé concernant les P_{ik-} 111

IV.13 Résumé concernant les $P_{ik=}$ 111

IV.14 Résumé concernant les coefficients de concordance CI_{ik} 111
IV.15 Résumé concernant les coefficients de discordance DI_{ik} 112
IV.16 Analyse de sensibilité 115
IV.17 Critères d'évaluation utilisés dans l'environnement incertain 118
IV.18 Nombres flous triangulaires d'importance des critères 119
IV.19 Importance attribuée aux critères d'évaluation 120
IV.20 Matrice d'importance des critères d'évaluation 120
IV.21 Nombres flous triangulaires pour l'évaluation des alternatives 121
IV.22 Notes attribuées aux alternatives 122
IV.23 Matrice de décision floue 123
IV.24 Matrice de décision floue et normalisée 124
IV.25 Évaluation floue finale de chaque alternative 124
IV.26 Relations entre alternatives 126
IV.27 Résumé concernant l'ensemble J^- 127
IV.28 Résumé concernant l'ensemble $J^=$ 127
IV.29 Résumé concernant l'ensemble J^+ 127
IV.30 Résumé concernant l'ensemble P_{ik}^+ 128
IV.31Résumé concernant l'ensemble $P_{ik}^=$ 128
IV.32 Résumé concernant l'ensemble P_{ik}^- 128
IV.33 Résumé concernant les coefficients de concordance CI 128
IV.34 Résumé concernant les coefficients de discordance DI 129

Introduction générale

Contexte et problématique de la thèse

Au fil du temps, le trafic urbain devient de plus en plus dense. Ceci peut être expliqué, en partie, par l'énorme augmentation du transport routier des marchandises. Ce dernier représente environ 10% à 30% de la circulation routière mais aussi environ 40% de la pollution atmosphérique et sonore dans diverses villes. De ce fait, l'organisation de la circulation des marchandises est considérée comme l'un des problèmes stratégiques importants cherchant à mieux faire circuler les marchandises et, par conséquent, à améliorer voire optimiser le transport et la distribution des marchandises.

Concrètement, la circulation des marchandises s'appuie, essentiellement, sur des centres de distribution considérés comme des véritables pilotes du système de la logistique urbaine. En terme de conception des systèmes logistiques, un centre de distribution urbain est défini comme une plate-forme de groupage/dégroupage des marchandises, généralement situé à quelques kilomètres du centre-ville. Son objectif est la gestion du trafic des marchandises dans les zones denses. Aussi, il est considéré comme l'installation logistique liant l'usine à ses clients pour faciliter la circulation des marchandises. L'avantage principal d'un centre de distribution est la réduction du nombre de déplacements des véhicules et de kilomètres parcourus. Face à ces raisons, le choix d'une meilleure localisation des centres de distribution, sous divers critères (souvent conflictuels et contradictoires) parait une nécessité majeure en logistique urbaine.

De ce fait, l'application de l'aide à la décision pour ce problème de localisation face à un ensemble de critères au sein des organisations, nécessite une synergie d'efforts de plusieurs décideurs ayant différents intérêts, compétences et expériences afin que chacun d'eux mette à contribution son savoir-faire. D'ailleurs, c'est grâce à cette synergie que les décideurs peuvent atteindre des résultats supérieurs à ceux qu'ils auraient pu réaliser individuellement. Mais, le processus décisionnel humain ainsi que les comportements futurs du marché et des entreprises sont marqués par l'incertitude inhérente et l'imprécision.

C'est dans ce contexte d'aide à la décision que nous intervenons dans le cadre de cette thèse. Nous traitons, une problématique sur la sélection de la localisation des centres de distribution face à différents critères. D'une manière générale, nos travaux de recherche ont pour perspectives d'apporter des solutions aux problèmes de décision (de la sélection) de groupe, dans un environnement certain/incertain.

Contributions

Afin de mettre en évidence toutes ces contraintes nous proposons :

— Dans un environnement certain, une méthode multi-attribut et multi-décideur (MAADM) basée sur la méthode EELCTRE I. En effet, la méthode ELECTRE I remplit majoritairement les buts et les attentes du problème que nous traitons en choisissant une meilleure alternative parmi un ensemble limité d'alternatives potentielles face à des critères qualitatifs et quantitatifs. Ainsi, la localisation résultante de ce processus de décision, nous le ferons valider à la fois par le test de concordance et le test de non-discordance.

— Dans un environnement incertain, nous proposons une méthode floue multi-attribut et multi-décideur (FMAADM) basée sur notre première méthode (MAADM) et la théorie des ensembles flous. Cette dernière est particulièrement appréciée en raison de sa capacité à traiter l'incertitude, mais aussi à représenter et utiliser des connaissances imprécises, vagues et incertaines. Elle considère aussi les classes d'objets dont les frontières ne sont pas clairement déterminées.

Plan de la thèse

Le mémoire de thèse est structuré autour de quatre chapitres comme suit :

1. **Aide à la décision multi-critère : notions et méthodes** (Chapitre I). Ce premier chapitre présente une étude de la littérature concernant les notions et les méthodes de l'aide à la décision multi-critère. À travers cette étude, nous présentons les avantages et les inconvénients de certaines méthodes d'aide à la décision multi-attribut sur lesquelles se sont basées nos contributions.
2. **Méthodes et critères d'évaluation liés à la sélection de la localisation des centres de distribution** (Chapitre II). Ce deuxième chapitre discute des travaux existants pour la résolution du problème de sélection de la localisation des centres de distribution dans un environnement certain/incertain. A travers ces travaux, nous proposons une classification des méthodes existantes et nous explicitons leurs principales limites ayant orienté nos propositions de travaux de recherche.
3. **Méthodes d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur pour résoudre le problème de sélection** (Chapitre III). Ce troisième chapitre est consacré à nos contributions. En effet, nous proposons dans ce chapitre une méthode d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur (MAADM) et une méthode floue d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur (FMAADM).
4. **Étude expérimentales et analyse des résultats** (Chapitre IV). Ce quatrième chapitre détaille deux études de cas afin de démontrer la validation expérimentale et opérationnelle de nos méthodes. À partir des résultats trouvés une analyse de sensibilité est présentée et discutée pour montrer la fiabilité des algorithmes proposés.

Nous terminons ce rapport par une conclusion générale et des perspectives pour des travaux futurs de recherche relatifs au problème.

Chapitre I

Aide à la décision multi-critère : Notions et méthodes

Sommaire

I.1 Introduction **6**

I.2 Décision et aide à la décision **6**

I.2.1 Notion de la décision 7

I.2.2 Aide à la décision : définitions, approches et processus . . 8

I.3 Aide à la décision multi-critère **14**

I.3.1 Classification des problématiques de décision 16

I.3.2 Processus d'aide à la décision multi-critère 21

I.4 Classification des méthodes d'aide à la décision multi-critère **25**

I.4.1 Étude des méthodes d'aide à la décision multi-objectif . . 25

I.4.2 Étude des méthodes d'aide à la décision multi-attribut . . 26

I.5 Conclusion **34**

I.1 Introduction

Les méthodes d'aide à la décision multi-critère sont largement utilisées pour résoudre les problèmes de la sélection dans la plupart des domaines (du système de planification des ressources d'entreprise [Efe, 2016], du service cloud [Lee et Seo, 2016], des partenaires de collaboration et des scénarios agricole [Awasthi *et al.*, 2016], etc.). Elles aident les décideurs à considérer tous les critères du problème en utilisant un processus décisionnel rationnel et efficace.

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux méthodes d'aide à la décision multi-critère utilisées dans la démarche constituant la base de nos deux propositions qui seront présentées au chapitre III. D'abord dans la section I.2, nous présentons la notion de la décision, ensuite, nous détaillons les définitions, les approches et le processus d'aide à la décision en termes de notions, d'étapes du déroulement du processus d'aide à la décision et de classement des approches existantes dans la littérature. Ensuite, à la section I.3, nous nous explicitons plus en détail la décision multi-critère, ses définitions, la classification des différentes problématiques de décision multi-critère et les étapes du processus d'aide à la décision multi-critère. Enfin, à la section I.4, nous discutons les méthodes d'aide à la décision multi-critère classées en deux catégories de méthodes, notamment les méthodes d'aide à la décision multi-objectif et les méthodes d'aide à la décision multi-attribut. Ainsi, nous détaillons certaines méthodes de cette dernière catégorie de méthodes sur laquelle se basent nos deux propositions de résolution du problème de sélection dans un environnement certain et incertain.

I.2 Décision et aide à la décision

L'aide à la décision est généralement sollicitée par les industriels et les chercheurs dans le cas où ils sont confrontés à des problèmes complexes. Nous pouvons citer ici l'exemple des responsables d'une entreprise qui sont face à un problème de sélection de la localisation d'un nouveau centre de distribution parmi un ensemble de localisations potentielles. Nous supposons que pour chaque localisation potentielle les

conséquences de la décision sont étudiées avec une précision raisonnable. Il reste à choisir des compromis entre les objectifs de la décision. Ce type de problème induit, donc, une décision (ou un ensemble de décisions) lourd(e) de conséquences.

I.2.1 Notion de la décision

[Mintzberg, 1979] considère qu'une décision, individuelle ou résultante d'un groupe de travail, peut être définie comme l'engagement dans une action, c'est-à-dire une intention explicite d'agir.

Dans le même ordre d'idée, [Lévine et Pomerol, 1990] estime que la décision est une action prise pour faire face à une difficulté ou répondre à un changement d'environnement, c'est-à-dire résoudre un problème individuel ou organisationnel.

Selon [Roy et Bouyssou, 1993], la décision est le fait que des acteurs exercent librement un choix entre plusieurs possibilités d'actions à un moment donné dans le temps. Même si, en dernier ressort, la responsabilité d'une décision incombe à un individu clairement identifié celle-ci reste souvent la résultante d'interactions entre de multiples acteurs, au cours d'un processus de décision, qui sont, [Sfez, 1976] [Roy et Bouyssou, 1993] :

— Les intervenants : ce sont ceux qui, par leurs interventions, conditionnent directement la décision en fonction du système de valeurs dont ils sont porteurs.

— Les agis (les administrés, les contribuables, etc.) **:** ce sont ceux qui, de façon normalement passive, subissent les conséquences de la décision. Cette dernière est seulement censée tenir compte de leurs préférences.

[Simon, 1977] répartit les décisions sur une échelle qui va du moins normalisée au plus normalisée :

— Une décision n'est bien normalisée que quand un processus connu et explicitable existe et permettant de traiter les informations entrantes dans le système de traitement de l'information.

— Une décision est mal ou non-normalisée quand elle est prise par une procédure non-programmée ou peu programmée, ce qui ne veut pas dire qu'elle n'est pas programmable.

I.2.2 Aide à la décision : définitions, approches et processus

Selon [Roy et Bouyssou, 1993], l'aide à la décision est l'activité de l'homme d'étude [Roy, 1985] (appelé aussi l'analyste [Tsoukiàs, 2008]) qui aide à :

— obtenir, d'un côté, des éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant (appelé aussi le décideur [Mammeri, 2013]) dans un processus de décision et, d'un autre côté, des éléments concourants à éclairer la décision et normalement à la prescrire,

— favoriser, d'une part, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus et, d'autre part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels un intervenant se trouve placé.

tout en prenant appui sur des modèles d'évaluation clairement explicités, mais non nécessairement complètement formalisés.

Dans ce sens, [Roy, 2013] soutient l'idée que l'aide à la décision est un processus qui utilise un ensemble d'informations disponibles, à un instant donné, afin de formuler un problème et d'aboutir à une décision sur un objet précis.

[Roy et Bouyssou, 1993] soulignent que l'aide à la décision ne relève que de façon très partielle de la recherche d'une vérité. Les théories ou, plus simplement, les méthodologies, les concepts, les modèles, les techniques sur lesquels la décision s'appuie ont, le plus souvent, une ambition différente : raisonner le changement que prépare un processus de décision de façon à accroître sa cohérence avec les objectifs et le système de valeurs de celui pour qui ou au nom de qui l'aide à la décision s'exerce.

Selon [Deparis, 2012], le but de l'aide à la décision est de formaliser un problème afin de clarifier la manière dont les compromis seront effectués et d'aider le décideur à structurer ses préférences.

[Roy, 1989] notent que les préférences du décideur sont essentielles dans la vie des individus aussi bien que des collectivités. Ainsi, ils soulignent que leurs modélisations constituent une étape indispensable dans plusieurs disciplines comme l'économie, la recherche opérationnelle et la théorie de décision, etc.

[Deparis, 2012] admet que l'aide à la décision permet de s'assurer, d'une part, que l'action choisie soit optimale compte tenu des préférences du décideur et, d'autre part, que la procédure de décision respecte certaines normes de rationalité.

I.2.2.1 Classement des approches de l'aide à la décision

L'aide à la décision est une activité fondée sur des modèles d'évaluation représentant, de manière explicite ou formelle, la réalité. Dans la littérature, il existe plusieurs approches basées sur ces modèles dont trois sont cités ci-après [Deparis, 2012] :

— **Approche normative :** Étant donné les préférences du décideur, quelle décision est optimale ? Quelles règles devraient suivre un agent rationnel ? Quels modèles de décision permettent de suivre ces règles ?

— **Approche descriptive :** Comment les décideurs réels se comportent-ils ? Comment utilisent-ils leurs préférences lorsqu'ils prennent une décision ? Comment construisent-ils un modèle rendant compte de ces observations ?

— **Approche perspective :** Comment aider un décideur qui aspire à faire un choix relationnel malgré ses limitations cognitives ? Comment recueillir ses préférences ? Comment bâtir des recommandations pour qu'il prenne une décision conforme à ses points de vue ?

I.2.2.2 Processus de décision : notions, étapes et classement

Selon [Roy et Bouyssou, 1993], le concept de décision est difficilement séparable de celui du processus de décision. Dans la littérature, il est défini comme étant un espace d'interaction, pouvant évoluer dans l'espace et dans le temps, dans lequel tous les intervenants partagent des préoccupations qui sont parfois contradictoires [Tsoukiàs, 2008].

L'existence d'un tel espace d'interaction est justifiée par la présence d'un objectif (préoccupation) final. Dans ce sens, [Mammeri, 2013] ajoute qu'un processus de décision est évolutif. Ceci suppose que la préoccupation finale peut l'être également.

Le processus d'aide à la décision est élaboré par l'analyste et par au moins un intervenant (décideur) qui ont pour objectif de répondre, de manière formelle par

le biais d'un modèle de décision, aux préoccupations correspondant à un problème posé [Mammeri, 2013]. Selon [Tsoukiàs, 2008], ce modèle dépend d'une part des connaissances de l'analyste et d'autre part des connaissances et des informations fournies par le décideur.

Le processus d'aide à la décision se décompose, généralement, selon les quatre étapes suivantes [Mammeri, 2013] :

1. **Représentation du problème :**

   Cette étape vise à identifier :

   — les décideurs et les analystes concernés par la décision,

   — leurs rôles au sein du processus,

   — les préoccupations de chaque décideur par rapport au problème posé,

   — l'importance de chaque préoccupation ainsi que les éventuels liens entre elles.

2. **Formulation du problème :**

   Au niveau de cette étape, le décideur va identifier l'ensemble des actions possibles (sur quoi va porter la décision) ou l'objet de la décision.

   D'après [Collette et Siarry, 2011], une action désigne un objet, une décision, un candidat ou autre chose encore. C'est sur cette action que va s'opérer un traitement de sélection, du tri ou bien du classement.

   Dans notre travail de recherche, nous considérons l'ensemble des actions comme l'ensemble des alternatives des localisations des centres de distribution, parmi lesquelles le décideur sélectionne la meilleure alternative.

   [Tsoukiàs, 2008] propose trois types de traitement pouvant être effectués sur l'ensemble des alternatives :

   — chercher uniquement à définir l'ensemble des alternatives de manière formelle sans évaluation (e.g. le cas du problème de satisfaction des clauses logiques),

   — construire un modèle pour décrire un sous-ensemble d'alternatives dans un ensemble de points de vue dans le cas d'une approche descriptive (e.g. l'apprentissage en statistique et en intelligence artificielle),

— partitionner l'ensemble des alternatives selon la problématique à traiter (la sélection, le tri, le rangement ou bien la description). Ces quatre problématiques sont détaillées dans la section I.3.

3. **Construction du modèle d'évaluation :**

   Lors de cette troisième étape, le décideur cherche à construire le modèle d'évaluation sur lequel il va se baser pour répondre au problème identifié et construire sa recommandation. Pour cela, la construction des dimensions (permettant de caractériser l'ensemble des alternatives), des critères (permettant d'évaluer l'ensemble des alternatives) et des méthodes ou des procédures (permettant d'effectuer le traitement souhaité sur l'ensemble des alternatives) est nécessaire, mais pas forcément tous à la fois. Cela dépend du traitement effectué sur l'ensemble des alternatives. Par exemple, ce n'est pas utile de construire un modèle (ou des modèles) si le traitement vise uniquement à définir l'ensemble des alternatives.

4. **Construction de la recommandation finale :**

   Bien que la méthode d'évaluation peut fournir un résultat cohérent avec le modèle d'évaluation, cela ne veut pas dire qu'il l'est avec les préoccupations des décideurs. Ceci oblige, avant de fournir une telle recommandation, de faire appel à l'analyste afin de :

   — s'assurer, via une analyse de sensibilité, que le résultat fourni n'est pas trop sensible à des variations jugées non significatives des données utilisées pour la construction du modèle d'évaluation.

   — interpréter le résultat en prenant en considération des hypothèses sur les données, le modèle d'évaluation et l'évolution du processus de décision.

[Kamissoko, 2013] distingue trois catégories du processus d'aide à la décision selon la succession des phases de décision, à savoir le processus d'aide à la décision linéaire (figure I.1), le processus d'aide à la décision cyclique (figure I.2) et le processus d'aide à la décision mixte (figure I.3).

— **Processus de décision linéaire** : ce processus se base sur des étapes séquentielles. La figure I.1 de [Lavergne, 1983] présente ce processus décrit par [Lavergne, 1983]. Il est adapté aux problèmes d'aide à la décision avec

des enjeux mineurs et un contexte avec une certaine complexité. L'inconvénient de ce processus est le manque de toute boucle de rétroaction.

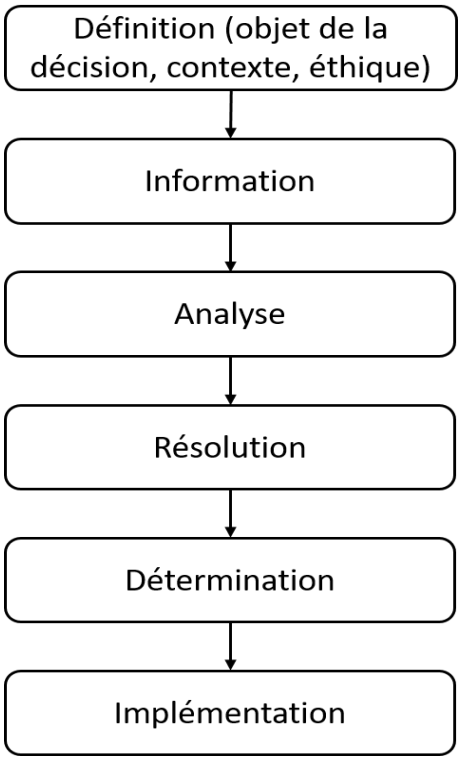


FIGURE I.1: Processus de décision linaire

— **Processus de décision cyclique** : ce processus est présenté sous forme de cycle. La figure I.2 de [Courbon, 1982] présente un exemple de ce processus [Courbon, 1982]. Il est approprié pour traiter les problèmes de complexité moyenne. Dans ce processus, il est possible de revenir à la phase source d'erreur après un temps de cycle dont la durée varie selon la situation. La principale difficulté pour l'analyste est de réduire cette durée.

— **Processus de décision mixte** : ce processus est une combinaison du processus de décision linéaire et cyclique. La figure I.3 de [Simon, 1977] montre un exemple de ce processus. [Stal-Le Cardinal, 2000] soutient l'idée que la décision est un processus inscrit dans un délai appelé délai de la décision. Ce type de processus est adapté à de nombreux problèmes dont la complexité diffère.

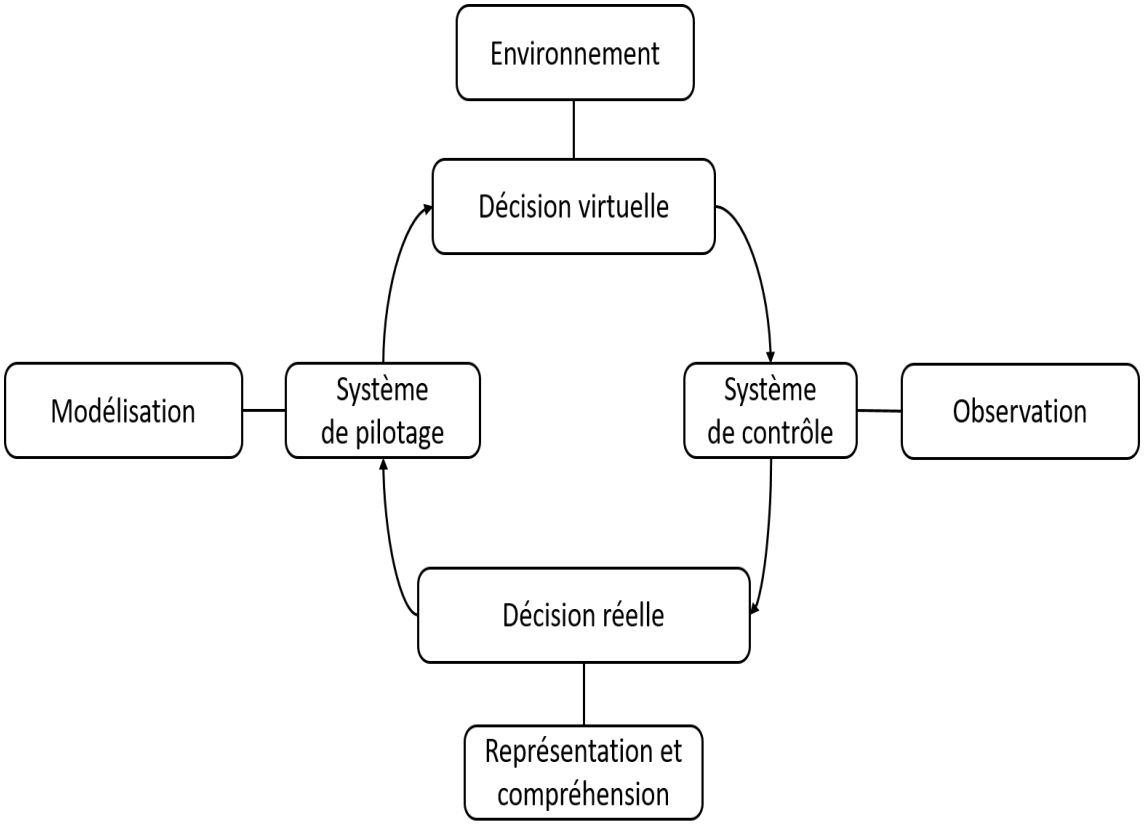


FIGURE I.2: Processus de décision cyclique

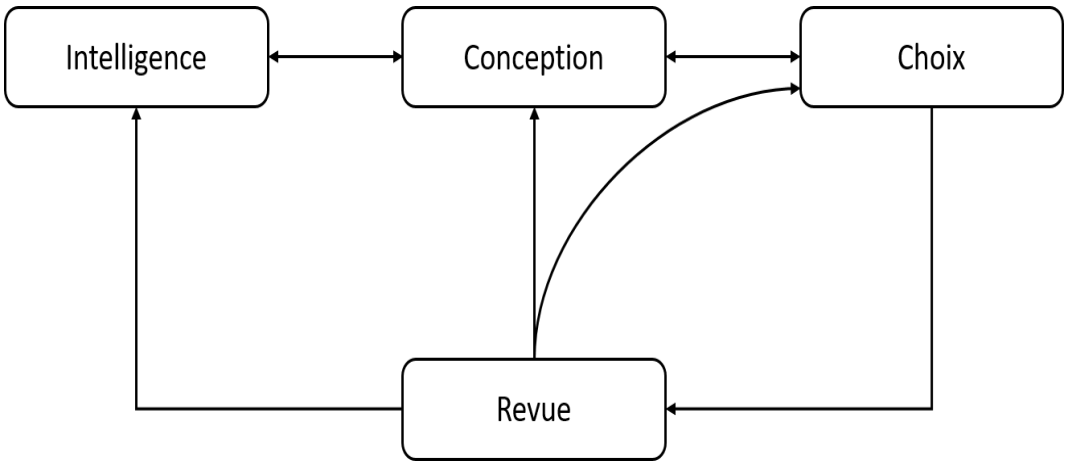


FIGURE I.3: Processus de décision mixte

I.3 Aide à la décision multi-critère

[Maystre *et al.*, 1994] considèrent que l'aide à la décision multi-critère est une analyse ayant pour but d'expliciter une famille cohérente de critères permettant d'appréhender les différentes conséquences d'une alternative.

[Vincke, 1992] indique que l'aide à la décision multi-critère vise à fournir à un décideur des outils lui permettant de progresser dans la résolution du problème de décision où plusieurs points de vue, souvent contradictoires, doivent être pris en compte.

[Pohekar et Ramachandran, 2006] ajoutent que l'aide multi-critère à la décision est développée pour traiter différentes problématiques de décision (choix, tri, description et rangement, etc.) tout en tenant compte d'un ensemble de critères (attributs), souvent conflictuels et non-commensurables et cherchant à modéliser au mieux les préférences et les valeurs du ou des décideurs.

Selon [Mammeri, 2013], un critère est défini comme une dimension ou plus généralement une agrégation de dimensions traduisant un même point de vue et permettant d'évaluer l'ensemble des alternatives sur ce point de vue.

[Roy, 1989] ajoutent qu'un critère est une fonction sur l'ensemble des alternatives qui prend ses valeurs dans un ensemble totalement ordonné et qui représente les préférences de l'utilisateur selon un point de vue.

Dans le processus de décision, la présence d'un ensemble de critères, souvent, conflictuels et contradictoires, bien qu'elle donne au décideur la possibilité d'exprimer ses préférences, elle crée une source de conflit. Par conséquent, la prise de décision dans un contexte multi-critère est complexe et difficile.

Nous donnons l'exemple d'un décideur confronté à un problème de sélection d'une localisation pour implanter un nouveau centre de distribution face à différents critères, notamment la connectivité de l'emplacement avec différents modes du transport (à maximiser) et le coût du terrain (à minimiser). Satisfaire ces deux critères à la fois n'est pas toujours évident. La solution est donc de répondre à chaque objectif à un niveau déterminé.

Il existe plusieurs types de critères dont quatre sont cités ci-après :

— **Le vrai-critère :** nous parlons de vrai-critère (figure I.4 de [Ayadi, 2010]) lorsque l'alternative qui reçoit la meilleure note sera préférée à l'autre. Il n'y a indifférence que si les deux notes sont égales .

— **Le quasi-critère :** nous parlons de quasi-critère (figure I.5 de [Ayadi, 2010]) lorsqu'il y a une plage d'indifférence $[-q, q]$. Il y a indifférence entre les alternatives et lorsque l'écart de leur évaluation tombe dans la plage $[-q, q]$.

— **Le pré-critère :** un pré-critère (figure I.6 de [Ayadi, 2010]) est un vrai critère auquel nous avons introduit une plage de préférence faible.

— **Le pseudo-critère :** un pseudo-critère (figure I.7) est un critère dont le pouvoir discriminant est caractérisé par deux seuils : un seuil d'indifférence et un seuil de préférence [Jacquet-Lagrèze *et al.*, 1980].

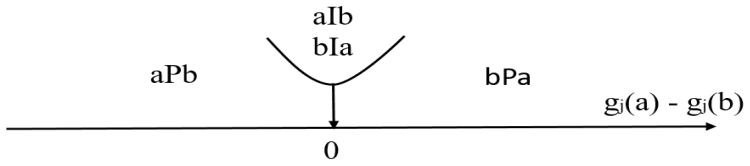


FIGURE I.4: Préférence entre les alternatives et selon le vrai critère où P est la préférence stricte, I représente l'indifférence, a et b sont deux alternatives.

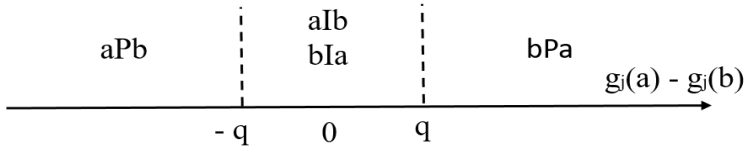


FIGURE I.5: Préférence entre les alternatives et selon le quasi-critère où P est la préférence stricte, I représente l'indifférence, a et b sont deux alternatives.

Dans le cas d'une décision multi-critère, l'objet de la décision fait référence à un ensemble d'alternatives. [Roy, 1985] différencie les alternatives réalisables de celles qui ne les sont pas. Il souligne qu'une alternative potentielle est une alternative dont la mise en œuvre en pratique est envisageable.

En général, dans l'aide à la décision multi-critère, il n'existe pas une décision qui soit la meilleure, simultanément, pour tous les points de vue, autrement dit pour tous

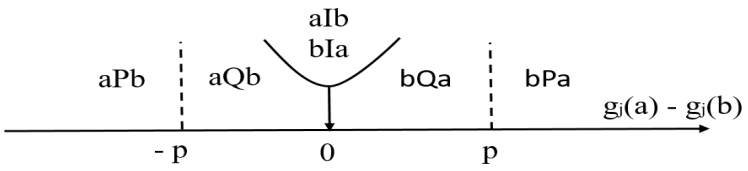


FIGURE I.6: Préférence entre les alternatives et selon le pré-critère où P est la préférence stricte, I représente l'indifférence, Q est la préférence faible, a et b sont deux alternatives.

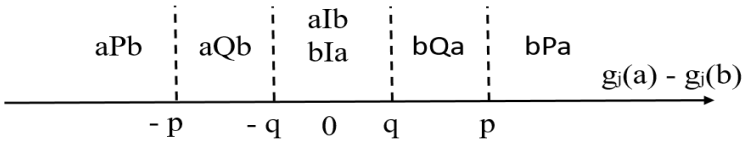


FIGURE I.7: Préférence entre les alternatives et selon le pseudo-critère où P est la préférence stricte, I représente l'indifférence, Q est la préférence faible, a et b sont deux alternatives.

les critères. Le mot « optimisation » n'a donc plus de sens dans un contexte multi-critère. Contrairement aux techniques classiques de la Recherche Opérationnelle, les méthodes multi-critère ne fournissent pas de solutions « objectivement les meilleures » [Roy, 1989].

I.3.1 Classification des problématiques de décision

Les problématiques de décision peuvent être perçues comme étant une orientation de l'investigation que nous adoptons pour un problème donné. Ainsi, elles expriment les termes dans lesquels le décideur pose le problème et traduit le type de la prescription qu'il souhaite obtenir [Ayadi, 2010]. [Roy, 2013] distingue quatre problématiques : la problématique du choix, du tri, du rangement et de prescription. La table I.1 de [Roy, 1985] et [Roy et Bouyssou, 1993] présente un récapitulatif des spécificités de ces problématiques.

Nous rappelons les définitions des relations d'ordre et d'équivalence permettant de classer les alternatives selon un ensemble de critères, fournies par [Collette et Siarry, 2011] :

— **Relation d'équivalence :**

Une relation binaire R (relation entre deux éléments) définie sur un ensemble A est une relation d'équivalence si cette relation est :

— réflexive : $\forall\ x \in A,\ x\ R\ x$

— symétrique : $\forall\ (x, y) \in A \times A,\ x\ R\ y \Rightarrow y\ R\ x$

— transitive : $\forall\ (x, y, z) \in A \times A \times A,\ x\ R\ y$ et $y\ R\ z \Rightarrow x\ R\ z$

Cette relation peut être créée dans l'objectif de rechercher la meilleure alternative parmi un ensemble d'alternatives ou définir un préordre sur cet ensemble d'alternatives.

— **Relation d'ordre :**

Une relation binaire R définie sur un ensemble A est une relation d'ordre si cette relation est :

— réflexive : $\forall\ x \in A,\ x\ R\ x$

— antisymétrique : $\forall\ (x, y) \in A \times A,\ x\ R\ y$ et $y\ R\ x \Rightarrow x = y$

— transitive : $\forall\ (x, y, z) \in A \times A \times A,\ x\ R\ y$ et $y\ R\ z \Rightarrow x\ R\ z$

En fonction de la problématique à traiter, la relation d'ordre peut être construite dans le but d'effectuer un classement d'alternatives ou définir un ordre sur l'ensemble d'alternatives.

À partir de ces relations de comparaison (relations de préférences), les éléments de l'ensemble sur lequel se font les comparaisons sont ordonnés [Collette et Siarry, 2011] :

— **Préordre :** un préordre est une relation réflexive et transitive.

— **Ordre :** un ordre est un préordre antisymétrique.

— **Préordre total :** un préordre total est une relation de préordre pour laquelle tous les éléments d'un ensemble peuvent être mis en relation. Dans ce cas, l'incomparabilité entre deux éléments n'est pas permise.

— **Préordre partiel :** un préodre partiel est une relation de préordre pour laquelle certains éléments d'un ensemble ne peuvent pas être mis en relation. Pour le préodre partiel, l'incomparabilité entre deux éléments est autorisée.

I.3.1.1 Problématique du choix (P_α)

Cette problématique (figure I.8 de [Mousseau, 1993]) consiste à sélectionner un sous-ensemble aussi restreint que possible de l'ensemble des alternatives. Ce sous-ensemble contient les meilleures alternatives et les alternatives qui sont équivalentes ou incomparables entre elles. La procédure de sélection utilisée consiste donc à éliminer les mauvaises alternatives en les comparant. L'idéal est d'obtenir une seule et meilleure alternative. Mais à cause de la nature conflictuelle des critères, il est préférable de fournir au décideur quelques alternatives qui représentent différentes variantes de la meilleure alternative [Costa, 1996] [Ayadi, 2010] [Mammeri, 2013].

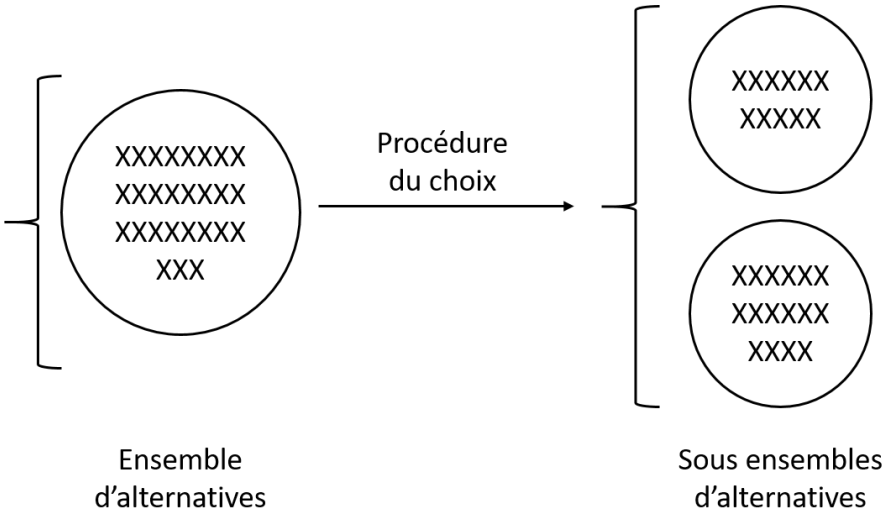


FIGURE I.8: Problématique du choix

I.3.1.2 Problématique du tri (P_β)

Elle consiste à affecter chaque alternative à une catégorie jugée appropriée parmi un ensemble de catégories prédéfinies (figure I.9 de [Mousseau, 1993]). Cette formulation est adéquate lorsque le problème de décision consiste à examiner chaque alternative indépendamment des autres dans le but de proposer une recommandation parmi un ensemble des recommandations spécifiées en avance. Chaque recommandation peut être associée avec une catégorie. La procédure du tri doit être définie de telle sorte que chaque alternative est affectée à une et seule catégorie. Le choix de cette catégorie est justifié par le type du jugement que nous voudrions porter sur

les alternatives et par les traitements que nous les souhaiterions faire [Mousseau, 1993] [Ayadi, 2010] [Mammeri, 2013].

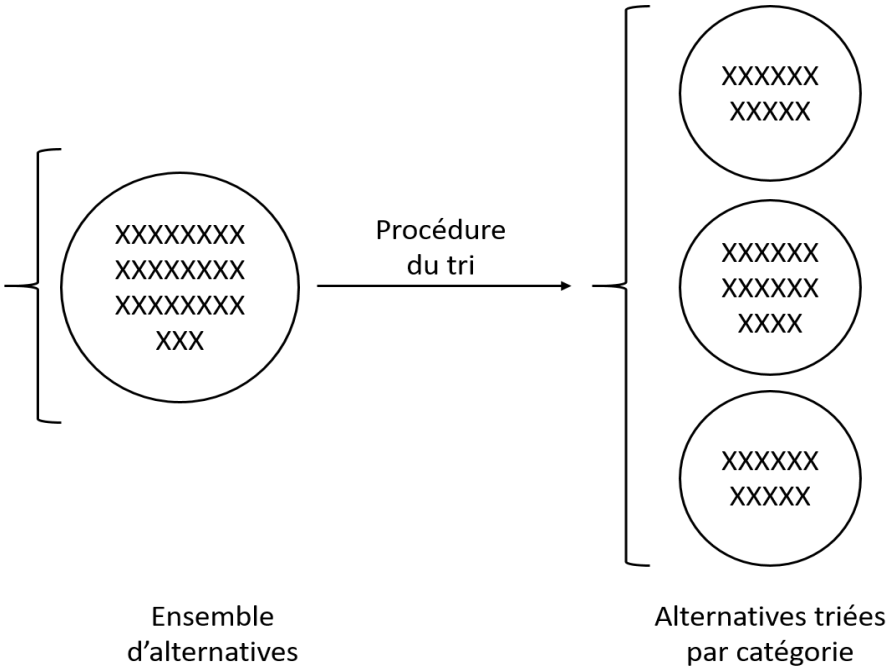


FIGURE I.9: Problématique du tri

I.3.1.3 Problématique du rangement (P_γ)

Cette problématique (figure I.10 de [Mousseau, 1993]) vise à ranger l'ensemble d'alternatives lorsque elles sont à différencier selon leur intérêt relatif en allant de la meilleure alternative à la moins bonne. L'idéal est d'obtenir un ordre complet. Mais, étant donné l'imprécision, l'existence de systèmes de valeurs différents, et la nature conflictuelle des critères, il est souvent plus réaliste de présenter au décideur un ordre partiel. Formellement, la prescription est un ordre partiel, une relation transitive définie sur un ensemble ou un sous-ensemble d'alternatives [Mousseau, 1993] [Ayadi, 2010].

I.3.1.4 Problématique de description (P_σ)

Cette problématique (figure I.11 de [Ayadi, 2010]) consiste à décrire les alternatives et leurs conséquences et non pas à les prescrire comme c'est le cas avec

les trois autres problématiques précédentes. La procédure d'investigation est alors cognitive [Roy, 1985].

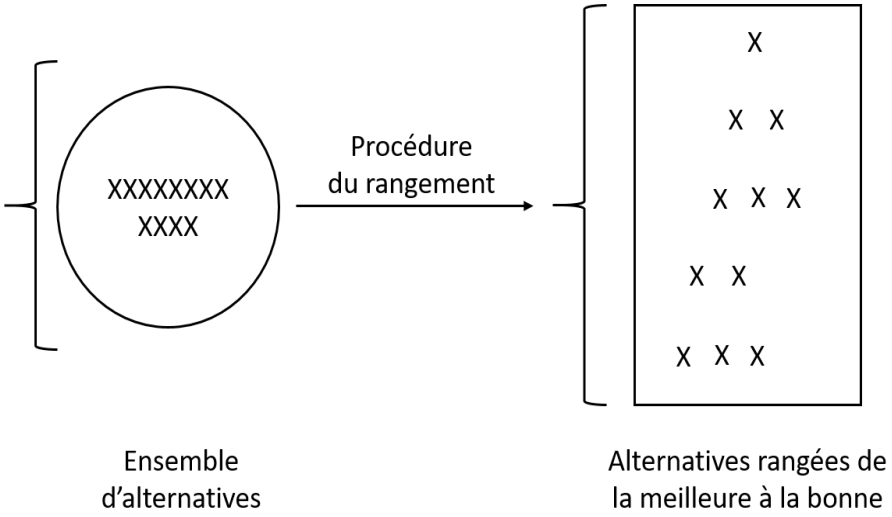


FIGURE I.10: Problématique du rangement

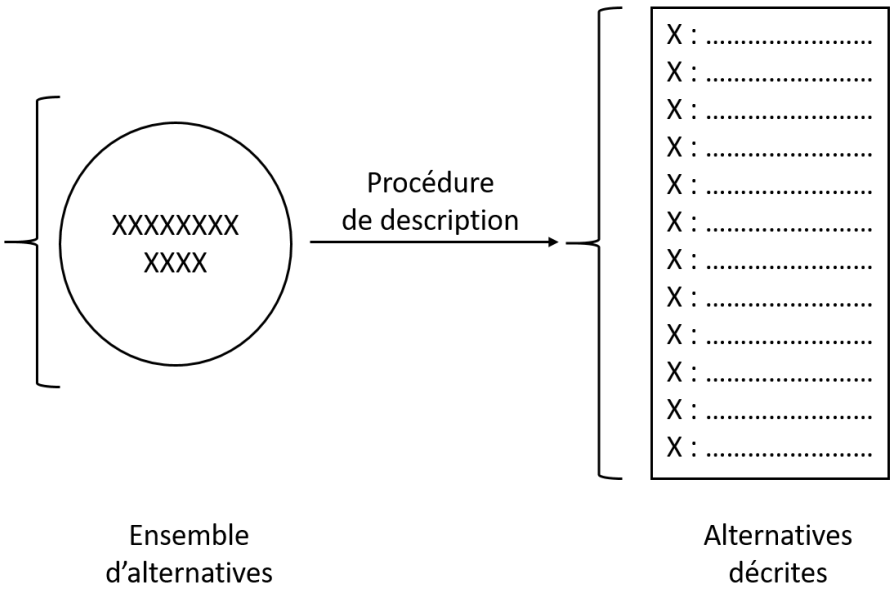


FIGURE I.11: Problématique de description

TABLE I.1: Identification des types de problématique

	Procédure d'investigation	**Prescription**	**Objectif**	**Résultat**
P_α	Sélection	Sous-ensemble d'alternatives	Sélectionner un sous-ensemble, contenant les meilleures alternatives, aussi restreint que possible en vue d'un choix final d'une seule action	Un choix ou une procédure de sélection
P_β	Segmentation	Partition d'alternative	Affecter chaque alternative à une et une seule des catégories. Ces dernières sont définies selon de normes ayant trait à la suite à donner aux alternatives qu'elles sont destinées à recevoir	Un tri ou une procédure d'affectation
P_γ	Classement	Ordre partiel sur l'ensemble des alternatives	Ranger les alternatives en les regroupant toutes ou en partie (les plus satisfaisantes) des alternatives en classes d'équivalence. Ces classes sont ordonnées, de façon complète ou partielle, conformément aux préférences	Un rangement ou une procédure de classement
P_δ	Cognitive	Aucune prescription	Décrire les alternatives et leurs conséquences dans un langage approprié	Une description ou une procédure cognitive

I.3.2 Processus d'aide à la décision multi-critère

Le processus d'aide à la décision multi-critère (figure I.12 de [Nafi et Werey, 2009]) se compose de quatre étapes fondamentales qui sont les suivantes :

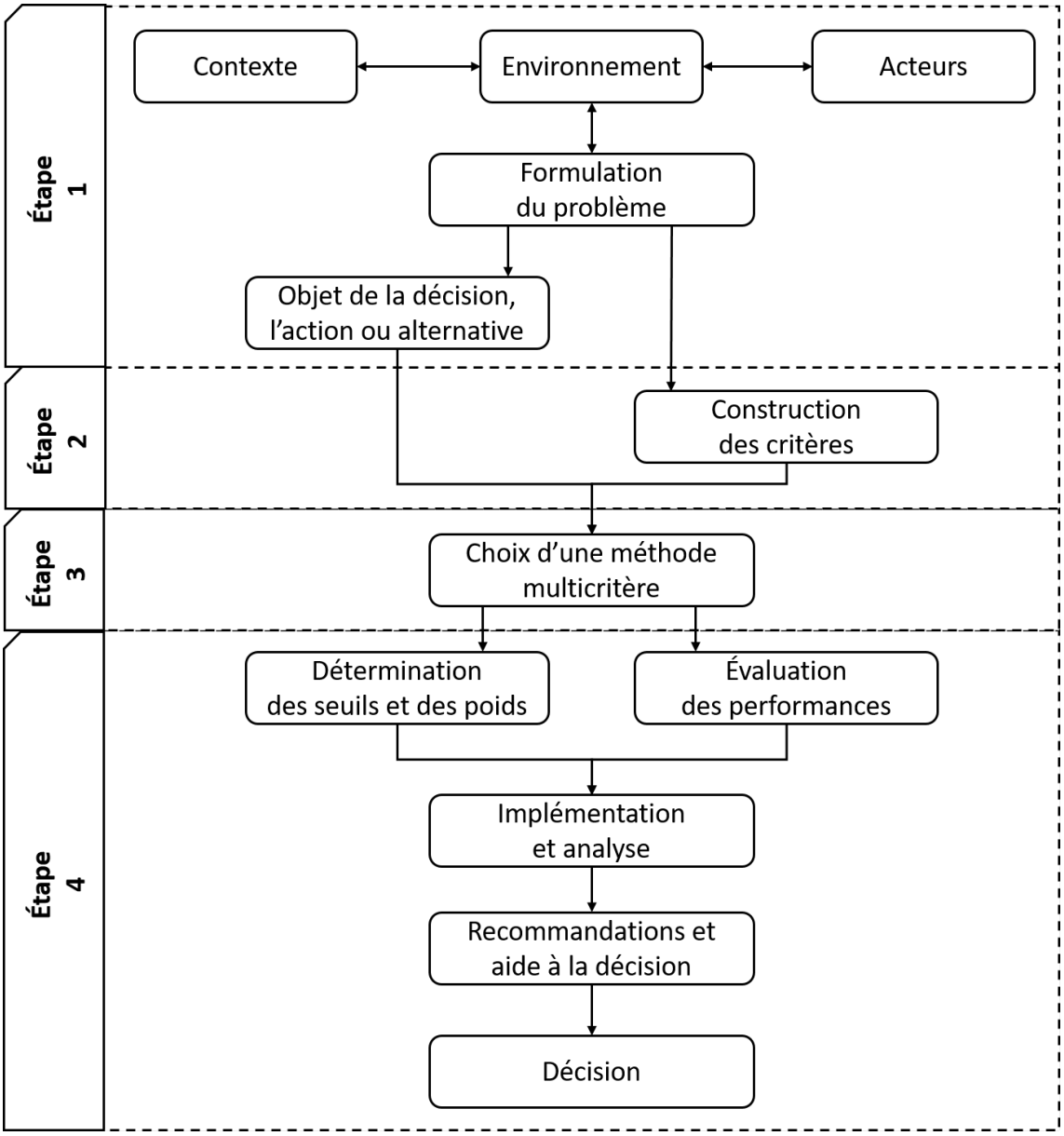


FIGURE I.12: Processus de décision multi-critère

1. **Étape 1. Définition du problème et de l'objet de la décision :**

   La définition du problème repose sur la définition de la nature du problème à traiter en le formulant soit en une problématique du choix, du tri, du rangement ou bien de description. Pour la détermination de l'objet de la décision, cela consiste à identifier les alternatives potentielles sur lesquelles va porter la décision.

2. **Étape 2. Analyse des conséquences et détermination des critères :**

   Lors de cette étape, il faut identifier et mesurer les conséquences des alterna-

tives. Une alternative a, le plus souvent, plusieurs conséquences en fonction d'un critère donné. La table I.2 de [Jacquet-Lagrèze *et al.*, 1980] récapitule les différentes situations possibles lors de la comparaison entre deux alternatives.

Pour la construction des critères, il s'agit d'identifier les enjeux et la nature des conséquences possibles sur les alternatives potentielles. Ces critères nécessitent une évaluation de la contribution et l'influence de chaque critère dans la décision finale. Ceci est traduit par la pondération des critères.

TABLE I.2: Modélisation des situations fondamentales caractéristiques des préférences dans la comparaison de deux alternatives

Situation	**Définition**	**Relation binaire**
Indifférence	Elle correspond à l'existence de raisons claires et positives qui justifient une équivalence entre deux alternatives.	I : relation symétrique (réflexive)
Préférence stricte	Elle correspond à l'existence de raisons claires et positives qui justifient une préférence significative en faveur de l'une (identifiée) des deux alternatives.	P : relation asymétrique (irréflexive)
Préférence faible	Elle correspond à l'existence de raisons claires et positives qui infirment une préférence stricte en faveur de l'une (identifiée) des deux alternatives. Par contre, ces raisons sont insuffisantes pour en déduire soit une préférence stricte en faveur de l'autre, soit une indifférence entre ces deux alternatives.	Q : relation asymétrique (irréflexive)
Incomparabilité	Elle correspond à l'existence de raisons claires et positives justifiant l'une des trois situations précédentes.	R : relation symétrique (irréflexive)

3. **Étape 3. Choix d'une méthode d'aide à la décision multi-critère :**

   Le choix d'une méthode d'aide à la décision multi-critère dépend du type du problème posé. Nous discutons dans la section I.4 certaines de ces méthodes.

4. **Étape 4. Performance des alternatives :**

   Quand l'analyse des conséquences des alternatives potentielles est basée sur plusieurs critères, c'est l'analyse multi-critère qui donne une réponse au problème posé par l'utilisation par exemple du seuil de préférence, d'indifférence et de veto dans certaines méthodes.

   Selon [Jacquet-Lagrèze *et al.*, 1980], il existe différentes situations et relations intervenant dans la modélisation des préférences relativement à deux alternatives. Celles-ci sont au nombre de cinq et leurs définitions figurent à la table I.3.

TABLE I.3: Situations et relations regroupées intervenant dans la modélisation des préférences relativement à deux alternatives

Situation	**Définition**
Non préférence	Elle correspond à l'absence de raisons claires et positives qui justifient une préférence stricte ou une préférence faible en faveur de l'une quelconque des deux alternatives et regroupe par conséquent, sans possibilité de les différencier, les situations d'indifférence et d'incomparabilité.
Préférence (au sens large)	Elle correspond à l'existence de raisons claires et positives qui justifient une préférence stricte ou une préférence faible en faveur de l'une (identifiée) des deux alternatives et regroupe par conséquent, sans possibilité de les différencier, les situations de préférences strictes et de préférences faibles.
Présomption de préférence	Elle correspond à l'existence de raisons claires et positives qui justifient la préférence faible (si faible soit-elle) en faveur de l'une (identifiée) des deux alternatives ou tout simplement l'indifférence entre elles deux, mais sans qu'aucune séparation significative ne soit établie entre les situations de préférence faible et d'indifférence.
K-préférence	Elle correspond soit à l'existence de raisons claires et positives qui justifient la préférence stricte en faveur de l'une des deux alternatives, soit à l'incomparabilité de ces deux alternatives, mais sans qu'aucune séparation significative ne soit établie entre cette dernière situation et celle de préférence stricte.
Surclassement	Elle correspond à l'existence de raisons claires et positives qui justifient soit une préférence stricte, soit une présomption de préférence en faveur de l'une (identifiée) des deux alternatives, mais sans qu'aucune séparation significative ne soit établie entre les situations de préférences strictes, de préférences faibles et d'indifférences.

I.4 Classification des méthodes d'aide à la décision multi-critère

[Farahani *et al.*, 2010] soulignent que l'aide à la décision multi-critère est une combinaison de deux familles d'aide à la décision, notamment l'aide à la décision multi-attribut et l'aide à la décision multi-objectif. Aussi, ils présentent la classification des problèmes d'aide à la décision au sujet de la localisation multi-critère comme la montre la figure I.13.

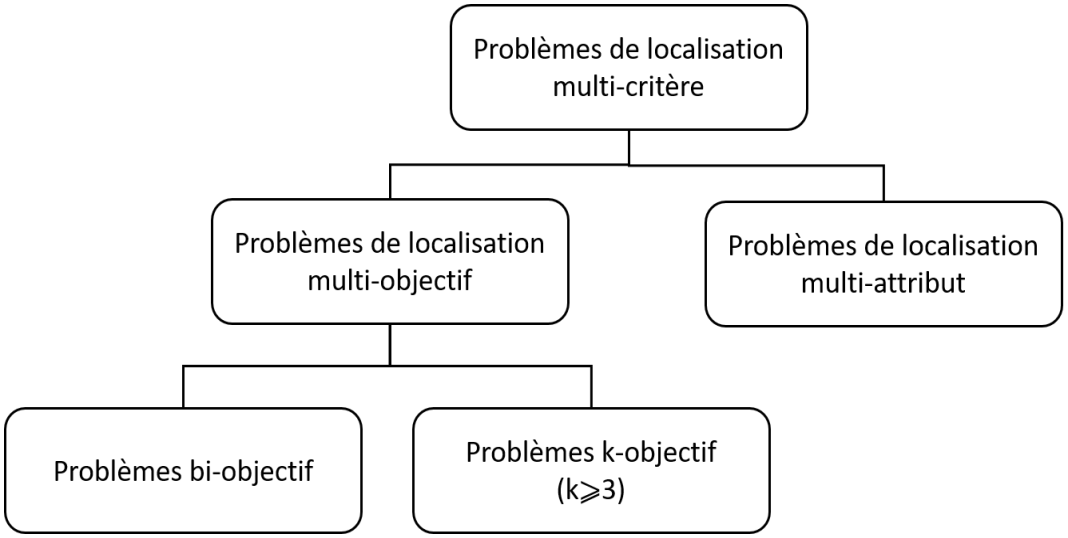


FIGURE I.13: Classification des problèmes de localisation multi-critère

Dans le reste de cette section, d'abord, nous décrivons chaque famille des méthodes d'aide à la décision. Ensuite, nous présentons et discutons les méthodes les plus utilisées au fil de la littérature.

I.4.1 Étude des méthodes d'aide à la décision multi-objectif

Les méthodes d'aide à la décision multi-objectif visent à trouver la meilleure alternative en considérant les différentes interactions entre les contraintes du problème posé. Cette alternative est celle qui satisfait aux mieux l'ensemble des objectifs.

Les méthodes appartenant à cette famille d'aide à la décision multi-objectif ont diverses caractéristiques dont les caractéristiques communes entre elles sont les suivantes : un ensemble d'objectifs quantifiables et un ensemble de contraintes bien

définies.

Les méthodes proposées pour résoudre les problèmes d'aide à la décision multi-objectif sont nombreuses dans la littérature. À titre d'exemple, nous citons le Goal programming, la méthode Lexicographique, les métriques L-P, la méthode de Geoffrion, le Goal programming STEM et la méthode de recherche adaptative, etc.

I.4.2 Étude des méthodes d'aide à la décision multi-attribut

Dans cette famille de méthodes, habituellement, le problème à traiter comporte un nombre limité d'alternatives prédéterminées. Ces alternatives satisfont chaque objectif à un niveau déterminé. Le décideur choisit la ou les meilleures solutions parmi toutes les alternatives en fonction de la priorité de chaque objectif et de l'interaction entre celles-ci.

Il existe plusieurs méthodes pour résoudre les problèmes d'aide à la décision multi-attribut. Dans cette section, nous présentons les particularités des méthodes suivantes : le Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP), la Technique pour l'Ordre de Préférence par similarité de Solution Idéale (TOPSIS) et les méthodes de surclassement y compris la Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations (PROMETHEE) et l'ELimination Et Choix Traduisant la REalité (ELECTRE). Ainsi, nous abordons, dans la suite, les avantages et les inconvénients de ces méthodes.

I.4.2.1 Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP)

La méthode AHP est développée par [Saaty, 1980]. Cette méthode tient son avantage de sa similitude au raisonnement de l'être humain, notamment la décomposition, le jugement et la synthèse. Elle se différencie par sa capacité à gérer différentes classes de critères qualitatifs et quantitatifs.

L'application de cette méthode se fait à deux niveaux : la structure hiérarchique et l'évaluation. L'inconvénient de cette méthode est l'instabilité du classement des différentes alternatives dans le cas où le problème à traiter contient un grand nombre d'alternatives.

I.4.2.2 Technique pour l'Ordre de Préférence par similarité de Solution Idéale (TOPSIS)

La méthode TOPSIS est proposée par [Yoon et Hwang, 1981]. L'objectif de cette méthode est de choisir une alternative, parmi un ensemble d'alternatives, qui a d'une part, la plus courte distance à l'alternative idéale (la meilleure alternative sur tous les critères), et, d'autre part, qui a la plus grande distance à l'alternative négative idéale (celle qui dégrade tous les critères). Pour cela, la méthode TOPSIS vise, dans un premier temps, à réduire le nombre de scénarios de désambiguïsation en écartant les scénarios dominés et, en deuxième temps, à classer les scénarios efficaces selon leurs scores globaux calculés.

I.4.2.3 Méthodes de surclassement

L'intérêt des méthodes de surclassement est d'assurer la comparaison des alternatives par paires au moyen d'une relation de surclassement S. Nous rappelons la définition de [Roy, 1985] soulignant qu'une alternative a surclasse une alternative b (aSb) si, étant donné de ce que l'on sait des préférences du décideur, de la qualité des évaluations et de la nature du problème, il y a suffisamment d'arguments pour admettre que a est au moins aussi bonne que b et qu'il n'y a pas d'arguments importants prétendant le contraire (vétos).

Cette relation de surclassement est exploitée dans le but de répondre aux différentes problématiques notamment le choix, le tri, le rangement et la description.

Du point de vue pratique, l'avantage de ces méthodes de surclassement est qu'elles nécessitent une information moins riche et des hypothèses moins restrictives [Mammeri, 2013] :

— les critères ne sont pas totalement compensatoires,

— la transitivité des préférences n'est pas imposée,

— l'hétérogénéité des échelles n'est pas un problème (échelles ordinales, intervalles ou ratio) lors de l'agrégation des critères,

— l'incomparabilité, l'hésitation et l'indétermination sont prises en compte. Cela permet de prendre en considération en plus de celles de préférence et d'indif-

férence, la situation d'incomparabilité aRb et de préférence faible aQb,

— le modèle de surclassement peut s'appuyer à la fois sur l'information qualitative et quantitative.

Parmi les méthodes de surclassement, nous présentons ci-après deux grandes familles de méthodes : l'ELimination Et Choix Traduisant la REalité (ELECTRE) et la Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations (PROMETHEE) avec ses différentes versions.

1. **Les méthodes d'ELimination Et Choix Traduisant la REalité :**

   Pour les méthodes ELECTRE, le surclassement de a sur b (aSb) (a et b sont deux alternatives) repose sur deux principes, en particulier, la concordance et la non-discordance [Bouyssou, 2000] [Bouyssou *et al.*, 2006].

   (a) **La concordance :** ce principe assure l'obligation qu'une majorité suffisante de critères, représentés par leurs poids, soient en faveur de l'affirmation $a \geq b$. L'importance de la coalition de critères qui sont en faveur de l'affirmation en question est représentée par un indice de concordance.

   (b) **La non discordance :** après l'application de la condition de concordance, le principe de discordance fonctionne comme un véto dans une sélection. Ce principe assure le respect des minorités, où il ne faut pas qu'il y ait un critère qui s'oppose fortement au surclassement de a sur b. Cela signifie qu'il ne doit pas exister de critère où l'avantage de b sur a contredit fortement l'affirmation aSb. Dans ce principe, il existe un indice de non-discordance. Celui-ci indique l'existence d'un critère émettant un véto sur l'affirmation.

   Nous discutons, par la suite, de la différence entre les différentes versions de la famille ELECTRE, notamment ELECTRE I, II, III, IV et TRI.

   — **La méthode ELECTRE I :**

   La méthode ELECTRE I [Roy, 1968] est développée pour traiter le problème du choix (P_α). Le but est d'obtenir comme résultat un choix ou une procédure de sélection selon un groupe de critères, précisément de vrais-critères, dont le pouvoir discriminant est caractérisé par la relation

de préférence stricte ou d'indifférence (sans seuil). Pour atteindre cet objectif, la méthode ELECTRE I vise à sélectionner un sous-ensemble d'alternatives contenant les bonnes alternatives, y compris certainement le meilleur compromis cherché qui sera choisi par le décideur.

— **La méthode ELECTRE IS :**

Cette méthode est proposée par [Roy et Skalka, 1987] et inspirée de la méthode ELECTRE I. La différence entre les deux méthodes c'est que la méthode ELECTRE IS est adaptée au cas où les critères sont des pseudo-critères, où le pouvoir discriminant est marqué par deux seuils : un seuil de préférence et un seuil d'indifférence.

— **La méthode ELECTRE II :**

La méthode ELECTRE II [Roy et Bertier, 1973] [Roy, 1974] vise à traiter le problème du rangement (P_γ). L'objectif est de ranger les alternatives potentielles de la meilleure à la moins bonne suivant un ensemble de vrais-critères. La différence de cette méthode par rapport à la méthode ELECTRE I est au niveau de l'existence de deux relations de surclassement : le surclassement fort et le surclassement faible.

— **La méthode ELECTRE III :**

De même, la méthode ELECTRE III [Roy, 1978] est applicable au cas de résolution de la problématique du rangement (P_γ), dont l'objectif est d'avoir les alternatives potentielles rangées. Cette méthode est considérée comme une amélioration de la méthode ELECTRE II par l'ajout des pseudo-critères et la capacité d'accommoder des données imprécises, inexactes et, même, peu fiables. Elle est beaucoup plus sophistiquée par rapport à ELECTRE II et considérée trop compliquée et difficile à interpréter [Roy, 1989].

— **La méthode ELECTRE IV :**

La méthode ELECTRE IV [Roy et Hugonnard, 1982] provient aussi de la problématique P_γ. Elle se base, comme ELECTRE IS et ELECTRE III, sur des pseudo-critères. Bien que, souvent, c'est difficile de définir les coefficients d'importance relative à chacun des critères, cette méthode n'in-

troduit pas de pondération des critères. Cela ne néglige pas l'importance de chaque critère, mais implique que chaque critère ne soit pas négligé par rapport à un autre [Roy, 1989]. Les hypothèses de surclassement, la concordance et la discordance dans cette méthode sont abandonnées.

— **La méthode ELECTRE TRI :**

ELECTRE TRI [Roy et Bouyssou, 1993] vise à résoudre la problématique du tri (P_β). Le but est de trier les alternatives potentielles et de les affecter dans des différentes catégories. Ces dernières sont séparées par des alternatives de référence.

Cette méthode permet le traitement d'un plus grand nombre d'alternatives, car la comparaison se fait entre les alternatives potentielles et les alternatives de référence.

Deux grandes difficultés pour l'application d'ELECTRE TRI sont soulignées par [Collette et Siarry, 2011], notamment : (1) la comparaison de chaque alternative avec les autres alternatives bornant les différentes catégories n'est pas toujours possible et (2) la définition des catégories, a priori, étant donné qu'elle est liée aux choix des alternatives de référence.

2. **Les méthodes de Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations (PROMETHEE)**

Nous présentons dans cette partie les différentes méthodes de la famille PROMETHEE : PROMETHEE I et II, III et VI [Mareschal *et al.*, 1984] [Brans et Vincke, 1985] [Brans *et al.*, 1986].

— **PROMETHEE I :**

La méthode PROMETHEE I vise à utiliser une relation de surclassement valuée afin de construire un préordre partiel des alternatives. L'objectif est de trouver une solution au problème du choix (P_α). Cette méthode n'assure pas forcément le classement de toutes les alternatives. Par conséquent, certaines alternatives peuvent rester incomparables. Cela peut être très utile pour la prise de décision du point de vue préordre partiel qui peut contenir plus d'informations.

PROMETHEE I s'applique au cas où les critères sont des pseudo-critères

et repose exclusivement sur une analyse de concordance.

— **PROMETHEE II :**

La méthode PROMETHEE II a comme but la résolution du problème du choix (P_α) et le problème de rangement (P_γ). Contrairement à la méthode PROMETHEE I, elle consiste à construire un préordre complet des alternatives. En effet, l'utilisation de ce préordre complet est considérée plus simple par le décideur sollicité pour apporter une réponse au problème de décision.

— **PROMETHEE III :**

La méthode PROMETHEE III est une extension de PROMETHEE II. Elle vise à amplifier la notion d'indifférence, due au préordre complet des alternatives, existant dans PROMETHEE II.

— **PROMETHEE IV :**

Cette méthode étend aussi la méthode PROMETHEE II. Elle répond au problème du choix (P_α) dans le cas d'un ensemble infini d'alternatives. Ces alternatives peuvent être par exemple des dimensions d'un produit, des compositions d'un alliage et des investissements, etc.

I.4.2.4 Discussion des avantages et des inconvénients des méthodes d'aide à la décision multi-attribut

Les méthodes d'aide à la décision multi-attribut citées auparavant, dans la section I.4.2, permettent d'aider le décideur à faire un choix cohérent. Cependant, cela ne veut pas dire qu'il l'est avec ses préoccupations par rapport à la problématique posée. [Ayadi, 2010] récapitule les avantages et les inconvénients de chaque méthode comme les montre la table I.4

TABLE I.4: Principaux avantages et inconvénients des méthodes d'aide à la décision multi-attribut

Méthodes	**Avantages**	**Inconvénients**
AHP	- La structure hiérarchique du problème de décision. - L'échelle sémantique utilisée pour exprimer les préférences du décideur.	- L'explosion du nombre de comparaison par paires au cas du traitement d'un grand nombre d'éléments. - Le renversement de rang des alternatives suite à la suppression/ajout d'une ou de plusieurs alternatives. - L'association d'une échelle numérique à l'échelle sémantique est restrictive.
TOPSIS	- L'introduction des notions d'idéales et d'anti-idéales. - Facile à appliquer.	- L'obligation que les attributs doivent être de nature cardinale. - Au cas où toutes les alternatives sont mauvaises, TOPSIS propose la meilleure alternative parmi les mauvaises. - Le caractère arbitraire du choix de la distance au point idéal et au point anti-idéal.
ELECTRE I et IS	L'introduction de la notion de noyau permet de restreindre le domaine de l'étude pour s'intéresser uniquement aux meilleures alternatives.	L'exigence de traduire les performances des alternatives en notes peut conduire à une perte de maîtrise des données.
ELECTRE II	- Le classement des alternatives des meilleures aux moins bonnes.	- L'exigence des évaluations cardinales et l'articulation a priori des préférences.
ELECTRE III	- Le classement d'alternatives des meilleures aux moins bonnes.	- La nécessité d'un grand nombre de paramètres techniques.

Méthodes	**Avantages**	**Inconvénients**
ELECTRE III	- L'admission de la notion floue dans les choix du décideur et l'introduction du seuil véto.	- Trop complexe et parfois difficile à interpréter.
ELECTRE IV	- L'association à chaque critère des seuils de préférences et la surpression de la pondération des critères.	- La nécessité d'un grand nombre de paramètres techniques.
ELECTRE TRI	- La capacité du traitement d'un grand nombre d'alternatives.	- La nécessité d'un grand nombre de paramètres techniques. - L'impossibilité dans certain cas de comparer chaque alternative avec les alternatives bornant les différentes catégories. - La définition des catégories liées aux choix des alternatives de référence.
PROMETHEE I	- La construction de la relation de surclassement valuée traduisant une intensité de préférence.	- L'indifférence est en pratique très rare vu les nombreux calculs pour obtenir les flux.
PROMETHEE II	- La construction d'un préordre total excluant l'incomparabilité et réduisant fortement l'indifférence.	- Les comparaisons deux à deux ne servent qu'à masquer le calcul du score final de chaque alternative.
PROMETHEE III	- L'introduction des seuils d'indifférence sur les flux, ce qui minimise les nombreux calculs pour l'obtention de ces flux.	- Les seuils d'indifférences n'ayant pas d'interprétation concrète pour le décideur. Ces seuils font l'objet des calculs statistiques qui rendent POMETHEE III moins accessible.
PROMETHEE IV	- L'intérêt théorique apporté et le traitement des ensembles infinis d'alternatives.	- La nécessité du calcul des intégrales au lieu des sommes.

I.5 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons passé en revue l'aide à la décision multi-critère. D'abord, nous avons défini la décision et l'aide à la décision. Ainsi, nous avons abordé les approches et le processus d'aide à la décision. Ensuite, nous nous sommes intéressés à l'aide à la décision multi-critère, en termes de définitions, de classification des problématiques et du processus d'aide à la décision multi-critère. Enfin, nous avons détaillé certaines des méthodes d'aide à la décision multi-attribut constituant la base de nos contributions dans le cadre de cette thèse. En conséquence, nous avons souligné les principaux avantages et inconvénients de chaque méthode.

Dans le prochain chapitre, nous présenterons et discuterons les travaux dédiés au problème de sélection de la localisation des centres de distribution dans un environnement certain/incertain. Aussi, nous décrirons la plupart des critères d'évaluation utilisés dans la littérature pour résoudre le problème en question.

Chapitre II

Méthodes et critères d'évaluation liés à la sélection de la localisation des centres de distribution

Sommaire

II.1 Introduction **36**

II.2 Classification des méthodes de sélection de la localisation des centres de distribution dans un environnement certain **36**

II.2.1 Méthodes d'aide à la décision multi-critère 37

II.2.2 Métaheuristiques pour l'aide à la décision multi-objectif . 38

II.2.3 Méthodes d'optimisation combinatoire multi-objectif . . . 44

II.3 Classification des méthodes de sélection de la localisation des centres de distribution dans un environnement incertain **45**

II.3.1 Métaheuristiques floues pour l'aide à la décision multi-objectif 45

II.3.2 Méthodes floues d'aide à la décision multi-critère 48

II.4 Discussion des méthodes existantes **57**

II.5 Critères d'évaluation **59**

II.6 Conclusion **66**

II.1 Introduction

La sélection de la localisation des centres de distribution est l'une des décisions stratégiques qui a un impact considérable sur l'optimisation du système logistique et sa performance. Avec la croissance du transport des marchandises, cette décision devient de plus en plus critique. En effet, le problème de sélection de la localisation des centres de distribution consiste à sélectionner la meilleure localisation des centres de distribution parmi des localisations potentielles, tout en tenant compte des préférences des décideurs impliqués dans le processus de décision et des contraintes existantes (e.g. l'impact environnemental, la proximité aux clients et la qualité du service, etc.).

Dans ce champ de recherche, l'état de l'art est très riche des travaux dédiés au problème de sélection de la localisation des centres de distribution qui a eu une attention particulière de la part de la communauté scientifique. Dans ce chapitre, nous présentons les études traitant ce problème selon l'environnement de résolution, notamment l'environnement certain et l'environnement incertain [Agrebi *et al.*, 2015] [Agrebi *et al.*, 2016] [Agrebi *et al.*, 2017]. Face à ces études, nous discutons les limites des différentes méthodes existantes. Ainsi, nous décrivons les principaux critères d'évaluation utilisés au fil de la littérature.

II.2 Classification des méthodes de sélection de la localisation des centres de distribution dans un environnement certain

Dans cette section, nous classifions les méthodes existantes, dans la littérature, pour traiter le problème de sélection de la localisation des centres de distribution dans un environnement certain (dans lequel les informations liées à la résolution du problème en question sont connues et fixes) selon notre classification en trois familles de méthodes, à savoir [Agrebi *et al.*, 2016] [Agrebi *et al.*, 2017] :

1. Les méthodes d'aide à la décision multi-critère,

2. Les métaheuristiques pour l'aide à la décision multi-objectif,
3. Les méthodes d'optimisation combinatoire multi-objectif.

II.2.1 Méthodes d'aide à la décision multi-critère

Face au problème de sélection de la localisation des centres de distribution, [Chakraborty *et al.*, 2013] proposent un modèle de classement des différentes localisations associées au processus de décision. Ce modèle est basé sur la méthode REGIME, proposée par [Hinloopen *et al.*, 1983]. Il repose sur les étapes suivantes : (1) le calcul de concordance, (2) la construction de décision, (3) le classement des alternatives par rapport aux critères d'évaluation et (4) la construction de matrice de comparaison par paire d'alternatives et déduction de la meilleure alternative. Pour l'évaluation de quatre alternatives, quatre principaux critères sont utilisés, à savoir : le coût, la qualité, la satisfaction du client et le délai de livraison. Le classement, de ces alternatives, obtenu de leur modèle est comparé aux classements obtenus de quatre méthodes, notamment : l'Analyse Relationnelle Grise (GRA), Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis (MOORA) [Brauers, 2004], la méthode d'ELimination Et Choix Traduisant la REalité II (ELECTRE II) [Roy et Vincke, 1981] et Operational Competitiveness Rating Analysis (OCRA). Pour effectuer cette comparaison, [Chakraborty *et al.*, 2013] se basent sur trois analyses : la corrélation de Spearman, le Tau de Kendall et l'accord entre les trois meilleures alternatives de localisation. Au terme de ces analyses, [Chakraborty *et al.*, 2013] démontrent que le modèle qu'ils proposent est le modèle le plus fiable pour résoudre les problèmes d'aide à la décision, puisqu'il a la capacité de fournir des résultats obtenus de toutes les méthodes citées auparavant (GRA, MOORA, ELECTRE II et OCRA).

[Simić *et al.*, 2015] traitent le problème du classement, de classification et de sélection de la localisation des centres de distribution en Péninsule balkanique. Comme continuité des travaux de recherche de [Tomić *et al.*, 2013] et [Tomić *et al.*, 2014], ils proposent une méthode hybride basée sur la Procédure Hiérarchique d'Analyse (AHP) [Saaty, 1980] pour le classement des alternatives et une méthode du partitionnement K-moyennes [MacQueen *et al.*, 1967] pour la classification des alternatives. Les étapes de cette méthode sont principalement : (1) la détermination des alterna-

tives, (2) la comparaison par paire (critères et alternatives), (3) la détermination du poids des critères, (4) le contrôle de cohérence, (5) la synthèse hiérarchique, (6) la détermination des priorités des alternatives et (7) l'application du partitionnement en k-moyennes. Les critères inclus dans cette méthode sont au nombre de vingt et classés en cinq grandes familles : les flux physiques, les flux économiques, les flux institutionnels, les flux de marchandises et d'autres flux. Pour montrer l'utilité de la méthode, [Simić *et al.*, 2015] l'appliquent pour choisir une localisation parmi dix alternatives de localisation, notamment : la Serbie, la Bulgarie, la Macédoine, la Roumanie, la Grèce, le Monténégro, l'Albanie, la Bosnie-Herzégovine, la Croatie et la Slovénie. En conclusion, [Simić *et al.*, 2015] affirment que les critères utilisés sont assez suffisants pour répondre au problème en question et que l'utilisation d'un nombre petit de critères facilite la prise de décision surtout en utilisant la méthode AHP.

II.2.2 Métaheuristiques pour l'aide à la décision multi-objectif

[Ashayeri et Rongen, 1997] s'intéressent au développement de la structure de distribution pour optimiser d'un côté le coût du transport et de l'autre côté l'affinement des services destinés aux clients. Dans ce but, ils proposent un cadre conceptuel combinant l'heuristique définie par [Kuehn et Hamburger, 1963], le modèle Grid [Ballou, 1992] et la méthode d'ELimination Et Choix Traduisant la REalité (ELECTRE) [Crama et Hansen, 1983]. Le cadre conceptuel vise à sélectionner la localisation des centres de distribution parmi plusieurs localisations potentielles selon des critères qualitatifs et quantitatifs. Il est utilisé pour traiter le cas de la distribution européenne d'une entreprise de télécommunication et par conséquent pour choisir le meilleur emplacement d'un centre européen de distribution. Ce cas d'étude comporte plusieurs centres de distribution situés dans différentes villes, y compris Rotterdam, Francfort, Mer du Nord, Bruxelles et Luxembourg. En dernier lieu, [Ashayeri et Rongen, 1997] soulignent trois points : (1) l'importance de l'optimisation non seulement du coût du transport, mais aussi de l'affinement des services

destinés aux clients, (2) le rôle important de l'introduction à la fois des critères qualitatifs et quantitatifs dans le processus de sélection d'une meilleure localisation et (3) que leur cadre conceptuel prend en compte et analyse les préférences des décideurs participants au processus de décision.

[Nozick et Turnquist, 1998] traitent le problème du choix de la localisation des centres de distribution afin de minimiser les coûts du transport et les coûts fixes. Les auteurs proposent une heuristique par laquelle les coûts de stocks peuvent être intégrés dans les charges fixes. Selon eux, ceci assure une exploration plus complète des compromis entre les coûts du transport, les coûts de construction, les coûts d'exploitation et les coûts de stocks lors de la détermination du nombre des centres de distribution à créer et où ils devraient être localisés. Cette heuristique est appliquée sur un système de distribution automobile. Ils suggèrent que le lien entre la sélection de l'emplacement des centres de distribution à frais fixes et la planification des stocks doit être renforcé en étendant l'analyse : (1) au-delà de la politique unique, du remplacement des stocks, utilisée dans leur article et (2) aux systèmes de distribution pour lesquels le stock est détenu à d'autres niveaux et par conséquent optimiser la localisation des stocks dans un système mutli-échelon.

[Van Thai et Grewal, 2005] proposent plutôt un cadre conceptuel basé sur trois étapes principales : d'abord l'identification d'une zone géographique en utilisant le principe du centre de gravité en tenant compte des facteurs socio-économiques, ensuite l'identification des alternatives des ports maritimes et aériens et finalement la sélection d'une localisation du centre de distribution parmi les alternatives identifiées en fonction d'une approche quantitative visant à optimiser soit le coût total de distribution soit la distance totale du transport. Pour la prise de décision, huit critères sont identifiés : (1) la proximité des clients, (2) la disponibilité et la qualité de la main-d'œuvre, (3) la disponibilité des services publics, (4) le système fiscal local, notamment sur les stocks, (5) les infrastructures du transport terrestre, (6) la capacité d'extension du centre de distribution, (7) l'administration des douanes et la réglementation et (8) les conditions de vie locales. [Van Thai et Grewal, 2005] présentent une étude de cas d'un prestataire de services logistiques et estiment que les données, du cas étudié, prouvent que le cadre conceptuel est valable et utile pour

les entreprises logistiques pour gérer leurs opérations et leur gestion. Également, afin que le modèle mathématique soit complet, ils notent que d'autres facteurs du coût au-delà des coûts du transport doivent être inclus dans le processus de sélection.

[Fei *et al.*, 2007] proposent un algorithme génétique amélioré pour résoudre le problème de sélection de la localisation des centres de distribution, tout en minimisant la somme du coût du transport, du coût fixe et du coût variable et maximisant l'utilité. Afin de prendre une décision rationnelle sur les différents emplacements, les auteurs considèrent les facteurs suivants : (1) l'environnement naturel comprenant le climat, la géographie et la pollution, (2) l'environnement d'affaires tels que les caractéristiques de la marchandise, le coût de la logistique et la qualité du service, (3) la situation de l'infrastructure et (4) d'autres facteurs tels que l'utilisation des ressources foncières et les règlements de protection de l'environnement. Selon [Fei *et al.*, 2007] des résultats obtenus de leur algorithme indiquent que le modèle est assez efficace et robuste.

[Sun *et al.*, 2008] présentent un modèle de programmation à deux niveaux pour résoudre le problème de sélection de la localisation des centres de distribution, tenant compte des avantages des clients et des services de planification logistique. Dans ce modèle, le rôle du niveau supérieur est de déterminer l'emplacement optimal en minimisant le coût de planification, tandis que le rôle du niveau le plus bas consiste à fournir une répartition équilibrée de la distribution face à la demande des clients, tout en assurant la minimisation des coûts liés à la distribution. Pour illustrer l'application du modèle proposé, les auteurs présentent un cas d'étude dont sa finalité est de choisir un centre de distribution parmi quatre alternatives. C'est ainsi qu'ils montrent la faisabilité et l'apport du modèle de programmation à deux niveaux qu'ils développent. Cependant, ils soulignent la nécessité de l'améliorer pour qu'il puisse donner des résultats satisfaisants au cas où les fonctions objectif sont plus complexes que celles traitées dans le cas étudié.

[Ji et Huailin, 2009] proposent une méthode couplant l'algorithme génétique et la Procédure Hiérarchique d'Analyse (AHP). Cette combinaison résout le problème de la localisation des centres de distribution avec des critères à la fois qualitative et quantitative. À l'aide de l'algorithme génétique, un nombre de solutions optimales

est déterminé. Par la suite, parmi ces solutions, la meilleure solution est retenue en utilisant l'AHP. [Ji et Huailin, 2009] présentent l'application de leur méthode sur un cas d'étude comportant deux usines, cinq emplacements des centres de distribution et huit points de demande. En guise de conclusion, ils font allusion aux facteurs environnementaux et aux facteurs de service, pris en compte dans l'étude de cas étudiée, qu'ils rendent la solution finale meilleure en fonction des exigences pratiques.

[Bai *et al.*, 2010] et [Zhang *et al.*, 2013] étendent l'algorithme génétique afin de résoudre le problème de sélection de la localisation des centres de distribution. Dans l'algorithme proposé, au lieu de prendre en compte, uniquement, les coûts de distribution, la fiabilité est impliquée aussi dans la décision comme une mesure du niveau de service de distribution. Un exemple de cas d'une entreprise laitière est étudié [Bai *et al.*, 2010], considérant que les produits laitiers ont une durée de vie courte, qu'il existe de nombreux points de demande et que les clients demandent des produits à temps. Ainsi, [Zhang *et al.*, 2013] appliquent le modèle proposé sur le cas d'une entreprise de distribution de livres. Au terme des deux études de cas étudiées, [Bai *et al.*, 2010] et [Zhang *et al.*, 2013] considèrent que le modèle proposé a un apport positif notamment sur le développement de la distribution laitière et de la distribution de livres.

[Hu *et al.*, 2015] présentent une version améliorée de l'algorithme du Firefly proposé par [Yang, 2010] et inspiré du comportement clignotant des lucioles. Cette version repose sur l'introduction non seulement du facteur de coordination permettant d'ajuster automatiquement l'étape de la recherche, mais aussi la stratégie du chaos visant l'amélioration de la diversité de population dans l'algorithme et la capacité globale de l'optimiser. Afin de vérifier l'efficacité et la performance de l'algorithme amélioré du Firefly, les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus de : l'algorithme original du Firefly, l'algorithme génétique et l'algorithme d'optimisation par essaims particulaires. Face à cette comparaison, [Hu *et al.*, 2015] démontrent que les performances de l'algorithme amélioré du Firefly sont significativement meilleures que celles des autres algorithmes du point de vue réduction du nombre d'itérations et offre une solution optimale.

[Chaiwuttisak *et al.*, 2016] abordent le problème de sélection-allocation de la localisation des salles du don de sang seules ou avec des centres de distribution. L'objectif est d'améliorer l'offre des produits sanguins tout en réduisant les coûts du transport. Les auteurs proposent un modèle de programmation linéaire en nombres entiers. Le cas de la Croix-Rouge thaïlandaise est étudié en appliquant le modèle proposé. L'étude de ce cas est considérée comme une solution, à court terme et à faible coût, destinée aux pays pauvres en ressources. Les coûts opérationnels, que ce soit pour les coûts de main-d'œuvre dans les installations à faible coût ou les coûts de production dans les centres régionaux de transfusion sanguine, ne sont pas pris en compte. Face aux résultats obtenus de cette étude de cas, les auteurs soulignent que le modèle proposé revête une importance pratique pour les décideurs. Cependant, selon les plans de la Croix-Rouge thaïlandaise, une orientation pour la future recherche pourrait consister à : (1) envisager un développement progressif des installations sur une période plus longue, disons vingt ans, dans le cas où les installations sont grandes et supportent des coûts de fonctionnement plus économiques (par rapport aux petites installations) et (2) développer une heuristique permettant de prendre en considération un nombre accru de points de demande sanguine.

[Zeng *et al.*, 2016] développent un modèle basé sur l'Optimisation par Essaims Particulaires (OEP) pour trouver le meilleur centre de distribution. Ce modèle, par la suite, est appliqué sur un cas d'étude comportant quatre localisations et dix points de distribution. Dans l'ensemble des résultats obtenus, les auteurs prouvent que le modèle qu'ils proposent a la capacité d'obtenir le meilleur centre de distribution, parmi les quatre alternatives, par 90% taux de réussite en temps moyen de réponse égale à 3,5 secondes. Par conséquent, ils démontrent que leur modèle basé sur l'OEP est efficace, précis et approprié pour la sélection des centres de distribution.

[Hua *et al.*, 2016] proposent une nouvelle approche basée sur l'algorithme adaptatif de l'Optimisation par Essaims Particulaires intégrant le nonlinear Inertia weight et time-varying acceleration coefficients. Le but principal sous-jacent à ce modèle est d'atteindre l'équilibre entre la capacité de recherche globale et la capacité de recherche locale. Afin de prouver la faisabilité et l'efficacité de l'approche proposée, les auteurs présentent un cas d'étude dont le but est de choisir un centre de

distribution parmi trente alternatives en fonction de la demande et la distance parcourue. D'après les résultats obtenus, les auteurs affirment que leur approche peut non seulement sélectionner le centre de distribution optimal, mais aussi optimiser la structure du réseau logistique.

[Tang *et al.*, 2016] s'intéressent au problème de sélection des localisations optimales des centres régionaux de distribution dans un réseau collaboratif de distribution et d'affectation des clients aux centres de distribution choisis. L'objectif est de minimiser le coût du transport ainsi que la distance parcourue. Ce problème est modélisé comme un problème linéaire en nombres entiers et traité par un outil d'aide à la décision développé par les auteurs. Le cas d'un réseau collaboratif de distribution des produits horticoles en France est étudié. Ce réseau comprend quatre fournisseurs, un centre de consolidation, vingt neuf centres de distribution potentiels et soixante sept itinéraires. Comme amélioration de ce travail de recherche, les auteurs suggèrent d'inclure périodiquement l'optimisation du plan de charge du réseau logistique du cas étudié.

[Fei *et al.*, 2016] proposent, d'abord, un DNA Artificial Fish Swarm Algorithm (DNA-AFSA) combinant Artificial Fish Swarm Algorithm (AFSA) avec DNA algorithm qui inclue DNA crossover et mutation processes. Puis, ils l'appliquent sur le cas d'une entreprise possédant dix alternatives de centres de distribution et quinze clients et souhaitant choisir les quatre meilleurs centres de distribution. Par la suite, ils prouvent l'efficacité de l'algorithme par les tests de précision de la recherche, la fiabilité et la robustesse. Face aux tests effectués, ils montrent, finalement, que leur algorithme a une grande capacité à trouver la meilleure localisation du centre de distribution.

Afin de réduire les coûts de distribution, l'impact environnemental et la congestion du trafic dans les zones urbaines, [Sopha *et al.*, 2016] proposent une méthode combinée intégrant l'analyse spatiale et la programmation linéaire mixte en nombres entiers. Son objectif est de trouver une meilleure localisation du centre de distribution des marchandises à base de sucre. Pour l'évaluation, différents critères sont utilisés, notamment : (1) l'infrastructure, (2) la proximité du marché, (3) la disponibilité du terrain, (4) le prix du terrain, (5) la pente du sol et (6) le risque de catastrophe.

En utilisant la méthode proposée, le cas de la ville de Yogyakarta en Indonésie est étudié. À partir des résultats obtenus [Sopha *et al.*, 2016] montrent que l'établissement de deux centres de distribution urbaine, au lieu d'un seul centre de distribution, entraîne une réduction importante des émissions de CO^2. En outre, l'ouverture de plus de deux centres de distribution urbaine dans le cas étudié semble être économiquement et environnementalement bénéfique. Pour les futures recherches , les auteurs suggèrent l'intégration du problème de localisation-routage, l'expansion vers les multi-commodité et l'application de l'approche combinée sur différents contextes.

II.2.3 Méthodes d'optimisation combinatoire multi-objectif

Pour traiter le problème de sélection de la localisation des centres de distribution en Inde, [Avittathur *et al.*, 2005] développent un modèle de programmation non-linéaire mixte en nombres entiers considérant l'impact de la taxe centrale sur les ventes (the Central Sales Tax (CST)) qui s'effectue au cours du commerce ou du commerce entre États. Afin de valider ce modèle, ils l'appliquent sur un cas d'étude pour choisir le meilleur emplacement pour créer un centre de distribution des produits à base de sucre dans la ville de Yogyakarta. À partir des résultats obtenus de cette étude, les auteurs prouvent que leur modèle permet de prendre des décisions éclairées et réalistes en ce qui concerne le choix de l'emplacement des centres de distribution. Bien que la recherche ait atteint les objectifs de [Avittathur *et al.*, 2005], ils soulignent une limite de leur algorithme du fait que les coûts du transport entre les centres de distribution et les détaillants sont évalués en fonction de livraison directe. Cependant, dans le cas général, les transporteurs se déplacent aux nombreux détaillants suivant un itinéraire optimal prédéfini avant de retourner aux centres de distribution.

[Yegane *et al.*, 2016] formulent le problème de sélection de la localisation des centres de distribution comme étant un modèle mathématique à deux niveaux en nombres entiers non linéaires. Dans ce modèle, le niveau haut représente les décisions du producteur leader tandis que le niveau bas administre les décisions du producteur suiveur. Les auteurs soulignent que les problèmes de programmation mathématiques à deux niveaux sont fortement des problèmes NP-difficile. Dans leur travail de re-

cherche, face au problème de sélection de la localisation des centres de distribution, ils proposent un algorithme de colonies de fourmis à deux niveaux. Pour évaluer la performance de l'algorithme développé, le problème de niveau haut est résolu en tant que modèle de programmation linéaire en nombres entiers sans considérer la décision du producteur suiveur. Vingt tests sont générés dont le bénéfice des centres de distribution et le coût de la mise en place d'un nouveau centre de distribution sont générés aléatoirement. Partant des résultats obtenus, les auteurs prouvent que leur algorithme possède une capacité satisfaisante pour résoudre le problème de sélection de la localisation des centres de distribution.

II.3 Classification des méthodes de sélection de la localisation des centres de distribution dans un environnement incertain

Dans cette section nous catégorisons les travaux traitant le problème de sélection de la localisation des centres de distribution dans un environnement incertain, dans lequel les données et les informations relatives sont des nombres flous, en deux catégories à savoir :

1. Les métaheuristiques floues pour l'aide à la décision multi-objectif,
2. Les méthodes floues d'aide à la décision multi-critère.

II.3.1 Métaheuristiques floues pour l'aide à la décision multi-objectif

[Wang *et al.*, 2005] traitent le problème de sélection de la localisation des centres de distribution. Pour le résoudre, ils proposent une méthode combinée intégrant trois méthodes, notamment quantitative heuristic arithmetic, qualitative analytic hierarchy process et fuzzy comprehensive evaluation. Quatre principaux facteurs sont pris en compte dans cette méthode : (1) l'emplacement du centre de distribution y compris le prix de l'emplacement et la main d'œuvre, (2) les bénéfices économiques

incluant le développement durable de la ville et la conformité aux lois et règlements, (3) le niveau de service y compris la fiabilité, le temps et la satisfaction du service et (4) le facteur environnemental. Le cas d'une entreprise du commerce électronique, en Chine, offrant des biens dans différents endroits, est étudié. Ce cas d'étude comporte trois alternatives de localisation des centres de distribution et six points de distribution. L'objectif est de choisir deux localisations parmi les alternatives potentiels. Les auteurs admettent que la méthode proposée est une méthode globale, logique et exacte traitant à la fois les facteurs qualitatifs et quantitatifs.

[Yang *et al.*, 2007] traitent le problème de sélection de la localisation des centres de distribution en proposant le chance-constrained programming model. L'objectif est de minimiser le coût total de la distribution, y compris : (1) le coût d'installation de chaque centre de distribution, (2) le coût du chiffre d'affaires des produits dans chaque centre de distribution, (3) le coût du transport de l'usine aux centres de distribution et (4) le coût du transport des centres de distribution aux clients. En outre, l'algorithme de recherche tabou, l'algorithme génétique et fuzzy simulation algorithm sont intégrés pour rechercher approximativement la meilleure localisation des centres de distribution. Un exemple de cas d'étude est également discuté dont le but est de choisir au plus les six meilleures localisations parmi dix alternatives pour desservir sept clients. Par ce cas d'étude, les auteurs montrent l'application de leur modèle, ainsi que son efficacité et sa robustesse.

[Xu *et al.*, 2011] développent un modèle de programmation mult-objectif basé sur les coefficients flous aléatoires et l'arbre recouvrant utilisant l'algorithme génétique (st-GA). Son objectif est de minimiser les coûts fixes d'un centre de distribution ainsi que les coûts et le temps du transport. D'abord, le modèle incertain est converti en modèle déterministe par la mesure de probabilité et de possibilité. Ensuite, le st-GA avec les nombres de Prüfer sont introduits pour résoudre le problème multi-objectif. Puis, le modèle de programmation mult-objectif développé est appliqué sur le cas de la société Xinxi Dairy Holdings Limited pour choisir un centre de distribution parmi quatre alternatives potentielles (à Chongqing, Kunming, Chengdu et Mianyang). Ces alternatives sont déterminées sur la base de certains critères, tels que la densité de la demande, le transport pratique, les revenus et les terrains. En fin, une analyse de

sensibilité est effectuée pour valider le modèle proposé. Les auteurs concluent que leur proposition est efficace et peut être utilisée pour résoudre d'autres problèmes de localisation des installations logistiques de grande taille.

[Liu *et al.*, 2011] traitent le problème de sélection de la localisation des centres de distribution avec des facteurs à la fois qualitatifs (notamment l'environnement des entreprises, les caractéristiques des produits, la main-d'œuvre, les services, l'environnement concurrentiel ou encore l'environnement politique, etc.) et quantitatifs (en particulier les coûts de construction, des ressources, du transport, des opérations ...) afin de garantir l'efficacité du flux de produits. Face à ce problème, les auteurs proposent une heuristique hybride combinant la théorie des ensembles approximatifs pour l'obtention des poids et la logique floue. Un modèle de programmation multi-objectif est, ensuite, développé tenant compte des coûts de distribution et des bénéfices. À la suite, une théorie de décision floue multi-objectif interactive est utilisée pour formuler le modèle mathématique et l'interaction entre les avis des décideurs. Les auteurs considèrent que leur proposition est fiable pour résoudre le problème de sélection de la localisation des centres de distribution.

[Hashim *et al.*, 2014] proposent une méthode basée sur (1) l'espérance mathématique floue permettant de convertir un modèle incertain en un modèle déterministe et (2) la programmation floue proposée par [Sakawa, 2013] pour rechercher le meilleur plan du transport approximatif et le plan d'affectation des clients aux centres de distribution. Le but est d'optimiser le coût d'installation des centres de distribution, le coût du transport (du fabricant aux centres de distribution, et du centre de distribution aux clients), le coût opérationnel des centres de distribution et la satisfaction des demandes. L'efficacité de cette méthode est testée sur un cas d'étude théorique où un décideur cherche à sélectionner trois centres de distribution parmi cinq centres de distribution potentiels pour desservir cinq clients. Elle s'appuie aussi sur une analyse de sensibilité. Comme perspective de leur travail de recherche, ils proposent d'appliquer cette méthode sur un cas d'étude réel.

[Zhou *et al.*, 2015] abordent le problème de sélection de la localisation des centres de distribution avec des informations inexactes. En étendant le modèle du crisp multi-objective programming model, les auteurs construisent un nouveau modèle

nommé Rough Multi-Objective Synthesis Effect (RMOSE). Ce dernier s'applique sur une région approximative pour localiser le meilleur centre de distribution tenant compte des fonctions objectif. Son avantage est que le décideur peut utiliser des compromis entre les valeurs objectives et les risques. La solution optimale du modèle RMOSE est établie à l'aide de l'algorithme génétique. Deux études de cas sont présentées et discutées comportant cinq centres de distribution et dix clients. L'objectif est de trouver le centre de distribution, parmi les cinq centres potentiels, qui assure la minimisation des coûts totaux de la distribution. Les résultats obtenus selon les auteurs montrent que le modèle RMOSE est meilleur que ceux basés sur les modèles flous.

[Zhuge *et al.*, 2016] étendent le problème traditionnel de la localisation des centres de distribution sous des exigences incertaines. Afin de s'adapter aux demandes dynamiquement changeantes sur les sites des détaillants, les auteurs proposent un modèle de programmation stochastique. Pour vérifier son efficacité, ils l'appliquent sur le cas d'une grande société de logistique automobile en Chine. Au regard de cette application, ils signalent l'existence de certaines limites dans leur modèle de programmation : premièrement, au niveau du réseau de la chaîne logistique considérée uniquement à deux-échelons (fournisseurs et détaillants), ce qui ne reflète pas la réalité complexe d'une chaîne de logistique multi-échelon et, deuxièmement, au niveau du coût du stockage dans les sites des clients qui n'est pas inclu dans le modèle proposé.

II.3.2 Méthodes floues d'aide à la décision multi-critère

Pour résoudre le problème de sélection de la localisation des centres de distribution en contexte incertain, [Chen, 2001] propose une méthode d'aide à la décision multi-attribut basée sur la théorie des ensembles flous. Dans cette méthode, les poids des critères et les évaluations des alternatives sont décrits sous forme des variables linguistiques exprimées en nombres flous triangulaires. La valeur d'évaluation finale est aussi exprimée en nombres flous triangulaires. Les principales étapes de la méthode sont : (1) l'attribution des poids des critères, (2) l'évaluation des alternatives par rapport aux critères, (3) le calcul de la valeur d'évaluation finale entre chaque

paire d'alternatives, (4) la construction de la matrice de décision des préférences floues et (5) le classement des alternatives. Afin d'illustrer l'applicabilité de la méthode proposée, l'auteur présente un exemple d'étude de cas avec trois décideurs, trois alternatives et cinq critères, à savoir le coût d'investissement, la possibilité d'expansion du centre de distribution, la disponibilité du matériel d'acquisition, les ressources humaines et la proximité avec le marché de la demande. De ce fait, il montre que la méthode proposée peut aider les décideurs à prendre une décision appropriée dans un environnement flou. De plus, qu'elle peut également être réalisée avec des fonctions d'agrégation pour agréger les notations floues des experts et des décideurs.

[Chu et Lai, 2005] développent une méthode d'aide à la décision floue permettant de réduire les coûts du transport et améliorer l'efficacité de l'opération de la distribution. Cette méthode résout les limites de la méthode proposée par [Chen, 2001]. Elle reprend, notamment, la valeur finale de l'évaluation floue en la traitant comme un nombre flou triangulaire et la différence entre deux valeurs finales d'évaluation floue comme un nombre flou triangulaire. Elle permet ainsi d'établir une relation améliorée de préférence floue. Pour démontrer sa faisabilité, les auteurs reprennent l'étude de cas traité dans le travail de recherche de [Chen, 2001]. Ils soulignent l'étendue de leur méthode pour résoudre d'autres problèmes de gestion floue.

[Lee, 2005] aborde le problème de sélection de la localisation des centres de distribution dans un environnement flou en proposant une méthode d'aide à la décision multi-critère floue basée sur la théorie des ensembles flous et l'analyse SWOT (Strengths (forces), Weaknesses (faiblesses), Opportunities (opportunités), Threats (menaces)). Le but est d'affiner l'imprécision des données de décision en utilisant les notes d'alternatives et les poids des critères qui sont attribués sous forme des variables linguistiques représentées par des nombres flous triangulaires. Cette méthode est appliquée sur un cas d'étude de choix de la meilleure localisation parmi trois alternatives potentielles. Ce cas d'étude montre que la décision est prise par trois décideurs en fonction de cinq critères, à savoir : (1) le coût d'investissement, (2) la possibilité d'expansion, (3) la disponibilité du matériel d'acquisition, (4) les ressources humaines et (5) la proximité du marché de la demande. Par des résul-

tats obtenus, l'auteur montre que la méthode fournit l'indice de force et l'indice de faiblesse à côté de l'indice de performance globale afin que les décideurs puissent évaluer les centres de distribution selon différentes perspectives.

[Chan *et al.*, 2007] développent une approche floue d'aide à la décision hiérarchique dans laquelle les préférences sont présentées sous forme de nombres flous triangulaires. Le but est d'aider le décideur à ne pas être affecté par des préférences prioritaires inappropriées et biaisées. L'approche comporte deux grandes étapes : la première étape vise le développement de la hiérarchie des critères, des sous-critères et des alternatives de décision, tandis que la deuxième étape repose sur la construction des matrices de comparaison floue, le calcul du poids des critères d'évaluation et la sélection de la meilleure localisation des centres de distribution. Elle prend en compte vingt-six sous-critères qui sont classés selon six classes de critères : les caractéristiques du site, les coûts estimés, l'accès au trafic, l'opportunité du marché, la qualité de vie et les incitations locales. Pour sa validation, elle réutilise l'étude de cas de [Min et Melachrinoudis, 1999]. À partir de cette application, les auteurs prouvent que leur proposition : (1) fournit une meilleure plate-forme pour modéliser l'incertitude et l'imprécision associées à la comparaison par paires des alternatives, (2) ne nécessite pas beaucoup d'informations auprès du décideur, (3) fait preuve de confiance envers l'évaluation du risque et de l'imprécision des critères d'évaluation subjectifs et (4) est robuste en raison de sa capacité à cartographier la perception du décideur à des nombres flous à la place des nombres exacts.

[Wei et Wang, 2009] résolvent le problème de sélection des centres de distribution internationale par l'application du Processus du Réseau Analytique flou (ANP flou). Le but est de minimiser les coûts liés à la distribution des marchandises et améliorer le service à la clientèle. La relation entre les critères est établie à l'aide de l'ANP. Les poids des critères ainsi que les évaluations des alternatives selon les différents critères sont déterminés en utilisant l'ANP flou. Trois critères sont pris en considération pour l'évaluation des différentes localisations potentielles : (1) l'environnement d'exploitation, englobant la distribution et la quantité des marchandises, les conditions du travail et les conditions des clients, (2) l'état de l'infrastructure, comprenant le trafic, l'état des installations publiques et l'infrastructure d'informa-

tion et (3) les coûts du niveau de salaire du travail local, les coûts de l'utilisation des ressources foncières et les coûts de distribution. Les auteurs soulignent que l'ANP flou est efficace pour résoudre les problèmes d'aide à la décision multi-critère en contexte incertain.

[Ou et Chou, 2009] s'intéressent aussi au problème de sélection de la localisation des centres de distribution internationale dans un environnement flou. À ce sujet, les auteurs développent weighted fuzzy Factor Rating System (FRS). Les principales étapes du FRS sont les suivantes : (1) le recueil d'avis du décideur sur les critères d'évaluation et les localisations potentielles, l'établissement des matrices de décision et la conversion des termes linguistiques en nombres flous triangulaires, (2) la détermination du poids flous agrégés des critères, le calcul des évaluations floues agrégées, la construction de matrice de notation floue et le calcul des notes flous des alternatives et (3) la défuzzification et le classement des localisations. Le FRS est appliqué sur le cas d'une entreprise multi-nationale pour choisir un port ou un aéroport le plus approprié comme un centre de distribution international. Trois alternatives sont évaluées selon six critères, à savoir le système du transport et de distribution, le potentiel du marché, la question culturelle, le facteur environnemental et l'infrastructure. Selon les auteurs, cette étude prouve que le FRS est facile à appliquer et a la capacité de gérer l'incertitude inhérente et l'imprécision du processus décisionnel humain. Comme perspective, ils suggèrent d'élaborer un système informatisé d'aide à la décision basé sur le FRS.

[Chou et Chang, 2009] traitent le problème de sélection de la localisation des centres de distribution dans un environnement flou. Dans un premier temps, les auteurs récapitulent les critères influant sur le choix du meilleur centre de distribution. Ces critères se classifient en quatre catégories, notamment la croissance économique, le coût et les politiques gouvernementales. Dans un deuxième temps, les auteurs élaborent un modèle flou de prise de décision multi-critère [Zadeh, 1996]. Pour le valider, les auteurs, ensuite, l'appliquent sur le cas d'une entreprise manufacturière en Taïwan en Chine visant le choix d'un centre de distribution parmi cinq centres potentiels. Sur la base de cette application, les auteurs démontrent la fiabilité de leur modèle.

[Zhang *et al.*, 2009] résolvent le problème de sélection de la localisation des centres de distribution de la logistique d'urgence comme étant un problème d'optimisation floue multi-niveau. L'entropie informationnelle et le Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP) sont utilisés afin de déterminer les poids combinés des critères. Ces critères sont au nombre de treize et classés en quatre familles de critères qui sont : (1) la sécurité et la fiabilité, (2) les conditions du transport, (3) la situation de la zone sinistrée et (4) l'environnement naturel. Par la suite, un modèle d'évaluation et d'optimisation flou multi-niveau est proposé pour choisir le meilleur centre de distribution. La faisabilité et la véracité de la méthode proposée sont validées selon les auteurs par une étude empirique visant à choisir un centre de distribution parmi trois alternatives.

[Yu *et al.*, 2009] traitent le problème de la sélection de la localisation des centres de distribution en proposant un modèle flou d'aide à la décision basé sur la théorie des sous-ensembles flous. Ce modèle prend en considération les critères qualitatifs et quantitatifs qui sont classés selon quatre catégories de critères : (1) l'environnement naturel, (2) l'environnement économique, (3) l'infrastructure des alternatives et (4) les conditions environnantes. Le modèle est testé sur un exemple de cas d'étude pour choisir un centre de distribution parmi six centres de distribution potentiels. Au regard aux résultats obtenus, les auteurs affirment la simplicité de leur modèle.

[Hu *et al.*, 2009] proposent une méthode combinant la Technique pour l'Ordre de Préférence par similarité de Solution Idéale (TOPSIS), la théorie des sous-ensembles flous, le fuzzy Factor Rating System (FRS) et la somme pondérée. Un exemple numérique est étudié en appliquant la méthode proposée pour illustrer son application et son apport par rapport à la méthode traditionnelle TOPSIS qui est selon les auteurs ne convient pour la prise de décision que pour certains critères. Avec un exemple numérique, les auteurs cherchent à trouver le meilleur centre de distribution parmi quatre centres potentiels selon quatre critères, à savoir : (1) le prix, (2) le marché, (3) le transport et (4) le service après vente. Les auteurs démontrent que la méthode proposée convient parfaitement non seulement à l'évaluation des problèmes flous et d'incertitude, mais qu'elle peut également fournir des poids de critères plus objectifs et plus précis.

[Jafari *et al.*, 2010] proposent un modèle multi-objectif intégrant les paramètres qualitatifs et considérant les opinions des décideurs, ceci afin de minimiser le coût total, comme un premier objectif, et de maximiser la fonction d'utilité comme un deuxième objectif. Pour traiter le problème en question, d'abord le Processus d'Analyse Hiérarchique flou (AHP flou) proposé par [Chang, 1996] est utilisé afin de quantifier les opinions des décideurs. Ensuite, LP-metric method est appliquée pour résoudre le modèle multi-objectif. Un exemple d'étude de cas est étudié pour illustrer la méthode proposée, dans lequel il y a cinq centres de distribution potentiels et douze clients. Parmi ces cinq alternatives, seulement les deux meilleures alternatives sont retenues. D'après [Jafari *et al.*, 2010], les résultats du cas d'étude traité montrent qu'un seul objectif peut sacrifier un autre objectif. Cela signifie que l'ajout de la fonction d'utilité comme une nouvelle fonction objective peut donner des solutions différentes des solutions obtenues en tenant compte uniquement des questions liées aux coûts et en négligeant les avis des décideurs.

[Awasthi *et al.*, 2011] proposent une méthode multi-critère d'aide à la décision reposant sur : (1) l'identification des emplacements potentiels, (2) la sélection des critères d'évaluation, (3) l'utilisation de la théorie floue [Zadeh, 1996] [Zimmermann, 2011] [Buckley, 1985b] [Dubois et Prade, 1982] pour quantifier l'importance des critères en contexte incertain et (4) l'application du Technique pour l'Ordre de Préférence par similarité de Solution Idéale floue (TOPSIS floue) [Jahanshahloo *et al.*, 2006] [Chu, 2002] [Saghafian et Hejazi, 2005] [Wang et Lee, 2007] [Yong, 2006] pour évaluer et sélectionner le meilleur emplacement du centre de distribution. Une analyse de sensibilité est effectuée pour déterminer l'influence des pondérations des critères sur la décision de la localisation des centres de distribution. Le point fort de la méthode est sa capacité de faire face à l'incertitude due au manque des données réelles. Pour illustrer la méthode, une application numérique est fournie portant sur trois décideurs, trois alternatives et onze critères.

[Kuo, 2011] aborde le problème de la localisation des centres de distribution internationale dans un environnement incertain. Pour cela, il propose une méthode hybride combinant la méthode fuzzy Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL floue) [Wu et Lee, 2007], le Processus d'Analyse Hiérarchique

(AHP) [Saaty, 1980] et le Processus du Réseau Analytique (ANP) [Wolfslehner *et al.*, 2005]. La méthode DEMATEL floue est utilisée dont le but d'établir une relation appropriée entre les critères d'évaluation et les alternatives, tandis que la méthode d'aide à la décision multi-critère (AHP-ANP) est utilisée afin de construire les poids de critères. Les termes linguistiques exprimés par des nombres flous triangulaires sont utilisés pour désigner les valeurs d'évaluation des alternatives par rapport aux critères. Finalement, la meilleure alternative est déterminée à partir du classement d'agrégation des évaluations floues des différentes alternatives. L'auteur présente une étude empirique de l'Asie-Pacifique pour illustrer la méthode proposée dont l'objectif est de choisir un centre de distribution parmi six centres potentiels (le port de Busan-la Corée, le port de Shanghai-Chine, le port de Kaohsiung-Taïwan, le port de Hong Kong-China, le port de Shenzhen-Chine et le port de Singapour) selon dix critères classés selon la commodité, le coût, les conditions du port et la capacité d'exploitation. À partir des résultats obtenus, l'auteur montre que sa méthode est un moyen efficace pour résoudre les problèmes flous d'aide à la décision multi-critère.

[Wang *et al.*, 2012] abordent le problème de la localisation des centres de distribution multiples afin d'améliorer l'efficacité du système logistique et réduire ses coûts d'exploitation. La méthode proposée combine l'approche de l'intégration floue et l'approche du regroupement en utilisant la théorie améliorée axiomatic fuzzy set. Elle utilise aussi la Technique pour l'Ordre de Préférence par similarité de Solution Idéale (TOPSIS) pour évaluer et sélectionner les meilleures solutions. Une analyse de sensibilité est aussi menée pour évaluer l'influence de chaque critère sur le choix des différentes localisations. Cette méthode comporte principalement trois étapes : (1) l'établissement des critères et des sous-critères pour former la structure d'analyse hiérarchique, (2) la définition des variables linguistiques pour évaluer les emplacements et la transformation de ces variables en nombres flous et (3) la sélection des meilleures localisations sur la base des critères d'évaluation fuzzifiés. Des résultats obtenus de cette méthode sur un cas d'étude à Guiyang, en Chine, avec dix-huit alternatives, trois décideurs et seize critères sont comparés aux résultats obtenus de la méthode proposée par [Chou *et al.*, 2008] basée sur la théorie des ensembles flous. [Wang *et al.*, 2012] montrent que leur proposition est meilleure

que celle proposée par [Chou *et al.*, 2008]. Ainsi, ils suggèrent son application sur d'autres installations comme les hôpitaux, les casernes de pompiers et les écoles.

[Guo-qin et Hong-yan, 2014] s'intéressent au problème de sélection de la localisation des centres de distribution des produits agricoles à Shanghai. Pour résoudre ce problème, les auteurs utilisent la méthode de partitionnement de données [Zhou, 2005] et l'algorithme de Floyd [Ju-zhou, 2004]. L'objectif est de minimiser les chemins de distribution. Par la suite, ils effectuent une analyse approfondie en utilisant le Processus d'Analyse Hiérarchique flou (AHP flou) [Jing-min et Yan-fu, 2010] [Tang *et al.*, 2013]. Une étude de cas est présentée pour choisir un centre de distribution parmi trois centres potentiels (situés dans Changzheng, Zhenru et Xinjing) selon dix critères classés selon trois conditions (du transport, économiques et bénéfices). Par des résultats obtenus, les auteurs montrent que les méthodes utilisées fournissent une manière pratique et flexible pour sélectionner le meilleur centre de distribution.

Afin d'améliorer l'efficacité de la prise de décision, [Cheng et Zhou, 2016] développent une méthode floue basée sur le Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP). L'objectif est d'assurer la rapidité et la qualité de livraison et réduire les coûts d'exploitation. Les facteurs impliqués pour évaluer les différentes localisations des centres de distribution sont au nombre de treize et classés selon quatre indicateurs qui sont : l'indicateur économique, l'indicateur du trafic, l'indicateur de l'environnement et l'indicateur de la politique gouvernementale. La méthode proposée comporte quatre principales étapes : (1) établir le système de l'index de l'évaluation des hiérarchies et le processus hiérarchique analytique, (2) calculer le poids de chaque facteur, (3) déterminer l'appartenance de chaque alternative aux indicateurs et (4) calculer la valeur d'évaluation finale pour déterminer la meilleure solution. À partir d'une étude de cas, présentée par les auteurs, portant sur le choix d'une localisation parmi quatre localisations potentielles, [Cheng et Zhou, 2016] montrent que leur méthode est efficace pour choisir la meilleure localisation avec des facteurs qualitatifs et quantitatifs.

[He *et al.*, 2017] s'intéressent à la durabilité dans la sélection de la localisation des centres de distribution conjointe. Face à ce problème, ils proposent une méthode qui combine le Processus d'Analyse Hiérarchique floue (AHP flou), l'entropie floue

(EW floue) et la Technique pour l'Ordre de Préférence par similarité de Solution Idéale floue (TOPSIS floue). L'EW-AHP flou est utilisé pour déterminer les poids de critères objectifs et subjectifs des experts, afin de réduire la perte d'informations. En outre, TOPSIS floue est améliorée en intégrant les distances de critères pondérées (au lieu de la distance euclidienne utilisée dans la méthode traditionnelle de TOPSIS floue) pour réduire l'effet sur les évaluations, affectées par des préjugés humains, lors du changement des poids de critères. L'apport de cette méthode combinée est, d'une part, obtenir un classement plus stable (par rapport au classement obtenu de la méthode traditionnelle TOPSIS floue) et, d'autre part, répondre à la limite de la méthode traditionnelle TOPSIS floue qui ne prend pas en compte l'importance relative des distances associées aux solutions idéales positives et négatives [He *et al.*, 2017]. Les principales étapes de cette méthode sont : (1) l'identification des critères d'évaluation intégrant les dimensions économiques, environnementales et sociales de la durabilité, (2) la conversion des préférences linguistiques en nombres flous triangulaires, (3) le calcul des poids de critères subjectifs en combinant les notes attribuées par les décideurs en utilisant l'AHP flou, (4) la détermination des poids de critères objectifs en combinant les notes linguistiques à l'aide d'EW floue et (5) le classement des alternatives à l'aide de la méthode TOPSIS floue améliorée. Pour la validation, la méthode combinée est appliquée sur le cas de la livraison express de l'industrie chinoise (au sein du programme national d'appui aux sciences et à la technologie nommé Distribution conjointe pour les achats en ligne) dont le but est de choisir un centre de distribution parmi quatre centres potentiels. Dans ce cadre, une analyse de sensibilité est menée pour illustrer son efficacité et sa robustesse. Néanmoins, les interactions entre les différents critères dans ce travail de recherche ne sont pas prises en compte et les auteurs les prescrivent dans leurs futurs travaux de recherche.

II.4 Discussion des méthodes existantes

Dans la littérature, les études traitant le problème de sélection de la localisation des centres de distribution reposent sur trois familles de méthodes, notamment : (1) les méthodes d'aide à la décision multi-critère (MCDM), y compris les méthodes d'aide à la décision multi-attribut (MADM) et les méthodes d'aide à la décision multi-objectif (MODM), (2) les métaheuristiques pour l'aide à la décision multi-objectif (MMODM) et (3) les méthodes d'optimisation combinatoire mutli-objectif (MMOCO). La table II.1 présente notre classification de ces méthodes existantes pour résoudre le problème de sélection de la localisation des centres de distribution du point de vue alternatives, critères et solutions [Agrebi *et al.*, 2017].

Table II.1: Comparaison entre les différentes familles des méthodes proposées

	MCDM		**MMODM**	**MMOCO**
	MADM	**MODM**		
Alternatives	Limitées	Limitées	Illimitées	Illimitées
Solution(s)	Une ou plus	Une ou plus	Une	Une
Critères	Qualitatifs et/ou quantitatifs	Quantitatifs	Quantitatifs	Quantitatifs

1. **Méthodes d'aide à la décision multi-critère**

   Ces méthodes sont utilisées dans la mesure où le nombre d'alternatives prédéterminées est limité. Selon [Wolf, 2011], ces alternatives répondent à chaque objectif à un niveau spécifié. Parmi ces alternatives, les décideurs sélectionnent la meilleure solution en fonction de la priorité de chaque objectif et l'interaction entre les objectifs fixés.

   Les méthodes d'aide à la décision multi-critère se catégorisent selon deux sous familles des méthodes qui sont : les méthodes d'aide à la décision multi-attribut (MADM) et les méthodes d'aide à la décision multi-objectif (MODM). En pratique, les méthodes d'aide à la décision multi-objectif sont incapables d'inclure des critères quantitatifs dans le processus de décision [Sanayei *et al.*, 2010]. En outre, elles sont assez complexes pour être utilisées facilement par les décideurs [Zandi et Roghanian, 2013]. Cependant, les méthodes d'aide

à la décision mutli-attribut considèrent à la fois les critères quantitatifs et qualitatifs [Sanayei *et al.*, 2010].

2. **Métaheuristiques pour l'aide à la décision multi-objectif**

   Dans cette catégorie (MMODM), les méthodes existantes convertissent le problème multi-objectif en un problème à objectif unique et l'optimisent. D'après [Wolf, 2011], cela génère une solution unique. Cette dernière ne répond pas forcément aux attentes des décideurs qui ont besoin parfois d'un ensemble de solutions. La même référence souligne l'existence des méthodes classiques ayant la capacité de trouver la solution optimale de chaque objectif. Mais, avoir ce résultat coûte très cher et prend énormément du temps. En outre, il est difficile, en particulier dans le cas d'une situation non déterministe, de choisir les poids pour lesquels ces méthodes dépendent.

3. **Méthodes d'optimisation combinatoire mutli-objectif**

   L'utilisation des méthodes appartenant à cette troisième catégorie (MMOCO) a comme but la résolution des problèmes discrets multi-critère. Les alternatives dans ce type du problème ne sont pas explicitement connues et ont un nombre très important si elles sont dénombrables.

Bien que l'état de l'art est très riche des méthodes dédiées au problème de sélection de la localisation des centres de distribution, ces méthodes présentent encore des limites. Elles peuvent encore être améliorées afin de satisfaire au mieux les exigences du problème en question ainsi que les attentes des décideurs. Nous pouvons recenser ci-après cinq principales limites :

1. L'aspect multi-critère pour la sélection de la localisation des centres de distribution est important. Toutefois, la plupart des méthodes existantes cherchent à convertir les critères qualitatifs et, parfois, même les critères quantitatifs vers le coût.

2. La majorité des méthodes ne considèrent pas les répercussions de la stratégie globale de l'entreprise sur les décisions en tenant compte des critères qualitatifs tels que les caractéristiques du produit, l'environnement politique et la concurrence, etc.

3. La décision de sélection de la localisation des centres de distribution nécessite la participation de plusieurs services de l'entreprise notamment le service de la distribution, de la qualité et du développement durable, etc. Cependant, le plus grand nombre des méthodes développées repose sur un seul décideur et par conséquent uniquement sur ses préférences.
4. La localisation des centres de distribution repose sur la maximisation de certains critères et la minimisation d'autres. Cependant, beaucoup de méthodes ne considèrent pas ces deux aspects à la fois, par exemple maximiser la qualité de service et minimiser la congestion en même temps.
5. Il y a plusieurs méthodes qui ne considèrent pas l'aspect d'incertitude dans le processus de décision. Cela signifie, qu'elles ignorent l'incertitude inhérente et l'imprécision du processus décisionnel humain. Ainsi, elles négligent les comportements futurs du marché et des entreprises nécessitant un traitement adéquat non pas sur des valeurs fixes, mais plutôt sur des valeurs floues.

Afin de surmonter ces limites évoquées et satisfaire davantage les exigences du problème en question, nous proposons, dans le cadre de cette thèse, deux méthodes d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur [Agrebi *et al.*, 2016] [Agrebi *et al.*, 2017]. Nous les présenterons en détails dans le chapitre III.

II.5 Critères d'évaluation

Pour résoudre le problème de sélection de la localisation des centres de distribution, plusieurs critères d'évaluation sont inclus dans le processus d'aide à la décision pour évaluer les localisations des centres de distribution. Dans cette section, nous décrivons à partir de la littérature, les principaux critères d'évaluation utilisés.

Pour faire face au problème en question et dans le but d'évaluer les différentes alternatives, [Chen, 2001] et [Chu et Lai, 2005] se basent sur cinq critères qui sont : le coût d'investissement, la possibilité d'expansion, la disponibilité du matériel d'acquisition, les ressources humaines et la proximité du marché des demandes. [Chu et Lai, 2005] regroupent ces critères en deux catégories de critères qui sont : (1) les critères objectifs, où ces critères peuvent être évalués quantitativement (e.g. le

coût d'investissement) et (2) les critères subjectifs, où les critères ont des définitions qualitatives (e.g. la possibilité d'expansion, les ressources humaines et la proximité du marché des demandes, etc.).

Dans le processus de prise de décision d'une meilleure localisation pour implanter un centre de distribution, [Ou et Chou, 2009] examinent les différentes alternatives selon six critères qualitatifs et quantitatifs (discutés par des experts du domaine de la logistique), notamment :

1. Le service : ce sont les services offerts par les centres de distribution, à savoir l'étiquetage, le traitement du fret et le codage à barres, les services de stockage (principalement le stockage sous douane et les services spéciaux de stockage de marchandises), et les services de soutien, tels que le dédouanement, l'assurance et la reconnaissance de codes à barres.

2. Le système de distribution et du transport : il s'agit de la distribution des importations et des exportations, la distribution multi-nationale, la transmission électronique et le transport intérieur.

3. Les marchés potentiels : ce critère est axé sur la question de savoir les tendances de consommation des produits sur le marché d'exportation, la concurrence interne et externe sur le marché d'exportation et la position actuelle sur le marché.

4. Les questions culturelles : ce sont la nature des modes de vie internes et externes, les coutumes et les relations sociales, le degré d'unité culturelle, l'intégration nationale, l'étendue des différences ethniques culturelles sur le marché étranger et les différences culturelles entre le marché d'exportation et le marché intérieur.

5. Les facteurs environnementaux : se sont les principaux domaines d'intérêt comprenant les facteurs politiques tels que la politique interne d'un gouvernement étranger, les attitudes et actions envers l'entreprise privée et l'environnement juridique telles que les réglementations gouvernementales ou bien les restrictions qui peuvent affecter les opérations. Il peut y avoir aussi les facteurs économiques, les facteurs sociaux, les facteurs physiques, les facteurs

techniques et les facteurs liés à l'environnement du travail.

6. L'infrastructure : ce sont l'infrastructure de distribution physique, l'infrastructure de communication, l'infrastructure informatique et les infrastructures d'approvisionnement en eau et en électricité.

[Kuo, 2011] définit dix critères qualitatifs pertinents pour évaluer les alternatives des localisations des centres de distribution :

1. Le taux du port : ce taux comporte les frais portuaires (remorquage et approvisionnement en eau et impuretés) et les frais d'exploitation des terminaux (port dû et frais de quai et de manutention). Ces frais influencent sur le coût du transport des cargaisons.
2. Le volume d'importation/exportation : ce volume est défini comme le volume d'importation et d'exportation des matières premières, produits finis et semi-finis dans un pays.
3. La résistance de l'emplacement : c'est la distance entre l'emplacement du centre de distribution et le marché principal de fabrication et de consommation. Cela affecte le coût de la distribution et le temps des cargaisons.
4. La commodité du transport : la commodité du transport entre l'emplacement du centre et l'emplacement de retraitement a un impact sur l'efficacité du temps/coût.
5. Le temps de transbordement : c'est le temps nécessaire pour préparer les marchandises dans le port (par exemple le temps nécessaire pour faire passer les marchandises des quais d'arrivée aux quais du départ). Ce temps influe sur le temps total du transport.
6. Le service à guichet unique : il fournit la commodité de l'administration et le service opérationnel dans les ports.
7. La capacité d'information : elle fournit la commodité du service d'information sur la logistique, les entreprises et les activités de financement.
8. Les installations portuaires et des entrepôts : ceux-ci ont un impact sur le coût d'exploitation et la qualité du stockage.

9. Le système d'exploitation portuaire : le temps de préparation des marchandises dans le port est également effectué par le système d'exploitation portuaire.

10. La densité de la ligne d'expédition : c'est la fréquence de la ligne d'expédition du centre de distribution à la fabrication et à la consommation. Cela affecte le temps de réponse.

[Liu *et al.*, 2011] regroupent les différents critères de sélection de la localisation des centres de distribution en deux catégories :

1. Les critères quantitatifs : le coût de construction, le coût des ressources (le coût du terrain et le coût politique), le coût du transport (la capacité logistique, les tarifs du transport, la distance du transport, les conditions routières et la gestion du trafic) et le coût d'exploitation.

2. Les critères qualitatifs : l'environnement du marché, les caractéristiques du produit, la main d'œuvre, les services, l'environnement de la concurrence, l'environnement politique et d'autres conditions.

À partir de la littérature et des discussions avec des experts du transport et des membres d'un groupe du transport urbain, [Awasthi *et al.*, 2011] choisissent, pour évaluer les différentes alternatives des localisations des centres de distribution, onze critères classés en deux catégories qui sont :

1. Les critères qualitatifs :
   — l'accessibilité : l'accès par les modes du transport public et privé au centre de distribution,
   — la sécurité : la sécurité du centre de distribution contre les accidents, le vol et le vandalisme,
   — la connectivité au transport multi-modal : la connectivité du centre de distribution avec d'autres modes du transport (autoroutes, chemins de fer et aéroport, etc.),
   — la proximité des clients : la distance entre le centre de distribution et les clients,

— la proximité des fournisseurs : la distance du centre de distribution aux fournisseurs,
— la disponibilité des ressources : la disponibilité de matières premières et main-d'œuvre dans le centre de distribution choisi,
— la conformité aux règles du transport durable : la possibilité de se conformer aux règles du transport durable imposées par les administrations municipales,
— la possibilité d'expansion : la possibilité d'augmenter la taille du centre pour répondre aux demandes croissantes,
— la qualité du service : la possibilité d'assurer un service rapide et fiable aux clients.

2. Les critères quantitatifs :
   — les coûts : les coûts d'acquisition du terrain, des moyens du transport, des chauffeurs et des taxes, etc.,
   — l'impact environnemental : l'impact du centre de distribution sur l'environnement (la pollution de l'air et le bruit).

Dans l'étude de [Wang *et al.*, 2012], les critères de sélection de la localisation d'un meilleur centre de distribution sont au nombre de six critères qualitatifs et quantitatifs [Chen, 2001] [Kahraman *et al.*, 2003]. Ces critères sont considérés comme des critères critiques selon les décideurs et les membres des agences du transport local à Guiyang en Chine. Ils sont notamment les suivants :

1. L'environnement naturel : la condition géologique, la condition hydrologique et la condition de relèvement.

2. Le transport : les installations routières, l'accessibilité et la connectivité au transport multi-modal.

3. L'environnement du marché : la proximité des clients et le degré de proximité au centre logistique.

4. Le terrain du centre de distribution : la disponibilité des ressources, la réglementation durable du transport de marchandises et les coûts du terrain.

5. La condition d'approvisionnement : l'approvisionnement en eau, l'alimentation électrique et l'approvisionnement en gaz.
6. L'impact environnemental : le drainage et l'élimination des déchets solides.

Du point de vue durabilité, [He *et al.*, 2017] intègrent trois dimensions des critères : économiques, environnementaux et sociaux comportant treize critères. Le choix de ces critères est basé sur la littérature et l'expérience acquise des auteurs grâce à leur projet (City Joint Distribution for Online Shopping) en Chine.

1. Les critères économiques :
   - le prix d'acquisition du terrain (à minimiser) : le prix du terrain a un grand impact sur la sélection du centre de distribution. Un prix foncier plus élevé augmentera le coût d'investissement d'un centre de distribution, ce qui aura une incidence sur l'échelle de construction du centre.
   - la possibilité d'expansion (à maximiser) : cela fait référence à la possibilité d'augmenter la taille du centre de distribution pour répondre aux demandes croissantes.
   - l'accès au transport (à maximiser) : un centre de distribution doit être connecté à multiples modes du transport (autoroutes, chemins de fer et aéroports), afin de faciliter le transit. En particulier, la distance d'un aéroport doit être à un niveau acceptable pour le service express.
   - le délai de livraison (à maximiser) : les services express ont des limites strictes sur la rapidité de livraison. Par conséquent, la localisation d'un centre de distribution doit être aussi proche que possible des clients tout en couvrant autant de clients que possible.
   - la disponibilité des ressources (à maximiser) : l'emplacement d'un centre de distribution nécessite des ressources publiques telles que les ressources humaines, l'eau et l'alimentation électrique, afin de fonctionner correctement.
   - la politique fiscale (à maximiser) : afin d'attirer les investissements et de promouvoir le développement de l'économie locale, le gouvernement local peut introduire des politiques fiscales préférentielles. Ceci réduit considérablement les coûts de construction et d'exploitation du centre.

2. Les critères environnementaux :
   - l'impact sur l'écologie du paysage (à minimiser) : le terrain choisi doit être pris en compte pour promouvoir l'harmonie avec le paysage environnant et maintenir le paysage original sans détruire la végétation et le sol.
   - le niveau de protection de l'environnement (à maximiser) : la protection de l'environnement naturel et la réduction de la pollution urbaine doivent également être considérés.
   - les conditions naturelles (à maximiser) : l'emplacement choisi d'un centre de distribution doit tenir compte des conditions naturelles locales (e.g. le niveau des précipitations, la température et le terrain) ce qui contribue à réduire le risque pour les opérations.
3. Les critères sociaux :
   - l'impact sur la congestion routière (à minimiser) : les activités du centre de distribution doivent apporter une contribution minimale à la congestion du trafic. En outre, un meilleur endroit est celui dans lequel il y a un flux de circulation plus faible.
   - l'impact sur les résidents proches (à minimiser) : le centre doit relever la pression sur la congestion urbaine et promouvoir un développement sain pour les résidents dans les meilleures circonstances.
   - le rôle dans la promotion du développement de l'industrie de pointe (à maximiser) : le gouvernement local, compte tenu de la durabilité, introduit des politiques appropriées pour attirer de grands fournisseurs du service express, afin d'établir leur centre de distribution. Ceci favorise le développement de son industrie de pointe.
   - l'harmonisation avec la planification économique régionale (à maximiser) : il est nécessaire que les fournisseurs du service express se concentrent sur la possibilité de coexister harmonieusement l'emplacement d'un centre de distribution et la planification économique locale.

II.6 Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons étudié les travaux de recherche dédiés au problème de sélection de la localisation des centres de distribution dans un environnement certain et incertain. Dans l'environnement certain, nous avons classé les méthodes existantes selon trois grandes catégories, notamment les méthodes d'aide à la décision multi-critère, les métaheuristiques pour l'aide à la décision multi-objectif et les méthodes d'optimisation combinatoire multi-objectif. Tandis que, dans l'environnement incertain, nous avons classé les méthodes développées au fil de la littérature selon deux familles de méthodes, à savoir les métaheuristiques floues pour l'aide à la décision multi-objectif et les méthodes floues d'aide à la décision multi-critère. Face à cette étude de la littérature, nous avons discuté les différentes limites des méthodes existantes. Ainsi, nous avons décrit la plupart des critères d'évaluation utilisés.

Dans le prochain chapitre, afin de surmonter les limites évoquées et satisfaire davantage les exigences du problème en question, nous proposons deux méthodes d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur pour trouver la meilleure localisation des centres de distribution dans un environnement certain et incertain :

1. La méthode d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur [Agrebi *et al.*, 2016] [Agrebi *et al.*, 2017] est basée sur la méthode d'ELimination Et Choix Traduisant la REalité I (ELECTRE I) [Roy, 1968] [Collette et Siarry, 2011].
2. La méthode floue d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur repose sur notre méthode d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur [Agrebi *et al.*, 2016] [Agrebi *et al.*, 2017] et la méthode d'aide à la décision multi-attribut proposée par [Chen, 2001] et basée sur la théorie des ensembles flous.

Chapitre III

Méthodes d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur pour résoudre le problème de sélection

Sommaire

III.1 Introduction **68**

III.2 Principe général des contributions **69**

III.3 Méthode d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur **71**

III.3.1 Choix de la méthode ELECTRE I 71

III.3.2 Démarche de la méthode MAADM 72

III.3.3 Architecture de la méthode MAADM 77

III.4 Méthode floue d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur **81**

III.4.1 Approche floue de [Chen, 2001] : présentation et utilisation 82

III.4.2 Démarche de la méthode FMAADM 87

III.4.3 Architecture de la méthode FMAADM 92

III.5 Conclusion **94**

III.1 Introduction

L'application de l'aide à la décision face à un ensemble de critères au sein des organisations, nécessite une synergie d'efforts de plusieurs décideurs ayant différents intérêts, compétences et expériences afin que chacun d'eux mette à contribution son savoir-faire. Par conséquent, chaque décideur impliqué dans le processus de décision est invité à exprimer ses préférences, d'une part, sur l'importance des critères d'évaluation et, d'autre part, au regard de l'ensemble des alternatives potentielles, afin de défendre les intérêts du service de l'entreprise qui le représente, à savoir le service de la distribution, de la qualité et du développement durable, etc. D'ailleurs, c'est grâce à cette synergie que les décideurs peuvent atteindre des résultats supérieurs à ceux qu'ils auraient pu réaliser individuellement [Ayadi, 2010].

Dans ce contexte, dans la première section de ce chapitre, nous présentons, d'abord, le principe général de nos deux contributions :

1. La méthode d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur (MAADM) [Agrebi *et al.*, 2016] [Agrebi *et al.*, 2017] basée sur la méthode d'ELimination Et Choix Traduisant la REalité I (ELECTRE I) [Roy, 1968] [Collette et Siarry, 2011].
2. La méthode floue d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur (FMAADM) repose sur notre première méthode MAADM et la méthode d'aide à la décision multi-attribut proposée par [Chen, 2001] et basée sur la théorie des ensembles flous.

Ensuite, nous abordons le problème de sélection de la localisation de distribution dans un environnement certain/incertain sur lequel nous projetons la méthode MAADM et la méthode FMAADM.

Dans la deuxième section, d'abord, nous présentons la méthode ELECTRE I et nous argumentons pourquoi nous l'intégrons dans la méthode MAADM. Ensuite, nous détaillons la démarche de la méthode MAADM et nous exposons son architecture. Dans la troisième section, nous décrivons l'approche floue de [Chen, 2001] et nous expliquons son intégration dans la méthode FMAADM. Puis, nous présentons la démarche de la méthode FMAADM et son architecture.

III.2 Principe général des contributions

Dans le cadre de cette thèse, nous proposons deux méthodes génériques qui peuvent être configurables ou adaptables pour résoudre tout problème de sélection (α), à savoir le problème de sélection des fournisseurs, du portefeuille de projets et de la localisation des installations (e.g. des hôpitaux, des centres de distribution et d'hôtels, etc.), etc., dont le comité de décision contient un ensemble de décideurs.

Les deux méthodes proposées sont les suivantes :

1. **Une méthode d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur (MAADM)** [Agrebi *et al.*, 2016] [Agrebi *et al.*, 2017] **:**

   Cette première méthode est basée sur la méthode ELimination Et Choix Traduisant la REalité I (ELECTRE I) [Roy, 1968] [Collette et Siarry, 2011]. Son rôle est de résoudre le problème de sélection dans un environnement certain où les paramètres sont fixes. L'apport de cette méthode, par rapport à la version classique de la méthode ELECTRE I, est sa capacité à partager la prise de décision entre plusieurs décideurs, où chacun défend les intérêts du service de l'entreprise qui le représente. Par conséquent, chaque décideur est invité à exprimer ses préférences, d'une part, sur l'importance des critères d'évaluation et, d'autre part, au regard de l'ensemble des alternatives potentielles.

2. **Une méthode floue d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur (FMAADM) :**

   Cette méthode est basée sur notre méthode MAADM et l'approche proposée par [Chen, 2001]. Le but de cette deuxième méthode est de résoudre le problème de la sélection dans un environnement incertain caractérisé par des paramètres flous. Ceci est nécessaire lorsque la nature de la décision à prendre est stratégique avec un impact à long terme et est basée sur des préférences humaines et des comportements futurs du marché souvent ambigus et incertains. Dans ce cadre, nous présentons, les paramètres nécessaires pour la prise de décision comme étant des nombres flous, notamment, et en particulier.

Avant de développer la méthode MAADM et FMAADM, respectivement, dans la section III.3 et la section III.4, nous proposons de les projeter sur le problème de sélection de la localisation des centres de distribution dans un environnement certain/incertain. La figure III.1 présente l'architecture hiérarchique de ce problème.

Soient m alternatives (A_i où $i = 1, ..., m$) et n critères d'évaluation (C_j où $j = 1, ..., n$) choisis par K décideurs. Ce problème consiste à sélectionner la meilleure localisation des centres de distribution parmi un ensemble d'alternatives potentielles face à des critères d'évaluation tout en respectant les préférences des décideurs impliqués dans le processus de la décision.

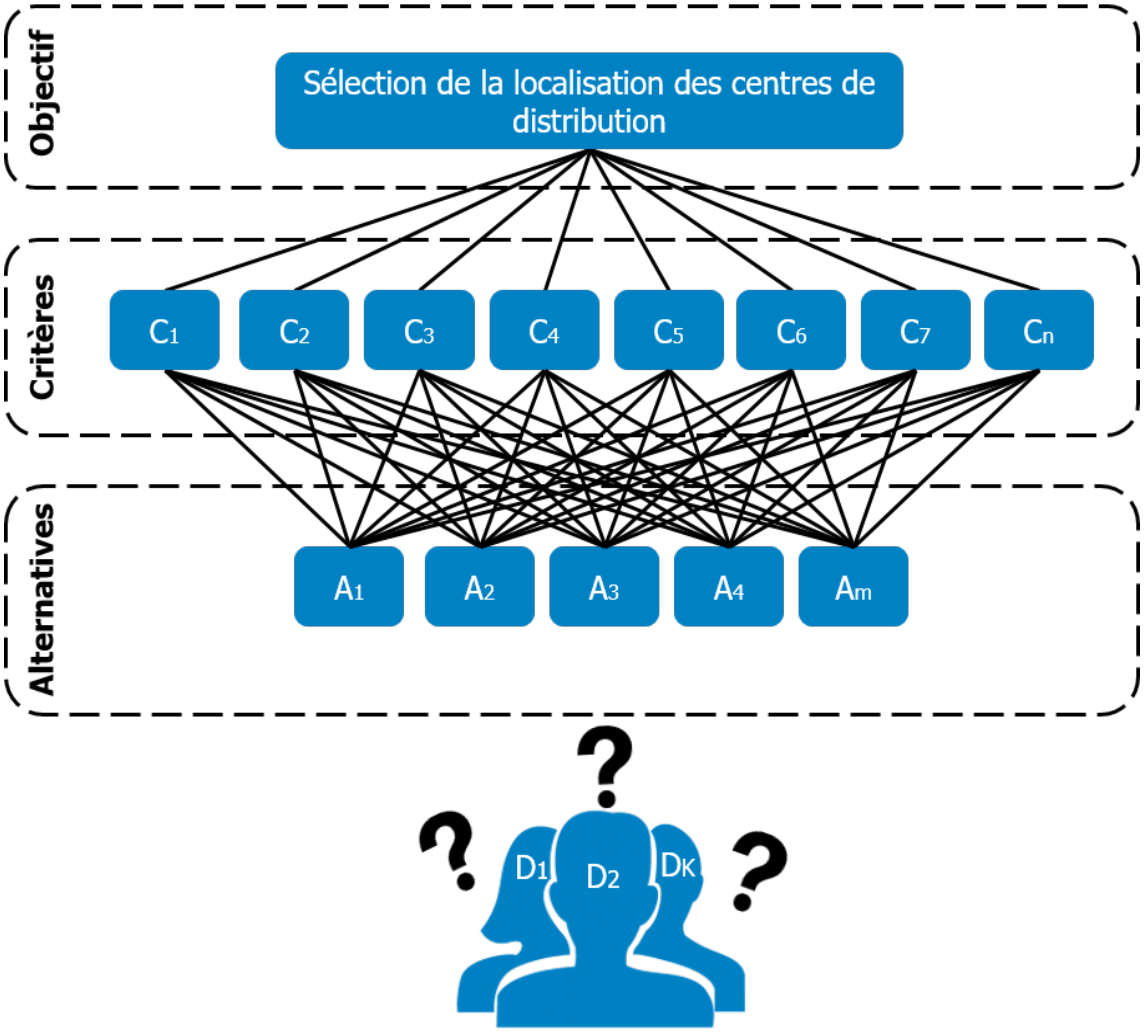


FIGURE III.1: Structure hiérarchique dans un problème de sélection

III.3 Méthode d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur

Dans cette section, d'abord, nous argumentons le choix de la méthode ELECTRE I. Ensuite, nous détaillons la démarche de notre méthode MAADM. L'architecture de cette dernière, du point de vue utilisateur, interface homme-machine et application, est présentée à la fin de cette section.

III.3.1 Choix de la méthode ELECTRE I

La méthode ELECTRE I est adaptée pour résoudre, en général, le problème multi-critère de sélection, comme le montre la table III.1 de [Rogers *et al.*, 2013], et, en particulier, le problème de sélection de la localisation des centres de distribution. En effet, cette méthode remplit majoritairement les buts et les attentes du problème que nous traitons, dans le cadre de cette thèse, de part son choix d'une ou plusieurs meilleures alternatives parmi un ensemble limité d'alternatives face à des critères qualitatifs et quantitatifs [Kumar *et al.*, 2017]. Le choix résultant du processus de décision est validé à la fois par le test de concordance et le test de non-discordance.

Table III.1: Choix de méthode parmi la famille des méthodes ELECTRE

	Nature du problème		
Critères	Sélection (α)	Affectation (β)	Classement (γ)
Vrai-critère	ELECTRE I	-	ELECTRE II
Pseudo-critère	ELECTRE IS	ELECTRE TRI	ELECTRE III, IV

Comme le précise [Kamissoko, 2013], la méthode ELECTRE I est intéressante théoriquement et pédagogiquement. En effet, elle est l'une des méthodes les plus préférées parmi plusieurs méthodes de surclassement , à savoir les méthodes PROMETHEE (PROMETHEE I, PROMETHEE II, PROMETHEE III et PROMETHEE IV) [Mareschal *et al.*, 1984] [Brans et Vincke, 1985] [Brans *et al.*, 1986], la méthode d'Organization, Rangement ET Synthèse de données relationnElles (ORESTE) [Roubens, 1982] et la méthode Elimination et de Choix Incluant les relation d'ORdre (MELCHIOR) [Leclercq, 1984], etc. Elle est considérée comme l'une des meilleures

méthodes qui assure à la fois la maximisation de certains critères et la minimisation d'autres. [Farahani et Asgari, 2007]. Cette méthode formalise le raisonnement humain et détermine, à la fin de l'analyse, un choix cohérent parmi un ensemble d'alternatives selon différents critères. En plus, elle est cappable de traiter un grand nombre de données [Collette et Siarry, 2011]. Dans la littérature, ELECTRE I est largement utilisée. Elle a fait preuve de fiabilité dans différents domaines d'application, à savoir la logistique et l'ingénierie de transport, la gestion de l'énergie, la technologie de l'information et communication, la direction financière et la gestion d'entreprise, etc. [Kumar *et al.*, 2017].

Bien que la méthode ELECTRE I répond majoritairement à nos attentes et possède plusieurs avantages, cette méthode reste limitée par le fait qu'elle ne considère pas la multiplicité des décideurs impliqués dans le processus de décision. Le choix de la meilleure alternative (ou des meilleures alternatives) se base uniquement sur les préférences d'un seul décideur. Par conséquent, elle ignore les jugements individuels des décideurs sur l'importance des différents critères d'évaluation et sur les alternatives potentielles. De ce fait, la prise en compte de la cohérence humaine dans la prise de décision est négligée [Lu *et al.*, 2007]. Afin de surmonter cette limite, nous proposons une méthode d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur [Agrebi *et al.*, 2016] [Agrebi *et al.*, 2017]. Dans laquelle nous exploitons les avantages de la méthode ELECTRE I et nous tentons à surmonter une limite de cette méthode que nous avons constaté.

Dans ce qui suit, nous présentons en détails la démarche de notre méthode MAADM.

III.3.2 Démarche de la méthode MAADM

La méthode multi-attribut multi-acteur (MAADM) proposée pour résoudre, en général, le problème de sélection multi-critère dans un environnement certain et, en particulier, le problème de sélection de la localisation des centres de distribution, repose sur les neufs étapes décrites ci-après et illustrées dans la figure III.2.

— **Étape 1 :** Constitution du comité des décideurs,

— **Étape 2 :** Identification des localisations potentielles,

— **Étape 3 :** Identification des critères d'évaluation,

— **Étape 4 :** Attribution des poids aux critères d'évaluation,

— **Étape 5 :** Évaluation des alternatives,

— **Étape 6 :** Détermination des relations entre les alternatives,

— **Étape 7 :** Conversion des relations entre les alternatives,

— **Étape 8 :** Fusion des valeurs numériques,

— **Étape 9 :** Filtrage des alternatives.

Étape 1. Constitution du comité des décideurs : Cette étape consiste à constituer un comité des décideurs impliqués dans le processus décisionnel. Au sein de ce comité, chaque décideur représente un service parmi les différents services de l'entreprise (de la distribution, de la qualité et du développement durable, etc.). Le but est de défendre les objectifs du service qui le représente. Ces objectifs pourraient être une source de conflits dans le processus de décision. À titre d'exemple, un centre de distribution qui se situe dans un endroit proche des fournisseurs et des clients constitue un bon choix du point du vue du transport, alors que du point de vue de la production, un bon centre de distribution devrait aussi se situer dans un endroit près de la main-d'œuvre et les matières premières.

Étape 2. Identification des localisations potentielles : Les emplacements potentiels sont ceux qui répondent à l'intérêt de tous les acteurs de la ville, y compris les résidents de la ville, les opérateurs logistiques et les administrations municipales, etc. [Awasthi *et al.*, 2011]. L'identification de ces localisations est basée sur la réglementation de la logistique durable, des préférences des décideurs et des conditions du transport des marchandises.

Étape 3. Identification des critères d'évaluation : Les critères (C_j où $j = 1, ..., n$) à identifier, à l'instar du coût de distribution, la sécurité et la congestion, etc., sont définis par l'entreprise selon sa stratégie du transport et de distribution.

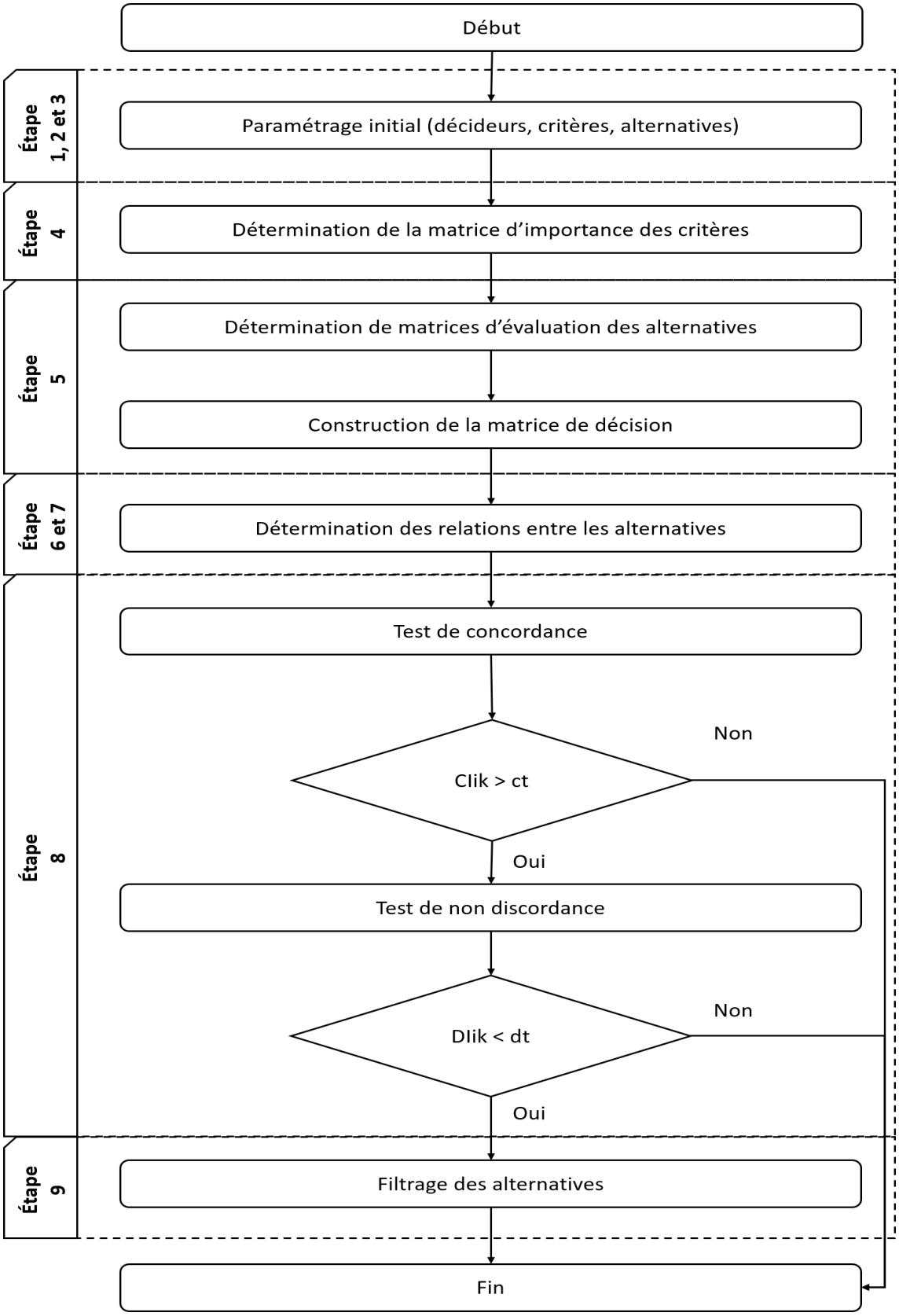


FIGURE III.2: Organigramme de la méthode MAADM

Étape 4. Détermination de poids des critères : Cette étape consiste, premièrement, à attribuer l'importance de n critères par K décideurs et, deuxièmement, à calculer le poids (w_j) de chaque critère (C_j où $j = 1, ..., n$), en se basant sur l'équation III.1. Ceci permet d'établir la matrice d'importance des critères (W) exprimée comme suit :

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & ... & w_n \end{bmatrix}$$

$$w_j = \frac{1}{K}[w_j^1 + w_j^2 + ... + w_j^K], \tag{III.1}$$

où w_j (j=1,2,...,n) est le poids du critère C_j.

Étape 5. Évaluation des alternatives : Cette étape permet, d'abord, d'évaluer m alternatives par K décideurs Elle permet, ensuite, de calculer la note (x_{ij}) de chaque alternative ($A_i, i = 1, ..., m$) en se basant sur l'équation III.2), d'où résulte la matrice de décision (D) exprimée comme suit :

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & ... & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & ... & x_{2n} \\ . & . & & . \\ . & . & & . \\ . & . & ... & . \\ x_{m1} & x_{m2} & ... & x_{mn} \end{bmatrix}$$

$$x_{ij} = \frac{1}{K}[x_{ij}^1 + x_{ij}^2 + ... + x_{ij}^K], \tag{III.2}$$

où x_{ij}, $\forall$ i,j est la note A_i (i=1,2,...,m) tout en respectant le critère C_j.

Étape 6. Détermination des relations entre les alternatives : Au niveau de cette étape, les relations (J^+, $J^=$ et J^-) entre les alternatives se déterminent par rapport à chaque critère (C_j où $j = 1, ..., n$). La comparaison par paire des alternatives (A_i et A_k où k dans $[i, ..., m]$ et $k \neq i$) est établie sur la base des équations III.3, III.4 et III.5.

$$J^{+}{}_{(A_i,A_k)} = \{j \mid C_j(A_i) > C_j(A_k)\}, \tag{III.3}$$

où $J^{+}{}_{(A_i,A_k)}$ l'ensemble de critères pour lequel l'alternative A_i est préférée à l'alternative A_k.

$$J^{=}{}_{(A_i,A_k)} = \{j \mid C_j(A_i) = C_j(A_k)\}, \tag{III.4}$$

où $J^{=}{}_{(A_i,A_k)}$ l'ensemble de critères pour lequel l'alternative A_i ne présente pas de différence face à l'alternative A_k.

$$J^{-}{}_{(A_i,A_k)} = \{j \mid C_j(A_i) < C_j(A_k)\}, \tag{III.5}$$

où $J^{-}{}_{(A_i,A_k)}$ l'ensemble de critères pour lequel l'alternative A_k est préférée à l'alternative A_i.

Étape 7. Conversion des relations entre les alternatives : Cette étape consiste à déterminer la somme des pondérations (P^{+}, $P^{=}$ et P^{-}) des critères pour chaque ensemble de comparaison (J^{+}, $J^{=}$ et J^{-}) :

$$P^{+}{}_{(A_i,A_k)} = \sum_j w_j,\ \forall j \in J^{+}{}_{(A_i,A_k)}, \tag{III.6}$$

$$P^{=}{}_{(A_i,A_m)} = \sum_j w_j,\ \forall j \in J^{=}{}_{(A_i,A_k)}, \tag{III.7}$$

$$P^{-}{}_{(a_i,A_m)} = \sum_j w_j,\ \forall j \in J^{-}{}_{(A_i,A_k)}. \tag{III.8}$$

Étape 8. Fusion des valeurs numériques : La fusion des valeurs numériques se fait par le calcul de l'indice de concordance (CI) et de discordance (DI).

— Indice de concordance (CI) : Cet indice exprime combien l'hypothèse (A_i surclasse A_k) est conforme à la réalité représentée par l'évaluation des alternatives (A_i où $i = 1, ..., m$). Nous notons que $0 \leq CI_{ik} \leq 1$.

$$CI_{ik} = \frac{P^{+}(A_i, A_k) + P^{=}(A_i, A_k)}{P(A_i, A_k)}, \tag{III.9}$$

où $P_{(A_i,A_k)} = P^{+}{}_{(A_i,A_k)} + P^{=}{}_{(A_i,A_k)} + P^{-}{}_{(A_i,A_k)}$.

— Indice de discordance (DI) :

$$DI_{ik} = \begin{cases} 0 & si \quad J^{-}(A_i, A_k) = \emptyset \\ \frac{1}{\partial_j} \times \max\left(C_j(A_k) - C_j(A_i)\right) & \text{où } j \in J^{-}(A_i, A_k),\ sinon \end{cases} \tag{III.10}$$

où ∂_j est l'amplitude de l'échelle associée au critère C_j. Nous notons que $0 \leq DI_{ik} \leq 1$.

Étape 9. Filtrage des alternatives : Cette étape permet d'extraire, à partir des alternatives potentielles A_i où $i = 1, ..., m$), l'ensemble des alternatives qui respectent l'équation III.11. À partir de cet ensemble, une alternative sera finalement retenue. C'est l'alternative qui surclasse le plus d'alternatives. Nous notons que S est la relation de surclassement ($A_i\ S\ A_k$ signifie que A_i est au moins aussi bonne que A_k).

$$\left.\begin{array}{r} CI_{ik} \geq ct \\ DI_{ik} \leq dt \end{array}\right\} \Leftrightarrow A_i\ S\ A_k \tag{III.11}$$

où :

— ct est le suil de concordance au delà duquel l'hypothèse $A_i\, S\, A_k$ sera considérée comme valable,

— dt est le suil de discordance en deça duquel l'hypothèse $A_i\, S\, A_k$ ne sera plus valable.

III.3.3 Architecture de la méthode MAADM

L'architecture de la méthode MAADM, que nous proposons, se compose de trois niveaux : le niveau utilisateur, le niveau interface utilisateur-application et le niveau d'application. La figure III.3 schématise cette architecture.

III.3.3.1 Niveau utilisateur

Dans ce niveau, les utilisateurs se sont les décideurs impliqués dans le processus de décision. Ils sont invités à exprimer leurs préférences au regard de l'importance de chaque critère d'évaluation et des alternatives potentielles. À partir de ces préférences, la matrice d'importance des critères (W) et la matrice de décision (D) se

déterminent. Ces matrices seront stockées dans la base de connaissances et serviront à la sélection de la meilleure alternative.

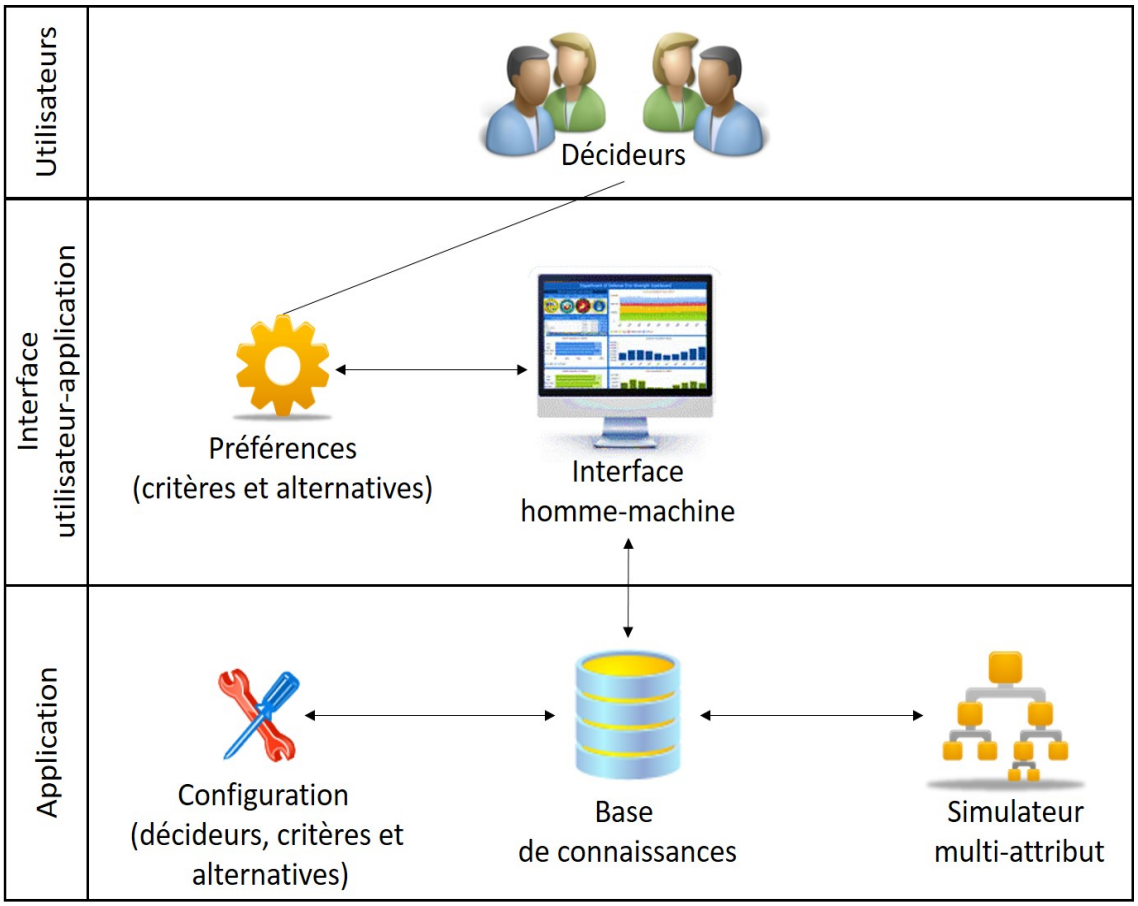


FIGURE III.3: Architecture de la méthode MAADM

III.3.3.2 Niveau interface utilisateur-application

Ce niveau regroupe les interfaces de communication entre les décideurs et l'application. Les figures suivantes présentent ces interfaces :

— la figure III.4 illustre l'interface du paramétrage de l'application : le nombre des décideurs participant dans le processus de décision, le nombre des critères d'évaluation et l'ensemble d'alternatives potentielles. Elle permet aussi la saisie des poids des critères par rapport aux préférences de chaque décideur et déclenche la détermination de la matrice d'importance des critères d'évaluation.

— la figure III.5 montre l'interface d'évaluation des alternatives face aux critères d'évaluation par rapport aux préférences de chaque décideur.

— la figure III.6 récapitule la matrice de décision (D), le test de concordance et le test de non discordance.

— l'interface III.7 illustre le graphe du surclassement des différentes alternatives ainsi qu'une analyse du résultat trouvé.

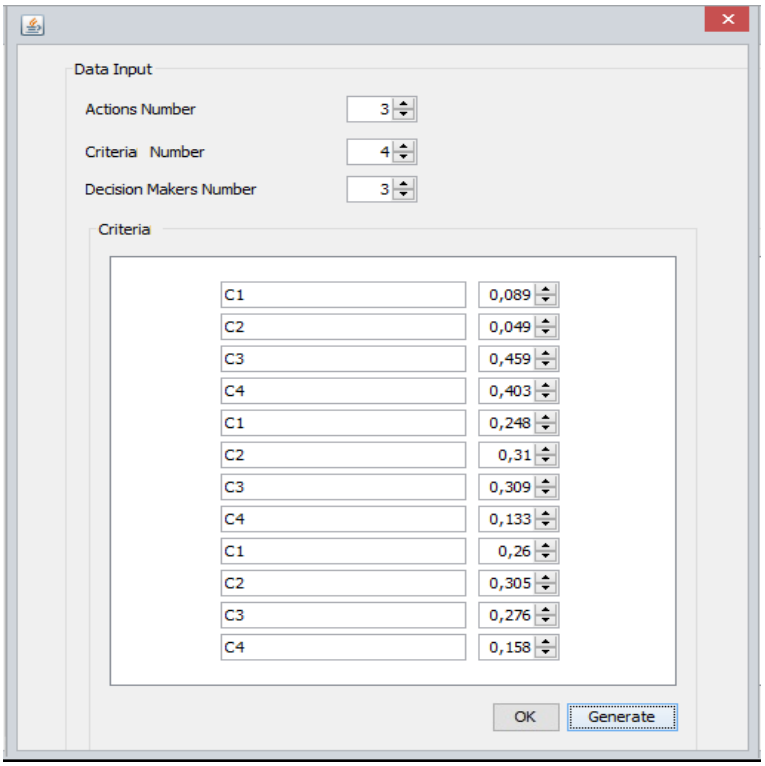
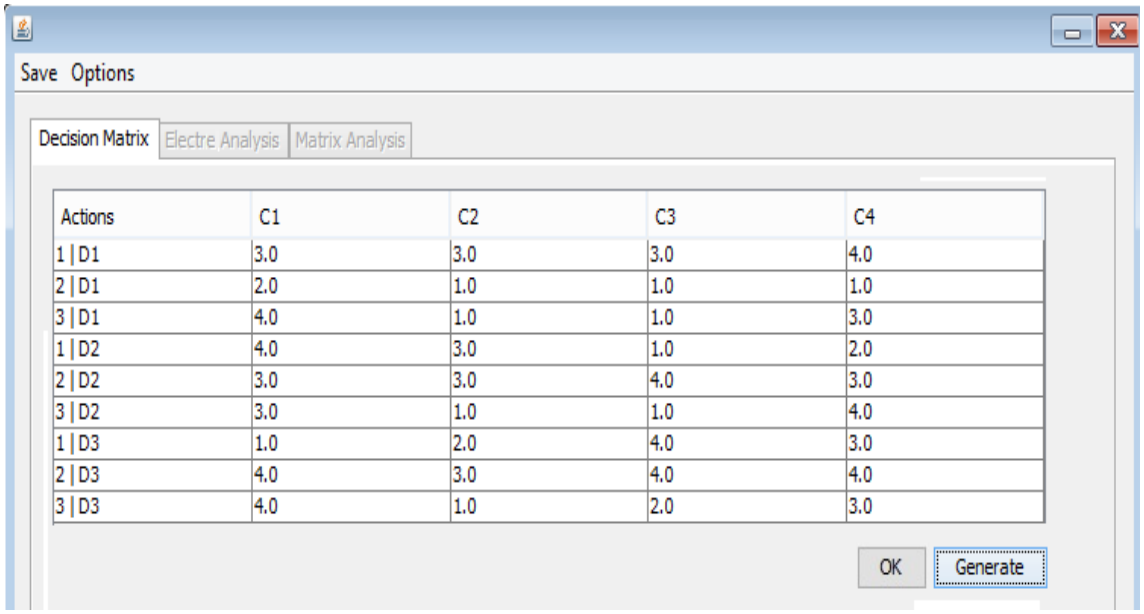


FIGURE III.4: Paramétrage de l'application et attribution de l'importance des critères

III.3.3.3 Niveau d'application

Ce niveau implémente la méthode MAADM. Il regroupe deux modules pour assurer le processus de sélection de la meilleure alternative. Ces modules sont le module de configuration et le simulateur multi-attribut.

— **Module de configuration** : ce module assure la configuration du processus de décision conformément à la politique de sélection de l'entreprise : le nombre d'alternatives à choisir, les décideurs intervenant dans la prise de décision, l'ensemble des alternatives potentielles et les critères d'évaluation.



Actions	C1	C2	C3	C4
1 | D1	3.0	3.0	3.0	4.0
2 | D1	2.0	1.0	1.0	1.0
3 | D1	4.0	1.0	1.0	3.0
1 | D2	4.0	3.0	1.0	2.0
2 | D2	3.0	3.0	4.0	3.0
3 | D2	3.0	1.0	1.0	4.0
1 | D3	1.0	2.0	4.0	3.0
2 | D3	4.0	3.0	4.0	4.0
3 | D3	4.0	1.0	2.0	3.0

FIGURE III.5: Évaluation des alternatives

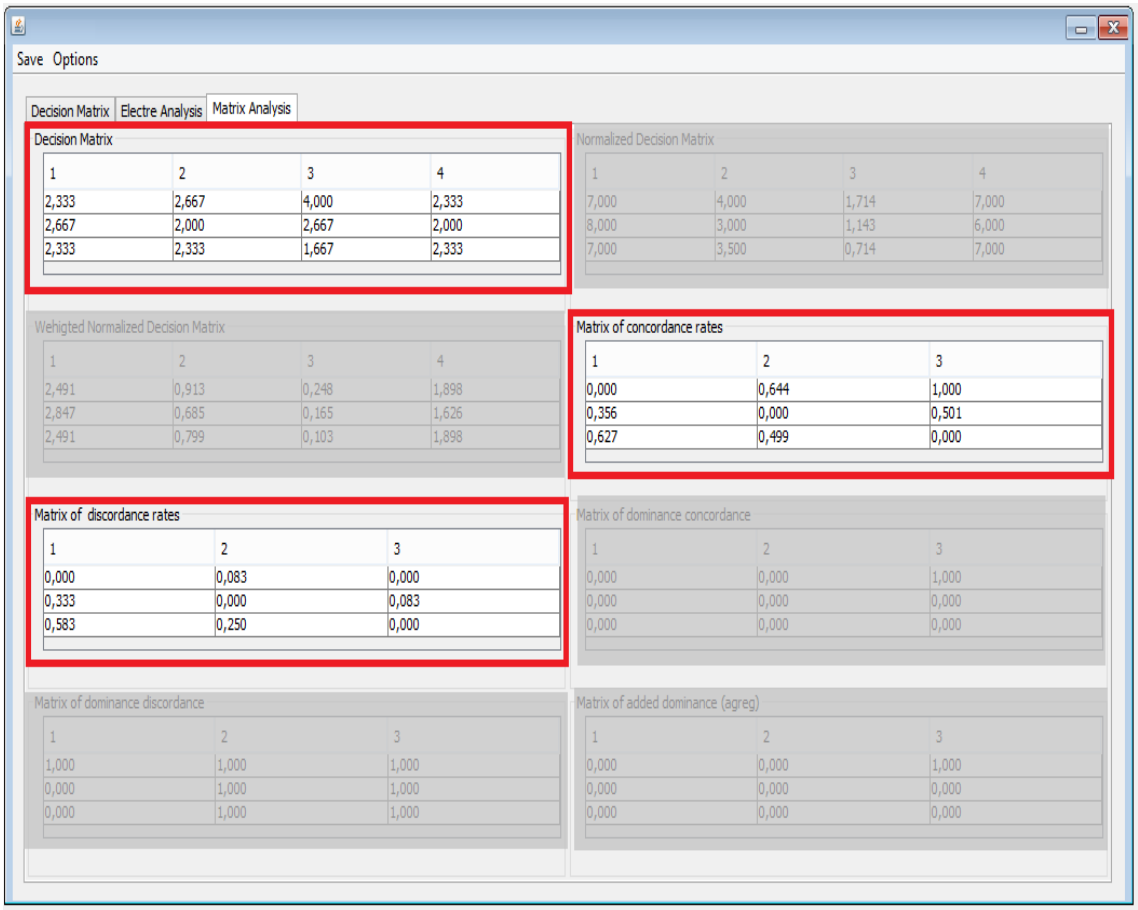


FIGURE III.6: Génération des matrices

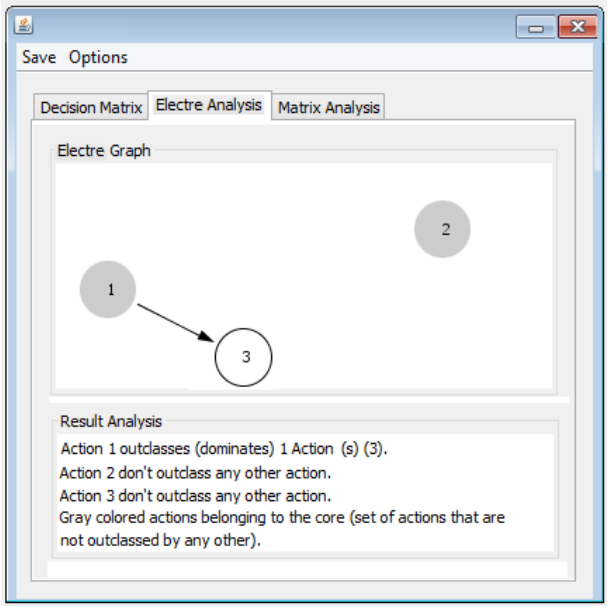


FIGURE III.7: Graphe du surclassement

— **Simulateur multi-attribut** : le simulateur est basé sur la méthode MAADM. Il génère la matrice d'importance des critères (W) et la matrice de décision (D) afin de sélectionner la meilleure alternative parmi l'ensemble des alternatives potentielles.

III.4 Méthode floue d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur

Dans cette section, nous présentons notre deuxième méthode FMAADM considérant l'aspect flou du problème de sélection. En effet, l'incertitude inhérente et l'imprécision du processus décisionnel humain ainsi que les comportements futurs du marché et des entreprises nécessitent un traitement adéquat portant non pas sur des valeurs fixes, mais plutôt sur des valeurs flous. La méthode FMAADM est basée sur notre méthode MAADM et l'approche floue proposée par [Chen, 2001] basée sur la théorie des ensembles flous et l'aide à la décision multi-attribut.

Nous commençons par présenter l'approche floue de [Chen, 2001] et nous expliquons son intégration dans la méthode FMAADM. Ensuite, nous décrivons la démarche de la méthode FMAADM et son architecture.

III.4.1 Approche floue de [Chen, 2001] : présentation et utilisation

L'approche floue de [Chen, 2001] est basée sur la théorie des ensembles flous et l'aide à la décision multi-attribut. Avant de la présenter et argumenter pourquoi nous l'avons intégré dans la méthode FMAADM, nous faisons un rappel sur les principales notions de la théorie des ensembles flous [Zadeh, 1965] [Zadeh, 1975a] [Zadeh, 1975b] [Dubois, 1980] [Buckley, 1985a] [Zimmermann, 2011] [Chen, 2001]. Ces notions seront utilisées dans la méthode FMAADM.

III.4.1.1 Notions de la théorie des ensembles flous

Un ensemble flou A est défini sur un univers de référence X par sa fonction d'appartenance μ_A qui associe à chaque élément $x \in X$ une valeur $\mu_A(x)$ dans l'intervalle [0, 1] :

— si $\mu_A(x) = 1$, alors l'élément x appartient tout à fait à A,

— si $\mu_A(x) = 0$, alors l'élément x n'appartient pas du tout à A,

— dans les cas intermédiaires, plus $\mu_A(x)$ est proche de 1, plus l'élément x appartient à A.

Selon [Neto JL, 1999], un ensemble flou discret ou continu est souvent caractérisé de façon graphique par une fonction d'appartenance appliquée sur le domaine d'une variable numérique. De cette manière, les ensembles flous sont capables de donner une représentation à des valeurs subjectives.

— **Définition 1 :** Un ensemble flou A de l'univers de référence X des nombres réels est convexe, si pour tout couple d'éléments x_1 et x_2 de X, et pour tout nombre λ de [0, 1] la fonction d'appartenance A vérifie :

$$\mu_A(x)(\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2) \geq Min(\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)). \tag{III.12}$$

— **Définition 2 :** Un ensemble flou A de l'univers de référence X des nombres réels est dit un ensemble flou normal, si au moins une valeur de sa fonction d'appartenance est égale à 1 :

$$\exists x_i \in X, \mu_A(x_i) = 1. \tag{III.13}$$

Un nombre flou n est un sous-ensemble flou de l'univers de référence X dont la fonction d'appartenance est à la fois convexe et normale comme la montre la figure III.8 de [Chen, 2001].

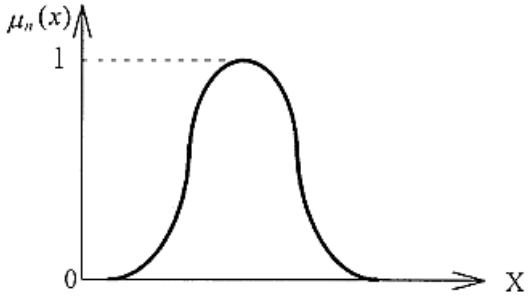


FIGURE III.8: Nombre flou n

— **Définition 3 :** α-coupes du nombre flou n est défini comme suivant :

$$n^\alpha = \{x_i : \mu_n(x_i) \geq \alpha, x_i \in X\}, \tag{III.14}$$

où $n \in [0, 1]$.

n^α est un intervalle non vide, borné, fermé et contenu dans l'univers de référence X. Il est noté : $n^\alpha = [n_l^\alpha]$ et n_u^α sont respectivement les limites inférieures et supérieures de l'intervalle fermé. La figure III.9 de [Chen, 2001] présente le nombre flou n avec α-coupes où :

$$n^{\alpha 1} = [n_l^{\alpha 1}, n_u^{\alpha 1}], [n_l^{\alpha 2}, n_u^{\alpha 2}] \tag{III.15}$$

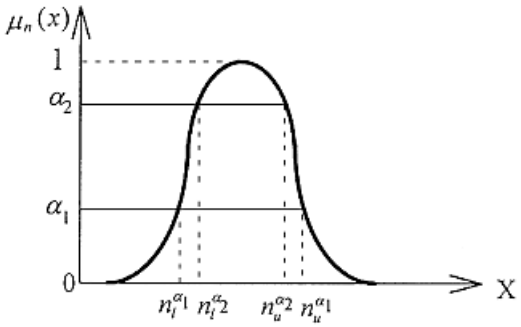


FIGURE III.9: Nombre flou n avec α-coupes

À partir de cette figure, nous pouvons voir que si $\alpha 2 \geq \alpha 1$ alors $n_l^{\alpha 2} \geq n_l^{\alpha 1}$ et $n_u^{\alpha 1} \geq n_u^{\alpha 2}$.

Un nombre flou triangulaire n est défini par le triplet (n_1, n_2, n_3) présenté à la figure III.10 de [Chen, 2001]. La fonction d'appartenance $\mu_n(x)$ est définie comme suit :

$$\mu_n(x) = \begin{cases} 0, & x < n_1, \\ \frac{x-n_1}{n_2-n_1}, & n_1 \leq x \leq n_2, \\ \frac{x-n_3}{n_2-n_3}, & n_2 \leq x \leq n_3, \\ 0, & x \geq n_3. \end{cases} \tag{III.16}$$

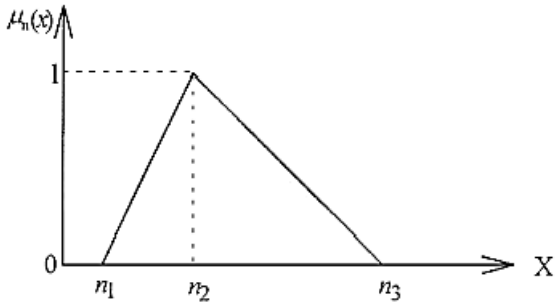


FIGURE III.10: Nombre flou triangulaire n

— **Définition 4 :** Si n est un nombre flou et $n_l^\alpha > 0$ (où $\alpha \in [0, 1]$) alors n est dit un nombre flou positif.

Soient deux nombres flous positifs m et n et un nombre réel positif r, α-coupes des deux nombres flous est $m^\alpha = [m_l^\alpha, m_u^\alpha]$ et $n^\alpha = [n_l^\alpha, n_u^\alpha]$ ($\alpha \in [0, 1]$). Selon l'intervalle de confiance, certaines opérations principales des nombres flous

positifs m et n peuvent être exprimées comme suit :

$$(m+n)^{\alpha} = [m_l^{\alpha} + n_l^{\alpha}, m_u^{\alpha} + n_u^{\alpha}], \tag{III.17}$$

$$(m-n)^{\alpha} = [m_l^{\alpha} - n_u^{\alpha}, m_u^{\alpha} - n_l^{\alpha}], \tag{III.18}$$

$$(m.n)^{\alpha} = [m_l^{\alpha}.n_l^{\alpha}, m_u^{\alpha}.n_u^{\alpha}], \tag{III.19}$$

$$(m:n)^{\alpha} = [\frac{m_l^{\alpha}}{n_u^{\alpha}}, \frac{m_u^{\alpha}}{n_l^{\alpha}}], \tag{III.20}$$

$$(m^{\alpha})^{-1} = [\frac{1}{m_u^{\alpha}}, \frac{1}{m_l^{\alpha}}], \tag{III.21}$$

$$(m.r)^{\alpha} = [m_l^{\alpha}.r, m_u^{\alpha}.r], \tag{III.22}$$

$$(m:r)^{\alpha} = [\frac{m_l^{\alpha}}{r}, \frac{m_u^{\alpha}}{r}]. \tag{III.23}$$

— **Définition 5 :** A est dite matrice floue, si au moins une entrée de A est un nombre flou.

— **Définition 6 :** Si n est un nombre flou et $n_l^{\alpha} > 0$, $n_u^{\alpha} \leq 1$ (où α in [0,1]), alors n est dit un nombre flou positif normalisé.

— **Définition 7 :** Une variable linguistique est une variable dont les valeurs sont des termes linguistiques.

Le concept de variable linguistique est très utile pour traiter des situations trop complexes ou trop mal définies pour être raisonnablement décrites dans des expressions quantitatives conventionnelles. Ces variables linguistiques peuvent également être représentées par des nombres flous.

III.4.1.2 Principe, démarche et utilisation de l'approche de [Chen, 2001]

L'approche floue proposée par [Chen, 2001] pour résoudre le problème de sélection de la localisation des centres de distribution combine les concepts de la théorie des ensembles flous et de l'aide à la décision multi-attribut. Elle traite le problème en question dans un environnement incertain.

Dans cette approche, les évaluations de chaque alternative et le poids de chaque critère sont décrits par des variables linguistiques exprimées en nombres flous triangulaires. La valeur d'évaluation finale de chaque localisation du centre de distribution est également exprimée en nombre flou triangulaire. En calculant la différence de la valeur d'évaluation finale entre chaque paire de localisations des centres de distribution, une matrice de relation de préférence floue est construite pour représenter l'intensité des préférences d'un emplacement du centre de distribution par rapport à un autre. Ensuite, une procédure de classement des différentes localisations est proposée pour déterminer l'ordre de classement de tous les emplacements potentiels.

Dans la littérature, la théorie des ensembles flous, sur laquelle se base la théorie floue de [Chen, 2001] a eu un impact sur les techniques de classification et a contribué à la proposition de nouvelles approches pour l'aide à la décision [Chen, 2000] [Chen, 2001] [Rebaa, 2003] [Chu et Lai, 2005] [Hwang et Thill, 2005] [Kaya et Çinar, 2006] [Kahraman *et al.*, 2006] [Zhou et Liu, 2007] [Bashiri et Hosseininezhad, 2009] [Li *et al.*, 2011] [Ertuğrul, 2011] [Takači *et al.*, 2012] [Trivedi et Singh, 2017] [Awasthi *et al.*, 2018]. En effet, cette théorie permet de traiter l'incertitude en se basant sur l'idée d'ordre. En outre, elle se base sur une méthodologie de représentation et d'utilisation de connaissances imprécises, vague et incertaine, appelée théorie du raisonnement approché, plus connue sous le vocable de logique floue. En plus, elle considère des classes d'objets dont les frontières ne sont pas clairement déterminées, par l'introduction d'une fonction d'appartenance des objets à la classe, prenant des valeurs entre zéro et un.

Pour l'ensemble de ces raisons, nous étendons la méthode MAADM [Agrebi *et al.*, 2016] [Agrebi *et al.*, 2017] en intégrant l'approche floue de [Chen, 2001] couplant la théorie des ensembles flous et de l'aide à la décision multi-attribut. Dans la suite de cette section, nous détaillons la démarche de la méthode FMAADM et son architecture.

III.4.2 Démarche de la méthode FMAADM

Notre deuxième méthode, que nous proposons dans le cadre de cette thèse pour résoudre le problème de sélection (α) dans un environnement incertain, est une méthode floue d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur (FMAADM). Cette dernière s'articule sur les dix étapes présentées dans l'organigramme illustré dans la figure III.11 :

1. Constitution du comité des décideurs,
2. Identification des localisations potentielles,
3. Identification des critères d'évaluation,
4. Détermination des poids flous des critères,
5. Évaluation des alternatives et construction de la matrice de décision floue,
6. Construction de la matrice de décision floue normalisée,
7. Établissement des relations entre les alternatives par rapport à chaque critère,
8. Conversion des relations entre alternatives en valeurs numériques,
9. Fusion des valeurs numériques,
10. Filtrage des alternatives.

Étape 1. Constitution du comité des décideurs : Cette étape consiste à former, à partir de divers départements (la distribution, la qualité et le développement durable, etc.), le comité des décideurs. Le but est de refléter le cas général de la demande et de traiter le problème de sélection dans une perspective large en y incluant des points de vue différents [Turkoglu et Genevois, 2017].

Étape 2. Identification des localisations potentielles : Cette étape consiste à choisir m alternatives potentielles des emplacements des centres de distribution ($A_i, i = 1, ..., m$) conformément aux réglementations de marchandises durables, les préférences des décideurs et les conditions du transport des marchandises.

Étape 3. Identification des critères d'évaluation : Cette étape consiste à identifier n critères d'évaluation (C_j où $j = 1, ..., n$) (par exemple, l'accessibilité, la sécurité et la pollution, etc.). En comparant avec ces critères, les alternatives seront évaluées.

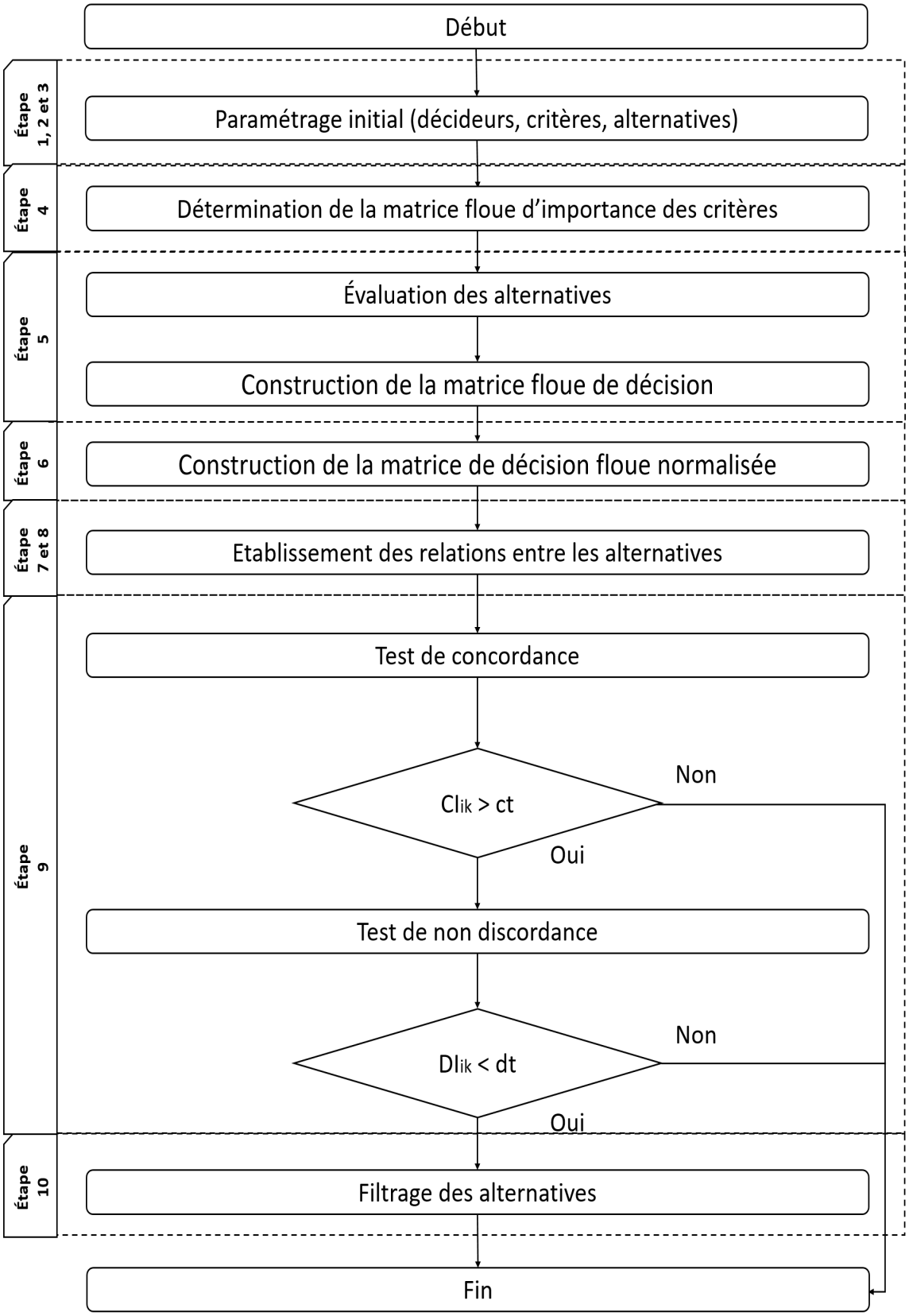


FIGURE III.11: Organigramme de la méthode FMAADM

Étape 4. Détermination des poids flous des critères : Cette étape consiste à attribuer l'importance de n critères par K décideurs . Cette attribution permet d'établir la matrice d'importance des critères (W) basée sur l'équation III.24, exprimée comme suit :

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & ... & w_n \end{bmatrix}.$$

$$w_j = \frac{1}{K}[w_j^1 + w_j^2 + ... + w_j^K], \tag{III.24}$$

où w_j (j= 1, 2,..., n) est le poids du critère C_j.

Étape 5. Évaluation des alternatives et construction de la matrice de décision floue : Cette étape consiste, premièrement, à évaluer m alternatives face aux critères d'évaluation (C_j, où $j = 1, ..., n$) par K décideurs et, deuxièmement, à construire la matrice de décision floue (D) basée sur l'équation III.25, exprimée comme suit :

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & ... & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & ... & x_{2n} \\ . & . & & . \\ . & . & & . \\ . & . & ... & . \\ x_{m1} & x_{m2} & ... & x_{mn} \end{bmatrix},$$

où x_{ij}, $\forall$ i, j est la note de l'alternative A_i (i= 1, 2,..., m) en respectant le critère C_j (où $j = 1, ..., n$).

$$x_{ij} = \frac{1}{K}[x_{ij}^1 + x_{ij}^2 + ... + x_{ij}^K] \tag{III.25}$$

Étape 6 : Construction de la matrice de décision floue normalisée : Cette étape repose sur la normalisation de la matrice de décision floue (D), en utilisant la procédure de normalisation linéaire, afin d'assurer que les évaluations vont couvrir l'intervalle des plages de nombres flous triangulaires normalisés $[0, 1]$. Il résulte, ainsi, la matrice de décision floue normalisée désignée par R exprimée comme suit :

$$R = \left[r_{ij} \right]_{m\,.\,n}, \tag{III.26}$$

$$r_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \quad \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \quad \frac{c_{ij}}{c_j^*} \right), \; j \in B,$$

$$r_{ij} = \left(\frac{\bar{a}}{c_{ij}}, \quad \frac{\bar{a}}{b_{ij}}, \quad \frac{\bar{a}}{a_{ij}} \right), \; j \in C,$$

$$c_j^* = \max_i c_{ij} \qquad si \;\; j \in B,$$

$$\bar{a}_j = \min_i \bar{a}_{ij} \quad si \;\; j \in C,$$

où r_{ij} est la valeur normalisée de x_{ij}, B et C représentent l'ensemble des critères du type bénéfice et coût, respectivement.

Compte tenu de l'importance de chaque critère, la valeur finale de l'évaluation floue de chaque alternative est définie comme suit :

$$P_i = r_{ij} \,.\, w_j, \; i = 1, 2, ..., m, \tag{III.27}$$

où P_i est la valeur finale de l'évaluation floue de l'alternative A_i.

Étape 7. Établissement des relations entre les alternatives par rapport à chaque critère : Cette étape permet de déterminer, tout en respectant chaque critère, les relations entre les alternatives. La comparaison par paire des alternatives (A_i et A_k où k dans $[i, ..., m]$ et $k \neq i$) est établie comme suit :

$$J^+{}_{(A_i, A_k)} = \{ j \mid C_j(A_i) > C_j(A_k) \}, \tag{III.28}$$

où $J^+{}_{(A_i, A_k)}$ est l'ensemble de critères pour lesquels l'alternative A_i est préférée.

$$J^={}_{(A_i, A_k)} = \{ j \mid C_j(A_i) = C_j(A_k) \}, \tag{III.29}$$

où $J^={}_{(A_i, A_k)}$ est l'ensemble de critères pour lequel l'alternative A_i ne présente pas de différence face à l'alternative A_k.

$$J^{-}{}_{(A_i,A_k)} = \{j \mid C_j(A_i) < C_j(A_k)\}, \tag{III.30}$$

où $J^{-}{}_{(A_i,A_k)}$ est l'ensemble de critères pour lequel l'alternative A_k est préférée.

Étape 8. Conversion des relations entre les alternatives en valeurs numériques : Au niveau de cette étape, la somme de poids des critères est calculée pour chaque ensemble de critères comme suit :

$$P^{+}{}_{(A_i,A_k)} = \sum_j w_j, \ \forall j \in J^{+}{}_{(A_i,A_k)}, \tag{III.31}$$

$$P^{=}{}_{(A_i,A_k)} = \sum_j w_j, \ \forall j \in J^{=}{}_{(A_i,A_k)}, \tag{III.32}$$

$$P^{-}{}_{(A_i,A_k)} = \sum_j w_j, \ \forall j \in J^{-}{}_{(A_i,A_k)}. \tag{III.33}$$

Étape 9. Fusion des valeurs numériques : Cette étape permet de fusionner les valeurs numériques, à partir du calcul des deux indices suivants :

— Indice de concordance (CI) : Cet indice exprime combien l'hypothèse (A_i surclasse A_k) est conforme à la réalité représentée par les évaluations des alternatives.

$$CI_{ik} = \frac{P^{+}(A_i, A_k) + P^{=}(A_i, A_k)}{P(A_i, A_k)}, \tag{III.34}$$

où $P_{(A_i,A_k)} = P^{+}{}_{(A_i,A_k)} + P^{=}{}_{(A_i,A_k)} + P^{-}{}_{(A_i,A_k)}$.

— Indice de discordance (DI) :

$$DI_{ik} = \begin{cases} 0 & si \quad J^{-}(A_i, A_k) = \emptyset \\ \frac{1}{\partial_j} \times \max\left(C_j(A_k) - C_j(A_i)\right) & \text{où } j \in J^{-}(A_i, A_k), \ sinon \end{cases} \tag{III.35}$$

où ∂_j est l'amplitude de l'échelle associée au critère C_j.

Étape 10. Filtrage des alternatives : Cette étape permet d'extraire, à partir des alternatives potentielles A_i où $i = 1, ..., m$, l'ensemble des alternatives qui respectent l'équation III.36. À partir de cet ensemble, une alternative sera finalement retenue. C'est l'alternative qui surclasse le plus d'alternatives. Nous notons que S est la relation de surclassement (A_i S A_k signifie que A_i est au moins aussi bonne

que A_k).

$$\left.\begin{array}{l} CI_{ik} \geq ct \\ DI_{ik} \leq dt \end{array}\right\} \Leftrightarrow A_i \ S \ A_k \tag{III.36}$$

III.4.3 Architecture de la méthode FMAADM

L'architecture de la méthode FMAADM se compose également de trois niveaux comme la méthode MAADM, à savoir le niveau utilisateur, le niveau interface utilisateur-application et le niveau d'application. La figure III.12 donne une vue générale sur l'interaction entre ces trois niveaux.

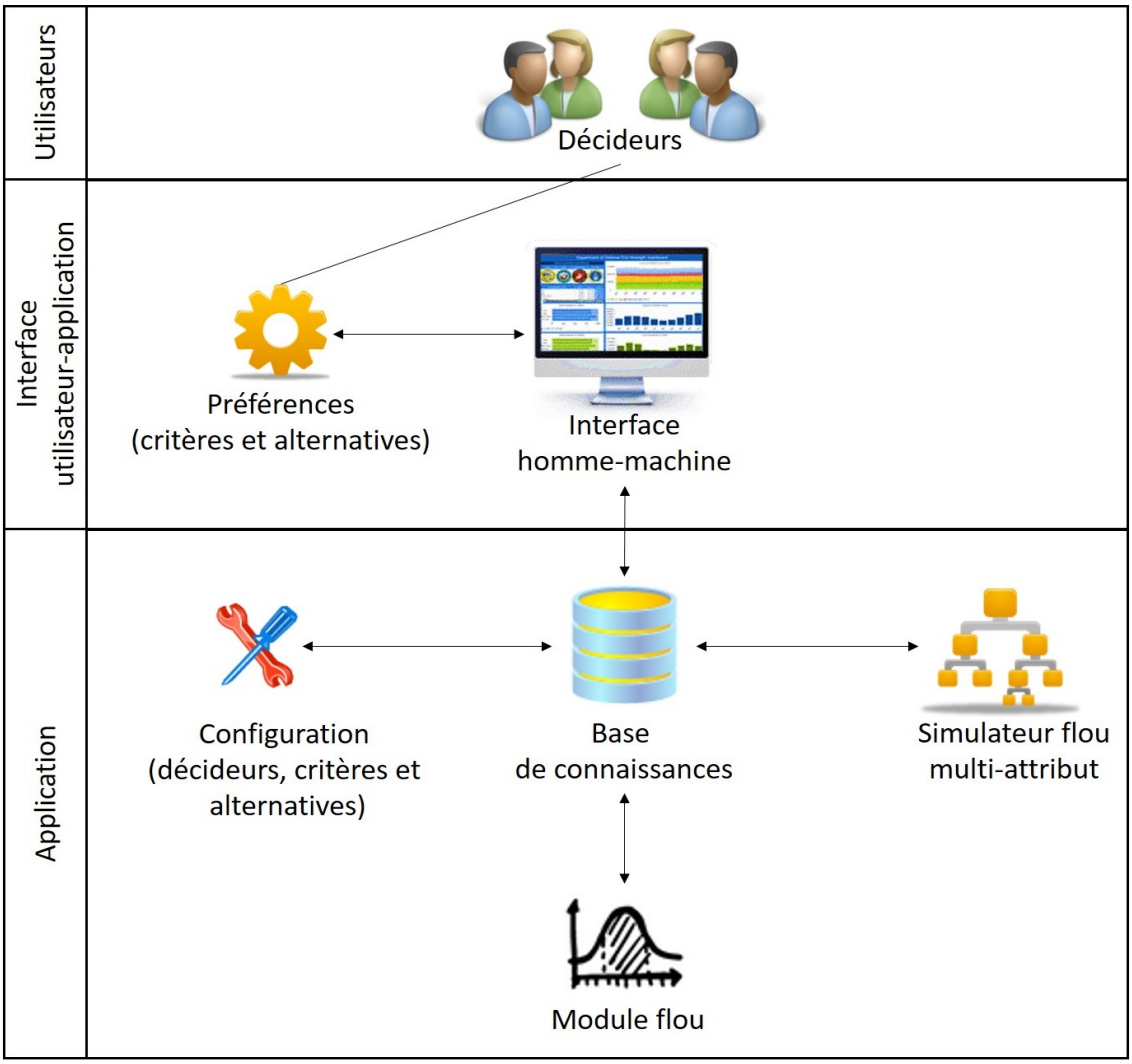


FIGURE III.12: Architecture de la méthode FMAADM

Contrairement à la méthode MAADM, le niveau d'application de l'architecture de la méthode FMAADM apporte un module supplémentaire. C'est **le module flou** illustré dans la figure III.13. Le rôle de ce module est d'accommoder les paramètres incertains appartenant au processus de la sélection. Le décideur communique les variables linguistiques, afin d'exprimer, dans un premier temps, son point de vue concernant l'importance des différents critères d'évaluation et, dans un deuxième temps, sa satisfaction à propos des alternatives potentielles comparées face aux critères d'évaluation. Par la suite, le module flou traduit l'équivalence en nombres flous triangulaires.

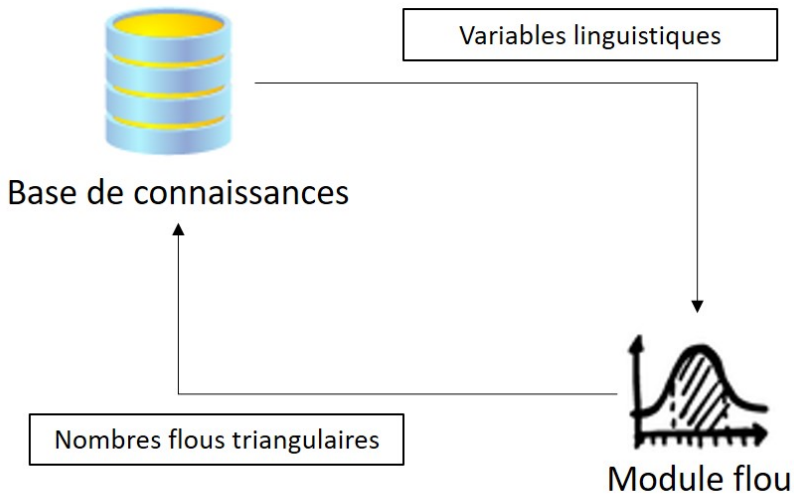


FIGURE III.13: Module flou du niveau d'application de la méthode FMAADM

Dans le même niveau, le simulateur multi-attribut de la méthode MAADM est remplacé par **un simulateur flou multi-attribut**. Ce simulateur est basé sur la méthode FMAADM. Il est développé pour générer les préférences des décideurs reposant sur des variables linguistiques représentées par de nombres flous triangulaires. Le but est de trouver la meilleure alternative parmi l'ensemble des alternatives potentielles.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé deux méthodes d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur, la méthode MAADM et la FMAADM. Le but de ces méthodes est d'aider un ensemble des décideurs à sélectionner la meilleure alternative parmi un ensemble d'alternatives potentielles face à un ensemble de critères.

La méthode MAADM est basée sur la méthode ELimination Et Choix Traduisant la REalité I (ELECTRE I) [Roy, 1968] [Collette et Siarry, 2011]. Son rôle est de résoudre le problème de sélection dans un environnement certain où les paramètres sont fixes. L'originalité de cette méthode, par rapport à la version classique de la méthode ELECTRE I, est sa capacité à partager la prise de décision entre plusieurs décideurs.

La méthode FMAADM combine la méthode MAADM [Agrebi *et al.*, 2016] [Agrebi *et al.*, 2017] et l'approche proposée par [Chen, 2001], basée sur la théorie des ensembles flous et l'aide à la décision multi-attribut. Le but de cette deuxième méthode est de résoudre le problème de la sélection dans un environnement incertain caractérisé par des paramètres flous. Celle-ci est indispensable lorsque la nature de la décision à prendre, d'une part, est stratégique avec un impact à long terme et, d'autre part, est basée sur des préférences humaines et des comportements futurs du marché souvent ambigus et incertains. Dans ce cadre, nous avons présenté, les paramètres nécessaires pour la prise de décision en utilisant les nombres flous triangulaires.

Pour la vérification de la stabilité des résultats obtenus par la méthode MAADM et la méthode FMAADM, nous proposons d'appliquer l'analyse de sensibilité en variant les poids des critères utilisés pour évaluer les différentes alternatives potentielles.

Le chapitre qui suit montre via deux exemples numériques l'applicabilité de la méthode MAADM et la méthode FMAADM sur le problème de sélection de la localisation des centres de distribution dans un environnement certain/incertain. Cette décision s'effectue par un groupe de décideurs face à différents critères d'évaluation.

Chapitre IV

Études expérimentales et analyses des résultats

Sommaire

IV.1 Introduction **96**

IV.2 Modélisation conceptuelle du S-DSS **97**

IV.3 Étude de cas : Application de la méthode MAADM . . **104**

IV.3.1 Présentation de l'étude de cas 104

IV.3.2 Application de la méthode MAADM 106

IV.3.3 Analyse de sensibilité 113

IV.4 Étude de cas : Application de la méthode FMAADM . **116**

IV.4.1 Présentation de l'étude de cas 116

IV.4.2 Application de la méthode FMAADM 118

IV.5 Conclusion **130**

IV.1 Introduction

Pour établir le consensus nécessaire entre un problème de prise de décision et la méthode pour lequel il est conçu, [Bouyssou *et al.*, 2006] soulignent quatre types de validation :

1. La validation conceptuelle : vise à vérifier si les concepts utilisés dans la méthode, pour décrire les préoccupations et la situation problématique du client, sont significatifs pour elle. C'est-à-dire que le client les comprend et les trouve utiles. En d'autres termes, le client et l'analyste doivent se mettre d'accord sur la pertinence et l'utilité de chaque concept pour le problème posé.
2. La validation logique : s'intéresse à vérifier si les concepts et les outils utilisés dans la méthode sont logiquement cohérents et significatifs (du point de vue de la théorie utilisée). Cela n'implique pas nécessairement que le client est cohérent dans ses affirmations, mais que la méthode traite l'information de manière cohérente (y compris les incohérences et ambiguïtés possibles).
3. La validation expérimentale : teste la méthode en utilisant des données expérimentales afin de montrer qu'elle fournit les résultats attendus et éventuellement vérifier les exigences formelles telle que la sensibilité aux variations des paramètres.
4. La validation opérationnelle : montre que la méthode face au processus de décision pour lequel elle a été conçue agit comme prévu et que le décideur peut effectivement l'utiliser dans un tel processus de décision.

Pour se faire, nous présentons une première étude de cas portant sur la sélection d'une meilleure localisation des centres de distribution dans un environnement certain où les paramètres sont fixes. Nous traitons cette étude de cas en appliquant la méthode MAADM. Par la suite, nous appliquons une analyse de sensibilité, basée sur douze expériences, pour vérifier la sensibilité de la méthode MAADM vis-à-vis des variations de poids attribués aux critères d'évaluation.

Nous présentons, aussi, une deuxième étude de cas portant sur la sélection d'une meilleure localisation des centres de distribution dans un environnement incertain où les poids des critères d'évaluation et les évaluations des alternatives sont décrits sous forme des variables linguistiques exprimées en nombres flous triangulaires. Nous résolvons cette étude de cas en utilisant la méthode FMAADM.

La résolution des deux études de cas est menée par un système d'aide à la décision (S-DSS) que nous avons développé. Ce dernier peut être utilisé pour résoudre les problèmes de sélection multi-attribut et multi-acteur dans l'environnement certain/incertain. Nous notons que les données utilisées dans les deux études de cas traitées, dans ce cadre expérimental, sont générées automatiquement via notre système SDSS.

IV.2 Modélisation conceptuelle du S-DSS

Notre système d'aide à la décision S-DSS constitue un environnement pour les différentes étapes du processus de décision de la sélection dans un environnement certain/incertain. Il implémente les algorithmes de la méthode MAADM et la méthode FMAADM proposées. L'architecture de ce système est présentée dans la figure [Agrebi *et al.*, 2018].

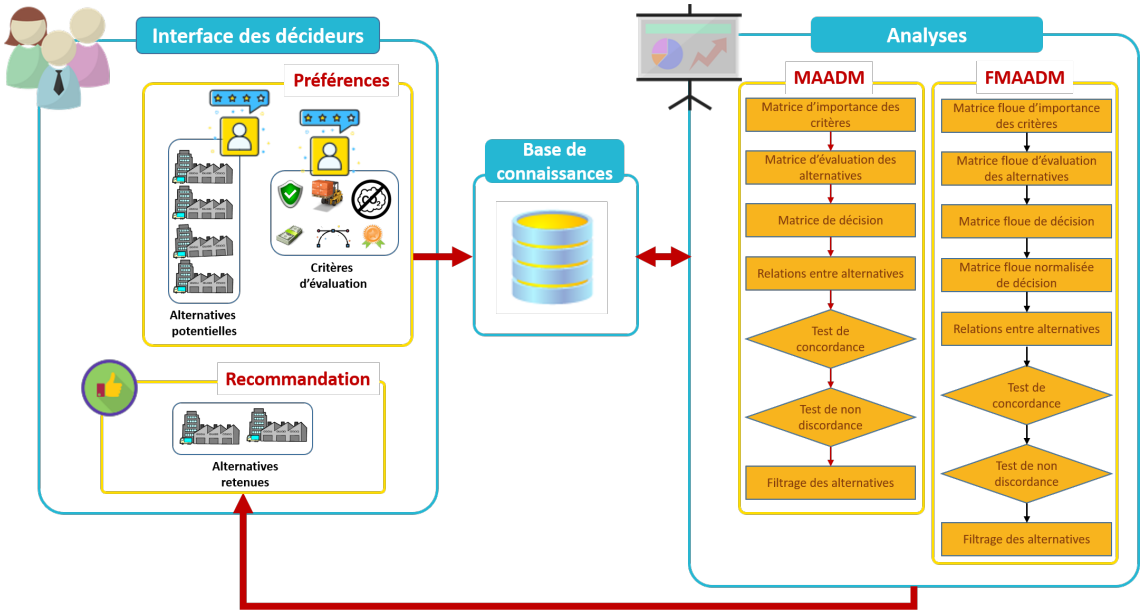


FIGURE IV.1: Architecture du S-DSS

S-DSS est implémenté avec JAVA 8. Eclipse (https://eclipse.org/) a été sélectionné comme l'environnement de développement approprié. En outre, ce système utilise le format XML (https://www.w3.org/XML/) pour la transmission et le stockage de l'information (sauvegarde des études et les projets réalisés). Il utilise aussi certains APIs telles que Apache POI (https://poi.apache.org/), JDBC (http://www.or-acle.com/technetwork/java/javase/jdbc/index.html) afin de gérer les données qui peuvent être extraites des fichiers Excel.

Les utilisateurs du système S-DSS peuvent générer des données automatiquement à l'aide d'un générateur aléatoire ou d'une source de données existante et manuellement. En effet, les utilisateurs que ce soit administrateur ou décideur peuvent accéder au système S-DSS, mais l'utilisation varie de l'administrateur au décideur.

Dans ce qui suit nous apportons plus de détails au système S-DSS. Pour se faire, nous présentons sa conception modélisée avec le Langage de Modélisation Unifié (UML).

— **Diagramme de cas d'utilisation** :

  La figure IV.2 illustre les différentes opérations pouvant être réalisées par l'administrateur. La figure IV.3 schématise les opérations accessibles par le décideur.

— **Diagramme de classes :**

  Le diagramme des classes du S-DSS figure IV.4. Il modélise les différentes classes utilisées ainsi que les différentes relations entre celles-ci.

— **Diagramme de séquence :**

  Étant donné que le diagramme de séquence met en œuvre l'enchaînement chronologique des échanges de messages entre les objets, nous nous limitons à représenter deux cas : l'évaluation des critères et des alternatives présentée à la figure IV.5 et l'éxécution du processus de sélection illustrée par la figure IV.6.

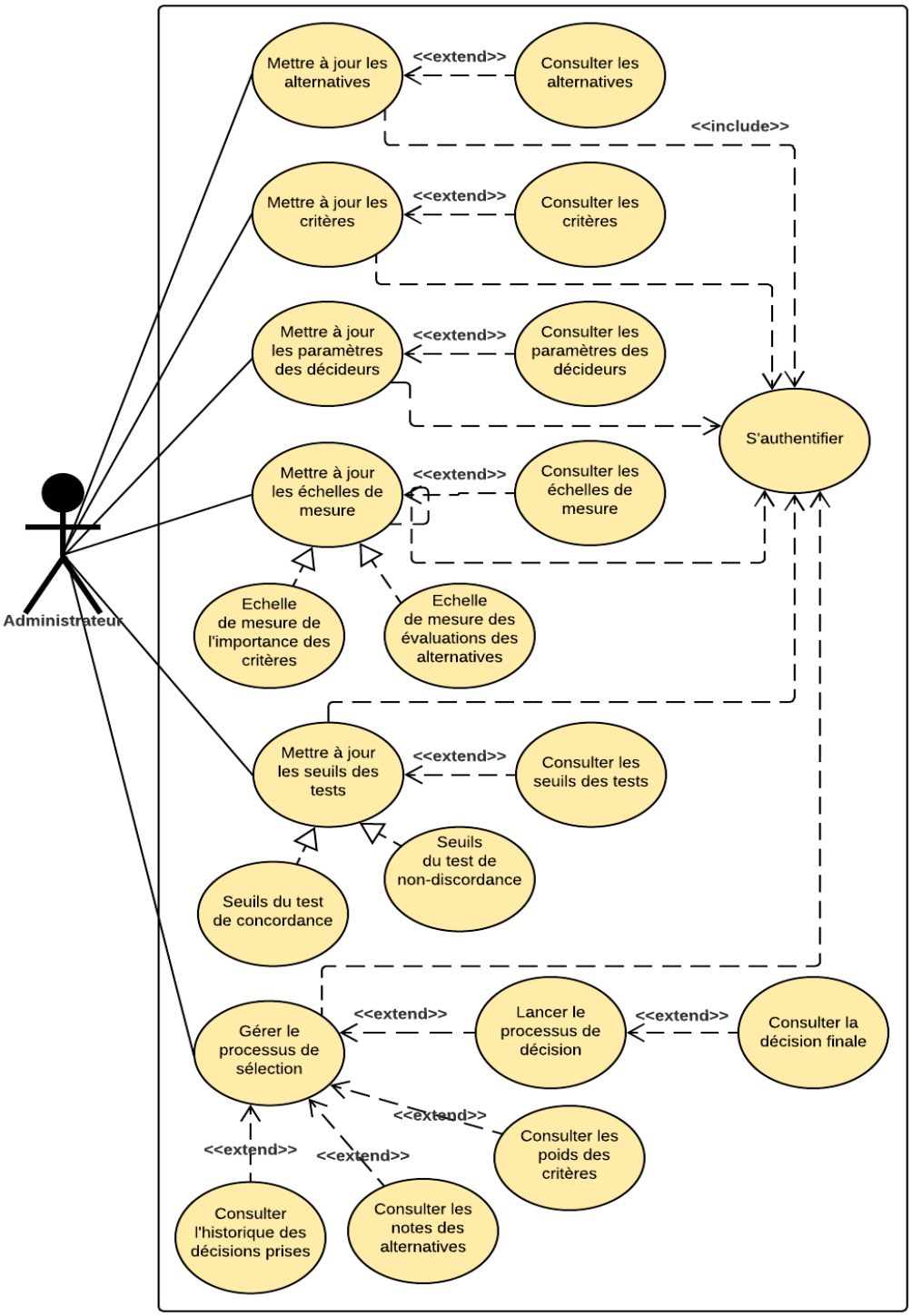


FIGURE IV.2: Diagramme de cas d'utilisation : Vue de l'administrateur

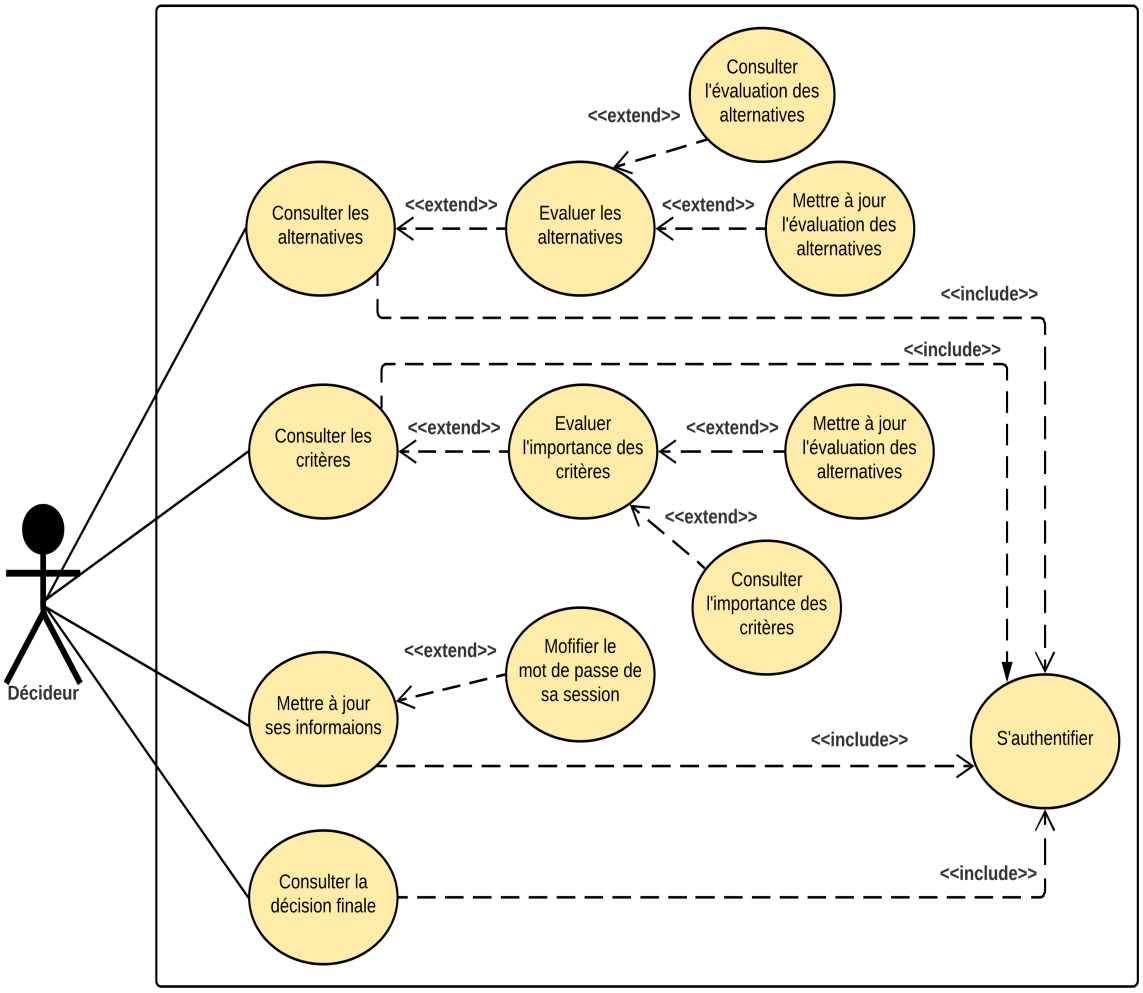


FIGURE IV.3: Diagramme de cas d'utilisation : Vue du décideur

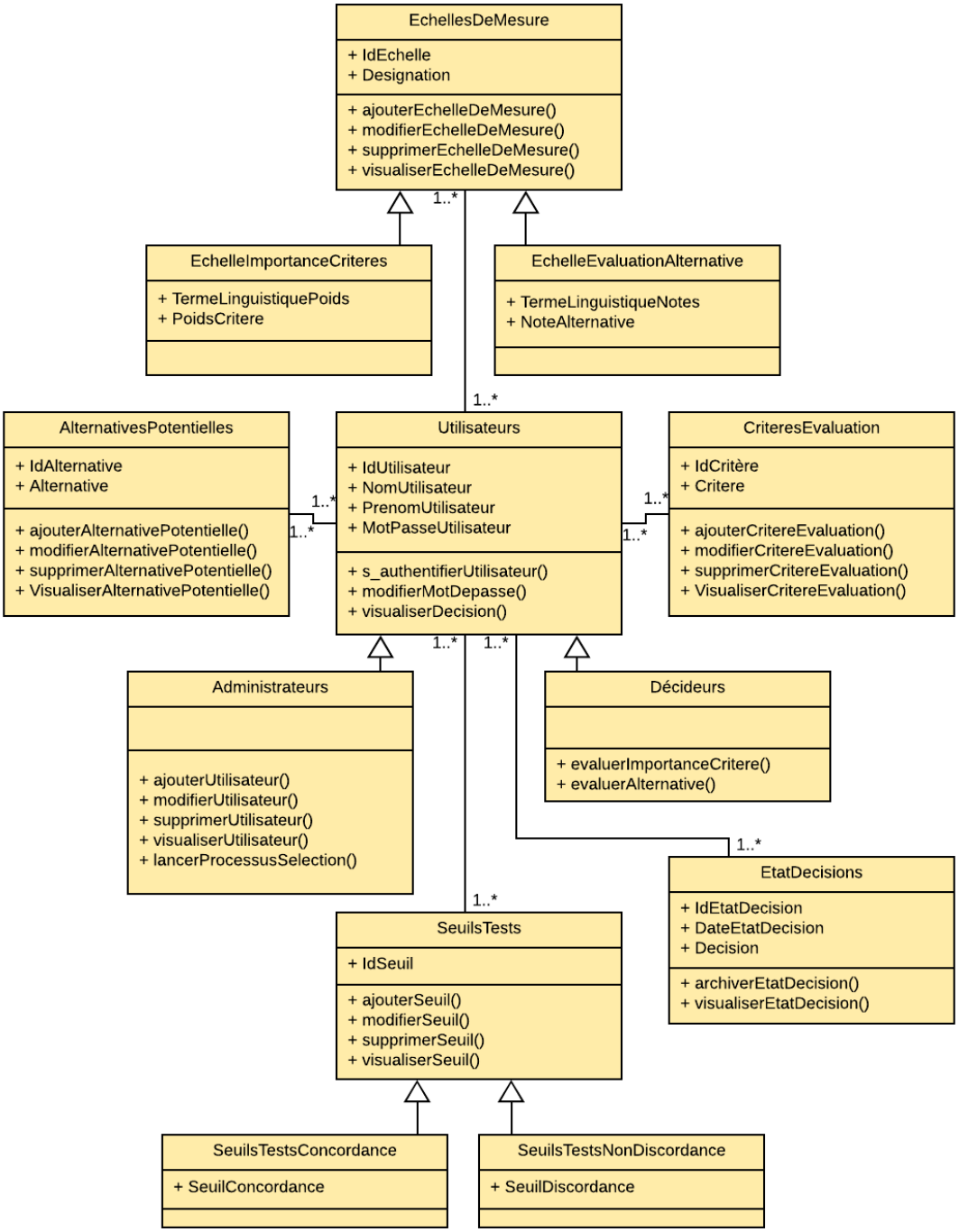


FIGURE IV.4: Diagramme de classes

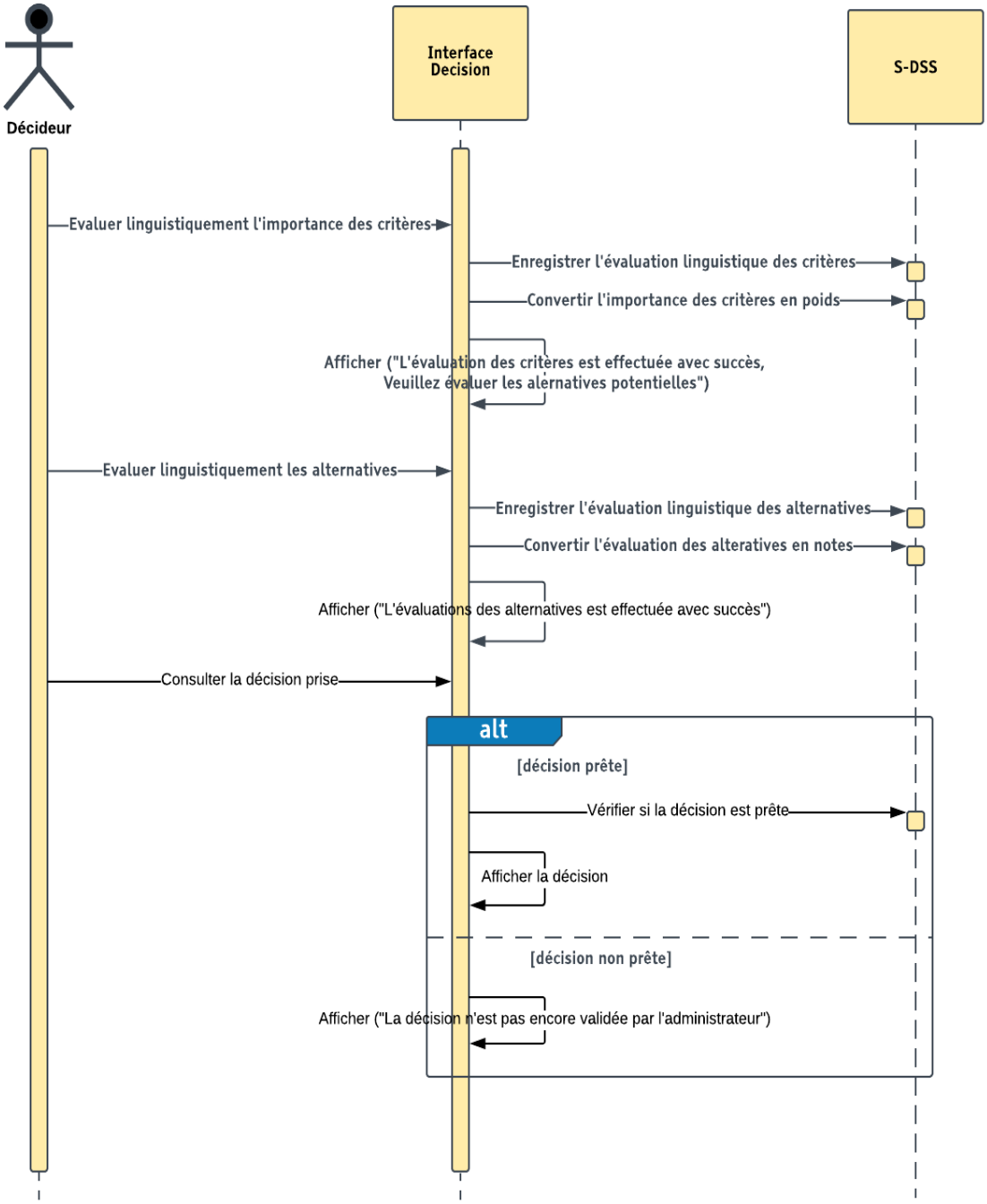


FIGURE IV.5: Diagramme de Séquence : Évaluation des critères et des alternatives

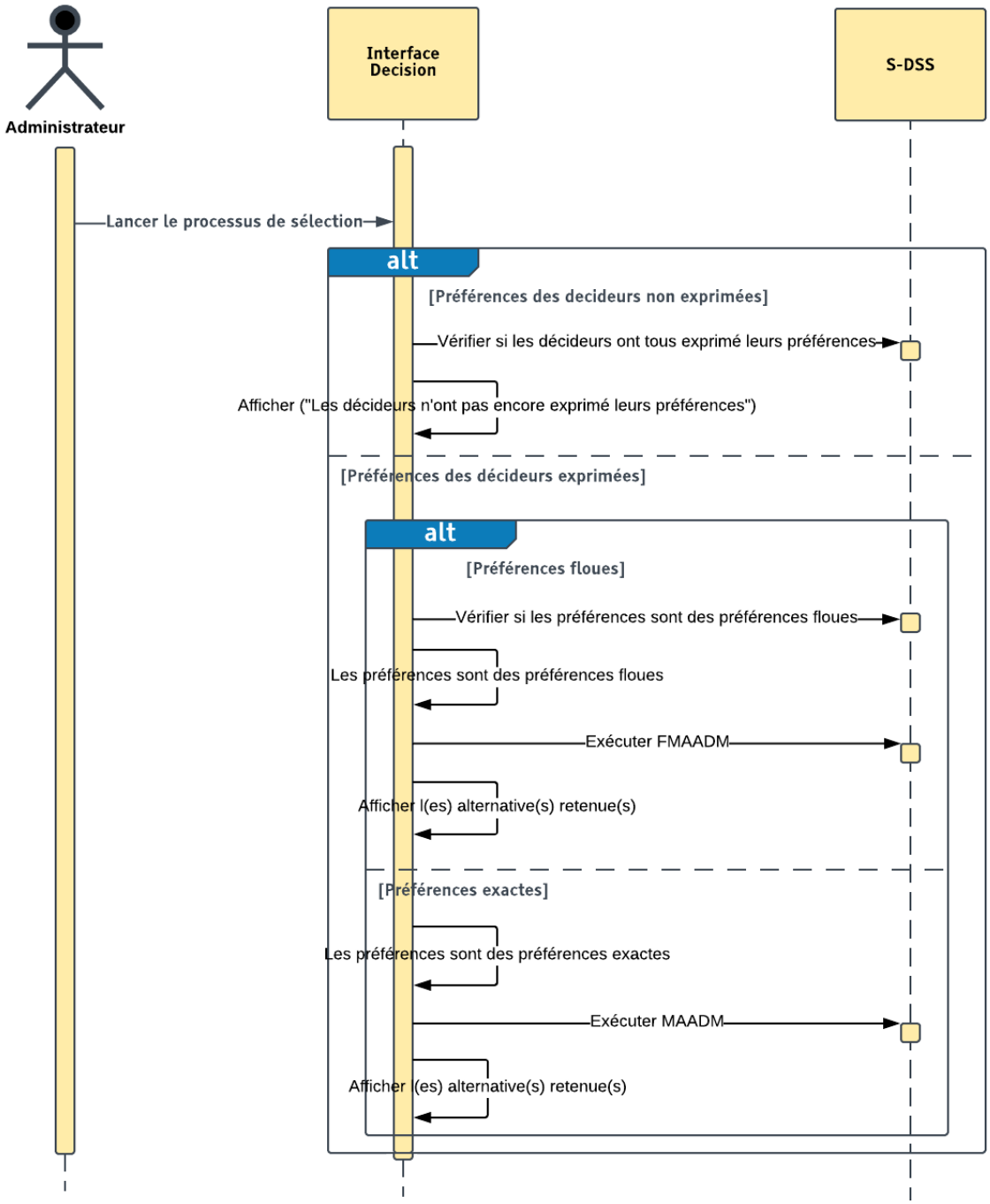


FIGURE IV.6: Diagramme de Séquence : Exécution du processus de sélection

IV.3 Étude de cas : Application de la méthode MAADM

Dans cette section, nous décrivons la première étude de cas du point de vue alternatives, critères et décideurs appartenant au processus de décision de la meilleure alternative. Ensuite, nous détaillons l'application de la méthode MAADM et les résultats obtenus. Enfin, nous menons une analyse de sensibilité pour vérifier la stabilité des résultats obtenus vis-à-vis de la variation de poids des critères d'évaluation.

IV.3.1 Présentation de l'étude de cas

Dans cette première étude de cas, nous appliquons notre méthode, MAADM, sur un exemple numérique portant sur la sélection, dans un environnement certain, d'une localisation d'un centre de distribution parmi trois alternatives potentielles (A_1, A_2 et A_3). La décision est prise par trois décideurs (D_1, D_2 et D_3) qui exercent leur choix sur la base des six critères d'évaluation suivants :

— (C_1) la sécurité,

— (C_2) la connectivité au transport multimodal,

— (C_3) les coûts,

— (C_4) la proximité des clients,

— (C_5) la proximité des fournisseurs,

— (C_6) la conformité aux règles du transport durable.

Les définitions des critères d'évaluation sont données dans la table IV.1. Cette table montre l'ensemble des critères du type bénéfice (B) et des critères du type coût (C) qui sont respectivement B= $\{C_1, C_2, C_4$, C_5 et $C_6\}$ et C= $\{C_3\}$.

L'architecture du problème de sélection traité dans cette étude cas est illustrée à la figure IV.7.

TABLE IV.1: Critères d'évaluation utilisés dans l'environnement certain

Critère	**Définition**	**Unité**	**Type**
Sécurité (C_1)	Sécurité contre les accidents	Qualitatif	Bénéfice
Connectivité au transport multimodal (C_2)	Connectivité de l'emplacement avec les modes de transport	Quantitatif	Bénéfice
Coûts (C_3)	E.g. coût des ressources des véhicules et coûts fonciers	Quantitatif	Coût
Proximité des clients (C_4)	Distance entre le centre de distribution et le client	Quantitatif	Bénéfice
Proximité des fournisseurs (C_5)	Distance entre le centre de distribution et les fournisseurs	Quantitatif	Bénéfice
Conformité aux règles du transport durable (C_6)	Capacité de se conformer aux restrictions de transport durable imposées par les autorités publiques.	Qualitatif	Bénéfice

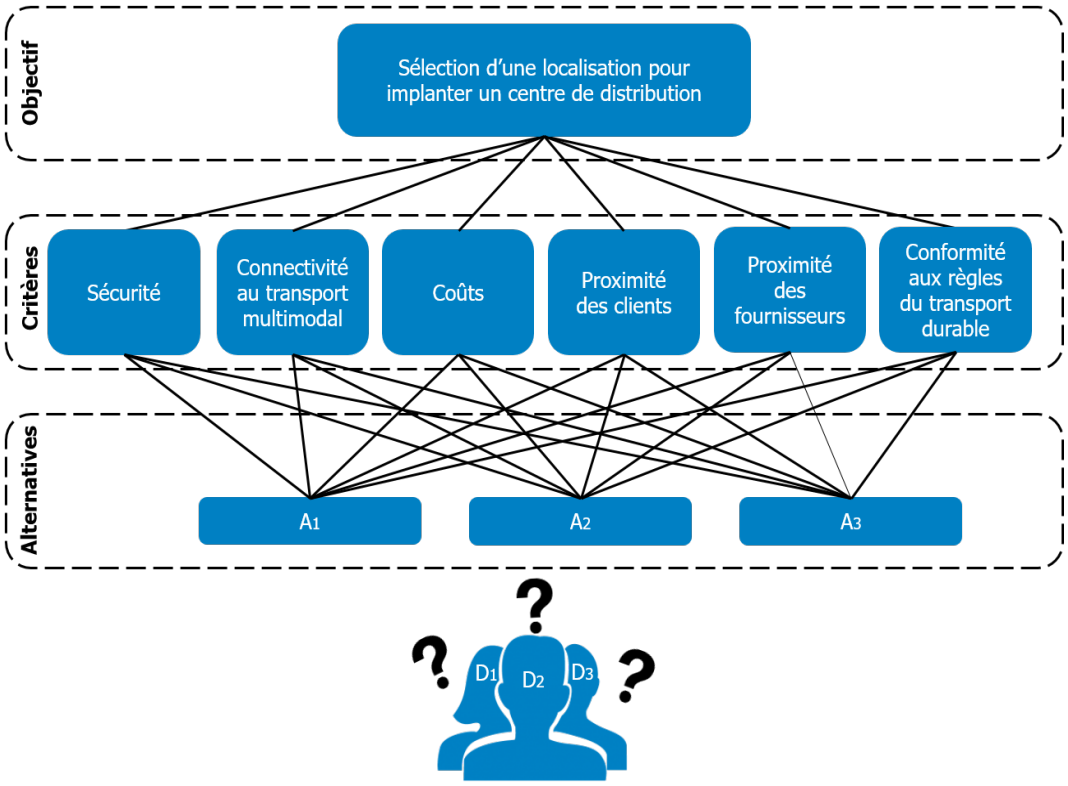


FIGURE IV.7: Structure hiérarchique du problème de sélection de la localisation des centres de distribution dans un environnement certain

IV.3.2 Application de la méthode MAADM

Pour aider les décideurs (D_1, D_2 et D_3) à trouver la meilleure localisation des centres de distribution parmi les trois alternatives (A_1, A_2 et A_3) face aux six critères (C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 et C_6) dans un environnement certain dont les paramètres sont fixes, nous appliquons notre méthode MAADM. Cette application est détaillée ci-après :

— **Construction de la matrice d'importance des critères (W) :**

Tout d'abord, chaque décideur ($K = 1, 2, 3$), selon ses préférences, estime linguistiquement l'importance de chaque critère d'évaluation (C_j où $j = 1, ..., 6$). Les estimations sont, ensuite, converties en poids ($W_1^1, ..., W_6^3$), à l'aide de l'échelle de mesure figurée dans la table IV.2. La table IV.3 récapitule l'importance attribuée à chaque critère par décideur.

Par la suite, le poids final de chaque critère d'évaluation ($W_1, ..., W_6$) est calculé par l'équation III.1. De ce calcul résulte la matrice d'importance des critères d'évaluation (W) présentée dans la table IV.4.

Exemple : $W_1 = \frac{1}{K}\left[w_1^1 + w_1^2 + w_1^3\right]$

$= \frac{1}{3}\left(0,099 + 0,251 + 0,218\right) = 0,189$

TABLE IV.2: Variables linguistiques de l'importance des critères

Termes linguistiques	**Poids**
Très faible (VL)	[0 - 0,2[
Faible (L)	[0,2 - 0,4[
Moyen (M)	[0,4 - 0,6[
Fort (H)	[0,6 - 0,8[
Très fort (VH)	[0,8 - 1]

TABLE IV.3: Importance attribuée aux critères d'évaluation

Critères	**Décideurs**		
	D_1	D_2	D_3
C_1	(VL) 0,099	(L) 0,251	(L) 0,218
C_2	(VL) 0,082	(VL) 0,072	(L) 0,219
C_3	(L) 0,323	(L) 0,212	(VL) 0,184
C_4	(VL) 0,105	(VL) 0,029	(L) 0,238
C_5	(VL) 0,068	(L) 0,233	(VL) 0,049
C_6	(L) 0,322	(L) 0,203	(L) 0,091

TABLE IV.4: Matrice d'importance des critères d'évaluation

Critères	**Poids**
C_1	0,189
C_2	0,124
C_3	0,239
C_4	0,124
C_5	0,116
C_6	0,205

— **Construction de la matrice de décision (D) :**

De même, l'évaluation linguistique des trois alternatives (A_1, A_2 et A_3) face aux critères (C_1, ..., C_6) s'effectue par décideur ($K = 1, 2, 3$) en utilisant l'échelle de mesure présentée dans la table IV.5. A l'aide de cette échelle, les évaluations linguistiques des alternatives par décideur face à un critère donné sont converties en notes ($W_{11}^1, ..., W_{36}^3$). Cette évaluation est résumée à la table IV.6.

La matrice de décision (D) résulte par du calcul de la note finale (x_{ij}) de chaque alternative face à un critère en utilisant l'équation III.2 et est donnée dans la table IV.7.

Exemple : $x_{11} = \frac{1}{3}\left[x_{11}^1 + x_{11}^2 + x_{11}^3\right]$

$= \frac{1}{3}(3 + 3 + 2) = 2,667$

TABLE IV.5: Variables linguistiques pour l'évaluation des alternatives

Termes linguistiques	**Notes**
Très faible (VP)	1
Faible (P)	2
Passable (F)	3
Bien (G)	4
Très bien (VG)	5

TABLE IV.6: Matrice de décision

Critères	**Alternatives**	**Décideurs**		
		D_1	D_2	D_3
C_1	A_1	(F) 3	(F) 3	(P) 2
	A_2	(G) 4	(VP) 1	(VP) 1
	A_3	(VP) 1	(F) 3	(F) 3
C_2	A_1	(G) 4	(G) 4	(P) 2
	A_2	(VP) 1	(P) 2	(F) 3
	A_3	(F) 3	(VP) 1	(P) 2
C_3	A_1	(G) 4	(P) 2	(F) 3
	A_2	(VP) 1	(G) 4	(P) 2
	A_3	(P) 2	(G) 4	(P) 2
C_4	A_1	(F) 3	(VP) 1	(VP) 1
	A_2	(VP) 1	(VP) 1	(G) 4
	A_3	(VP) 1	(G) 4	(VP) 1
C_5	A_1	(G) 4	(VP) 1	(VP) 1
	A_2	(G) 4	(G) 4	(G) 4
	A_3	(G) 4	(G) 4	(F) 3
C_6	A_1	(P) 2	(F) 3	(G) 4
	A_2	(VP) 1	(P) 2	(F) 3
	A_3	(F) 3	(VP) 1	(P) 2

TABLE IV.7: Matrice de décision

Critères	**Alternatives**	**Notes**
C_1	A_1	2,667
	A_2	2
	A_3	2,333
C_2	A_1	3,333
	A_2	2
	A_3	2
C_3	A_1	3
	A_2	2,333
	A_3	2,667
C_4	A_1	1,667
	A_2	2
	A_3	2
C_5	A_1	2
	A_2	4
	A_3	3,667
C_6	A_1	3
	A_2	2
	A_3	2

— **Détermination des relations entre les alternatives :**

Une fois la matrice de décsion (D) est construite, en utilisant les équations III.3, III.4 et III.5, nous effectuons des comparaisons par paires entre couples d'alternatives A_i et A_k (où $k \in [1, 2, 3]$ et $k \neq i$) en fonction de leur note finale (x_{ij}) face à un critère donné (C_j où $j = 1, ...6$). Ces comparaisons sont décomposées en fonction des relations de préférence, notamment $J^{=}(A_i, A_k)$, $J^{+}(A_i, A_k)$ et $J^{-}(A_i, A_k)$.

Le résultat obtenu à la fin de cette étape est un ensemble d'indices représentant les critères qui devraient vérifier les relations de préférence pour un couple d'alternative donné comme le présentent les tables IV.8, IV.9 et IV.10.

Exemple : x_{11}= 2,667 $> x_{21} = 2$. Alors, la relation de préférence entre A_1 et A_2 est $J^{+}(A_1, A_2)$. Cela signifie que A_1 est préférée à A_2 face à C_1.

TABLE IV.8: Résumé des relations de préférence J^+

Alternatives	A_1	A_2	A_3
A_1	-	{1, 2, 3, 6}	{1, 2, 3, 6}
A_2	{4, 5}	-	{5}
A_3	{4, 5}	{1, 3}	-

TABLE IV.9: Résumé des relations de préférence J^-

Alternatives	A_1	A_2	A_3
A_1	-	{4, 5}	{4, 5}
A_2	{1, 2, 3, 6}	-	{1, 3}
A_3	{1, 2, 3, 6}	{5}	-

TABLE IV.10: Résumé des relations de préférence $J^=$

Alternatives	A_1	A_2	A_3
A_1	-	$\emptyset$	$\emptyset$
A_2	$\emptyset$	-	{2, 4, 6}
A_3	$\emptyset$	{2, 4, 6}	-

— **Conversion des relations entre les alternatives en valeurs numériques :**

À la suite de l'obtention des ensembles d'indices représentant les critères vérifiant les relations de préférence pour un couple d'alternative donné, nous convertissons ces ensembles en valeurs numériques en utilisant les équations III.6, III.7 et III.8. Pour chaque ensemble, nous déterminons la somme de poids des critères appartenant à chaque famille $P^+(A_i, A_k)$, $P^=(A_i, A_k)$ et $P^-(A_i, A_k)$ comme les indiquent les tables IV.11, IV.12 et IV.13.

Exemple : A_1 est préférée à A_2 face aux critères C_1, C_2, C_3 et C_6.

$$\text{D'où } P^+_{1,2} = W_1 + W_2 + W_3 + W_6$$
$$= 0,189 + 0,124 + 0,239 + 0,205 = 0,757$$

TABLE IV.11: Résumé concernant les P_{ik+}

Alternatives	A_1	A_2	A_3
A_1	-	0,757	0,757
A_2	0,24	-	0,116
A_3	0,24	0,428	-

TABLE IV.12: Résumé concernant les P_{ik-}

Alternatives	A_1	A_2	A_3
A_1	-	0,24	0,24
A_2	0,757	-	0,428
A_3	0,757	0,116	-

TABLE IV.13: Résumé concernant les $P_{ik=}$

Alternatives	A_1	A_2	A_3
A_1	-	$\emptyset$	$\emptyset$
A_2	$\emptyset$	-	0,453
A_3	$\emptyset$	0,453	-

— **Fusion des valeurs numériques :**

La fusion des valeurs numériques est obtenue en déterminant les indices de concordance CI_{ik}, et les indices de discordance DI_{ik} afin d'obtenir les matrices de concordance CI et de discordance DI présentées dans les tables IV.14 et IV.15. Pour cette étape, nous utilisons les équations III.9 et III.10.

Exemples : $CI_{1,2} = \frac{P^+(A_1,A_2)+P^=(A_1,A_2)}{P(A_1,A_2)}$

$$= \frac{0{,}757+0}{0{,}757+0{,}24}$$

$$= 0,759$$

$$DI_{1,2} = \frac{1}{\partial_j} \times \max\left(C_j(A_2) - C_j(A_1)\right)$$

$$= \frac{1}{4} \times \left(C_5(A_2) - C_5(A_1)\right)$$

$$= \frac{1}{4} \times (4-2) = 0,5$$

TABLE IV.14: Résumé concernant les coefficients de concordance CI_{ik}

Alternatives	A_1	A_2	A_3
A_1	-	0,759	0,759
A_2	0,241	-	0,570
A_3	0,241	0,883	-

TABLE IV.15: Résumé concernant les coefficients de discordance DI_{ik}

Alternatives	A_1	A_2	A_3
A_1	-	0,5	0,417
A_2	0,399	-	0,111
A_3	0,399	0,083	-

— **Filtrage des alternatives :**

À partir des résultats obtenus précédemment, il devient ainsi possible de déterminer la meilleure alternative. Pour se faire, nous réalisons un test de concordance et un test de non discordance en utilisant l'équation III.11.

Pour le premier test, le test de concordance, nous prenons le seuil ct égale à $0,7$ [Collette et Siarry, 2011]. Ce test est satisfait si $CI_{(ik)} \geq 0,7$. À partir de la table IV.14, les $CI_{(ik)}$ qui satisfont le test de concordance sont $CI_{(1,2)}$, $CI_{(1,3)}$ et $CI_{(3,2)}$.

Pour le deuxième test, le test de non discordance, nous prenons le seuil dt égale à $0,3$ [Collette et Siarry, 2011]. Ce test est satisfait si $DI_{(ik)} \leq 0,3$. À partir de la table IV.15, seuls DI_{23} et DI_{32} satisfont ce test.

Sur la base de ces deux tests, nous pouvons conclure que l'alternative A_3 surclasse A_2, étant donné la relation $CI_{(3,2)}$ et la relation de discordance $DI_{(3,2)}$ sont les deux vérifiées. Contrairement à la relation de surclassement du couple d'alternatives (A_1, A_2) et la relation de surclassement du couple d'alternative (A_1, A_3) qui ne sont pas vérifiées, étant donné $CI_{(1,2)}$ et $CI_{(1,3)}$ satisfont le test de concordance et $DI_{(1,2)}$ et $DI_{(1,3)}$ ne satisfont pas les test de non-discordance.

Cela signifie que la relation (A_3, A_2) est la seule relation de surclassement valable, car elle est suffisamment concordante et aussi suffisamment discordante avec l'hypothèse «A_3 surclasse A_2». De ce fait, la meilleure alternative est bien l'alternative A_3.

Nous représentons ces résultats dans le graphe illustré dans la figure IV.8. Cette figure montre la relation de surclassement entre le couple d'alternative A_3, A_2 (A_3SA_2 et non A_2SA_3) et aussi la relation d'incomparabilité entre le

couple d'alternative A_3, A_1 (non A_3SA_1 et non A_1SA_3) et le couple d'alternative A_2, A_1 (non A_2SA_1 et non A_1SA_2).

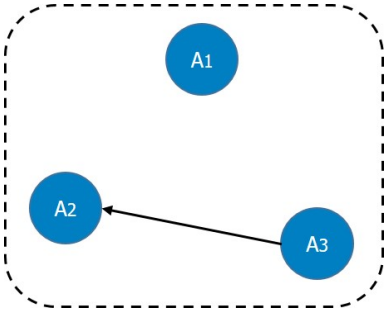


FIGURE IV.8: Graphe des relations entre alternatives

IV.3.3 Analyse de sensibilité

Cette section a pour objectif de mener une analyse de sensibilité, basée sur plusieurs scénarios. L'objectif est de vérifier la stabilité des résultats obtenus vis-à-vis de la variation de poids des critères utilisés pour évaluer les différentes alternatives potentielles.

[Maystre *et al.*, 1994] définissent l'analyse de sensibilité comme étant une analyse qui consiste à répéter l'analyse multi-critère 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.

Selon [Awasthi *et al.*, 2011], cette analyse aborde la question suivante « quelle est la sensibilité de la décision finale vis-à-vis des variations des poids attribués aux critères d'évaluation pendant le processus de comparaison par paires ? ». Cette question est solutionnée en variant légèrement les valeurs des poids et en observant les effets sur la décision. Ainsi, [Awasthi *et al.*, 2011] décrivent la démarche de cette analyse reposant, d'abord, sur l'identification des critères ayant les poids les plus élevés, ensuite, sur le changement de pondération axé sur les critères ayant le plus d'influence sur la décision.

Pour se faire, nous appliquons la méthode MAADM dans douze expériences tout en variant à chaque expérience les poids des critères d'évaluation. Cela, nous permet d'étudier l'impact du changement de poids des critères d'évaluation sur la sélection de la meilleure localisation des centres de distribution dans un environnement certain.

La table IV.16 montre les poids attribués aux critères d'évaluation et la (les) localisation(s) retenue(s) dans chaque expérience.

— Pour les cinq premières expériences, les poids attribués aux six critères sont égaux respectivement à 0,2 dans la première expérience, 0,4 dans la deuxième expérience, 0,6 dans la troisième expérience, 0,8 dans la quatrième expérience et 1 dans la cinquième expérience.

— De la sixième expérience à la onzième expérience, à chaque expérience nous attribuons à un critère le poids le plus élevé parmi les poids qui figurent dans l'échelle de mesure de l'importance des critères (table IV.3). Ce poids est égale à 1. Pour le reste des critères, nous attribuons le poids le plus bas parmi les poids de la même échelle de mesure. Ce poids est égale à 0,2.

— Concernant la douzième expérience, le poids du critère C_3, appartenant aux critères de type coût, est égale à 0,2 (le poids le plus bas). Pour le reste des critères C_1, C_2, C_4, C_5 et C_6 appartenant aux critères de type bénéfice leur poids sont fixés à 1 (le poids le plus élevé).

À partir des résultats obtenus, nous constatons que parmi les douze scénarios étudiés en variant les poids de différents critères d'évaluation, il y a huit expériences (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 12) qui font apparaitre l'alternative A_3 comme la meilleure localisation. L'alternative A_2 apparaît comme la meilleure alternative dans la dixième expérience. Le reste des expériences (7, 9 et 11), les deux alternatives A_2 et A_3 sont les meilleurs emplacements.

Par conséquent, nous concluons que la décision de sélection de la localisation est relativement insensible aux poids des critères de type coût. Ce constat est vérifié par la huitième et douzième expérience où le poids du critère de coût C_3 est défini comme le poids le plus élevé (égale à 1) ou bien par le poids le plus bas (égale à 0.2), alors la meilleure solution est toujours l'alternative A_3.

TABLE IV.16: Analyse de sensibilité

Numéro d'expérience	**Descriptions**	**Localisation retenue**
1	Tous les poids des critères = 0,2	A_3
2	Tous les poids des critères = 0,4	A_3
3	Tous les poids des critères = 0,6	A_3
4	Tous les poids des critères = 0,8	A_3
5	Tous les poids des critères = 1	A_3
6	Poids du critère $C_1 = 1$ Poids des critères restants = 0,2	A_3
7	Poids du critère $C_2 = 1$ Poids des critères restants = 0,2	A_2 et A_3
8	Poids du critère $C_3 = 1$ Poids des critères restants = 0,2	A_3
9	Poids du critère $C_4 = 1$ Poids des critères restants = 0,2	A_2 et A_3
10	Poids du critère $C_5 = 1$ Poids des critères restants = 0,2	A_2
11	Poids du critère $C_6 = 1$ Poids des critères restants = 0,2	A_2 et A_3
12	Poids du critère $C_3 = 0{,}2$ Poids des critères restants = 1	A_3

Dans le cas de variation des poids des critères de type bénéfice selon les expériences 6, 7, 9, 10 et 11, la meilleure alternative change en faisant varier à chaque fois le poids attribué. Ainsi l'alternative A_3 est la meilleure dans la huitième expérience. L'alternative A_2 est la meilleure alternative dans la dixième expérience. Les alternatives A_2 et A_3 sont considérées les meilleures alternatives dans la septième, la neuvième et la onzième expériences.

Ces résultats prouvent que notre méthode MAADM reste stable, comme le montre la figure IV.9, pour des intervalles des poids attribués aux six critères. Ils montrent, aussi, les critères qui conditionnent le plus étroitement l'alternative choisie. Ces critères sont les critères de type bénéfice.

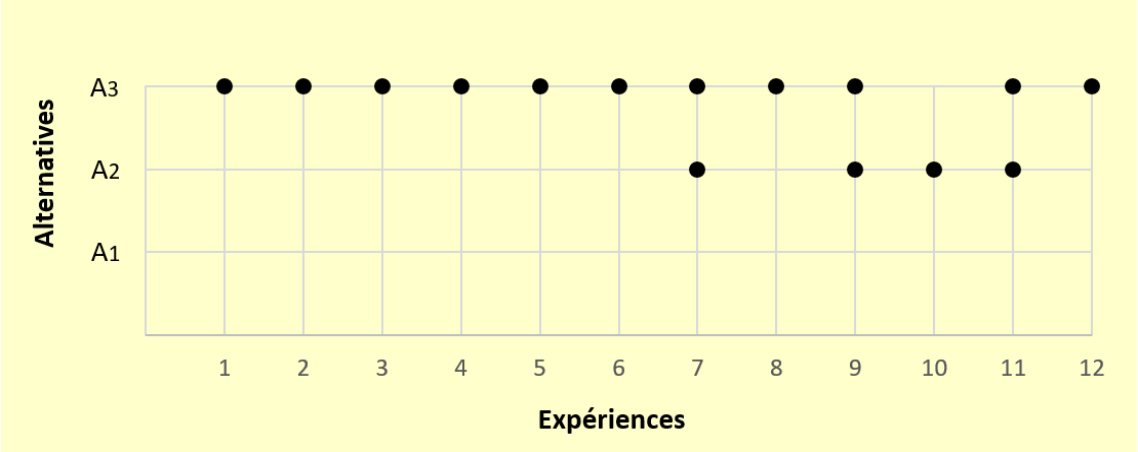


FIGURE IV.9: Résultats de l'analyse de sensibilité

IV.4 Étude de cas : Application de la méthode FMAADM

Dans cette section, d'abord, nous présentons une deuxième étude de cas. Ensuite, nous expliquons l'application de la méthode FMAADM et nous détaillons les résultats obtenus.

IV.4.1 Présentation de l'étude de cas

Pour cette étude de cas, nous appliquons notre méthode FMAADM. L'objectif est de sélectionner, dans un environnement incertain, une meilleure localisation des centres de distribution parmi trois localisations potentielles (A_1, A_2 et A_3) par trois décideurs (D_1, D_2 et D_3). Pour l'évaluation des différentes localisations, les décideurs se basent sur les onze critères suivants :

— (C_1) les coûts,

— (C_2) l'impact environnemental,

— (C_3) l'accessibilité,

— (C_4) la sécurité,

— (C_5) la Connectivité au transport multimodal,

— (C_6) la proximité des clients,

— (C_7) la proximité des fournisseurs,

— (C_8) la disponibilité des ressources,

— (C_9) la conformité aux règles du transport durable,

— (C_{10}) la possibilité d'expansion,

— (C_{11}) la qualité de service.

La table IV.17 récapitule les critères d'évaluation utilisés dans cette étude de cas ainsi que leurs définitions. Ces critères sont divisés selon deux types, les critères de type bénéfice B= $\{C_3, C_4, C_5,\ C_6,\ C_7,\ C_8\ ,\ C_9,\ C_{10}$ et $C_{11}\}$ et les critères de type coût C= $\{C_1$ et $C_2\}$.

La structure hiérarchique de ce deuxième exemple numérique est présentée dans la figure IV.10.

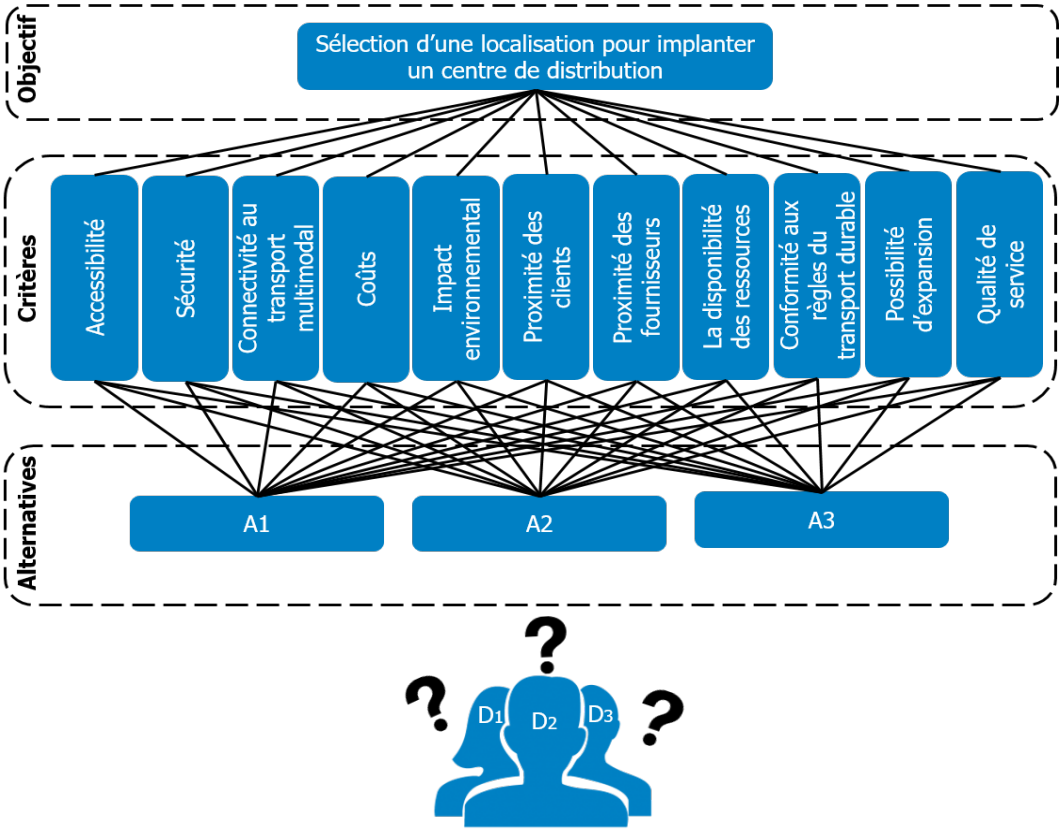


FIGURE IV.10: Structure hiérarchique du problème de sélection de la localisation des centres de distribution dans un environnement incertain

TABLE IV.17: Critères d'évaluation utilisés dans l'environnement incertain

Critère	**Définition**	**Unité**	**Type**
Coûts (C_1)	E.g. coût des ressources des véhicules et coûts fonciers	Quantitatif	Coût
Impact environnemental (C_2)	Impact de la mise en place du centre de distribution sur l'environnement	Quantitatif	Coût
Accessibilité (C_3)	Accès par modes du transport privé et public au centre de distribution	Quantitatif	Bénéfice
Securité (C_4)	Sécurité contre les accidents	Qualitatif	Bénéfice
Connectivité au transport multimodal (C_5)	Connectivité de l'emplacement avec les modes de transport	Quantitatif	Bénéfice
Proximité des clients (C_6)	Distance entre le centre et le client	Quantitatif	Bénéfice
Proximité des fournisseurs (C_7)	Distance entre le centre et le fournisseur	Quantitatif	Bénéfice
La disponibilité des ressources (C_8)	Disponibilité des ressources pour diverses utilisations	Quantitatif	Bénéfice
Conformité aux règles du transport durable (C_9)	Capacité de se conformer aux restrictions de transport durable imposées par les autorités publiques.	Qualitatif	Bénéfice
Possibilité d'expansion (C_{10})	La capacité d'augmenter la taille du centre pour satisfaire les demandes croissantes	Quantitatif	Bénéfice
Qualité de service (C_{11})	La capacité d'assurer le service opportun et fiable aux clients	Qualitatif	Bénéfice

IV.4.2 Application de la méthode FMAADM

Dans ce qui suit, nous présentons l'application de notre méthode, FMAADM, pour choisir la meilleure localisation des centres de distribution, dans un environnement incertain, parmi trois localisations potentielles (A_1, A_2 et A_3). L'évaluation de ces dernières s'effectuent par trois décideurs (D_1, D_2 et D_3) face aux onze critères définis auparavant ($C_1, ..., C_{11}$).

— **Construction de la matrice floue d'importance des critères (W) :**

Pour commencer le processus de sélection de la meilleure localisation, chaque décideur ($K = 1, 2, 3$) est invité à évaluer linguistiquement les onze critères d'évaluation ($C_1, ..., C_{11}$) en utilisant l'échelle de mesure en cinq points (très faible, faible, moyen, fort et très fort) [Awasthi *et al.*, 2011] [Awasthi *et al.*, 2016] [He *et al.*, 2017] figurée dans la table IV.18 et illustrée dans la figure IV.11. Ces évaluations sont traduites, par la suite, en poids par critère pour un décideur donné ($W_1^1, ..., W_{11}^3$) comme les montre la table IV.19.

La matrice d'importance des critères d'évaluation (W) est construite en calculant le poids final de chaque critère en se basant sur l'équation III.24. Cette matrice est illustrée à la table IV.20.

Exemple : $W_1 = \frac{1}{3}(W_1^1 + W_1^2 + W_1^3)$

$$= \frac{1}{3}((7, 9, 9) + (7, 9, 9) + (7, 9, 9)) = (7, 9, 9)$$

TABLE IV.18: Nombres flous triangulaires d'importance des critères

Termes linguistiques	**Fonctions d'appartenance**
Très faible (VL)	(1, 1, 3)
Faible (L)	(1, 3, 5)
Moyen (M)	(3, 5, 7)
Fort (H)	(5, 7, 9)
Très fort (VH)	(7, 9, 9)

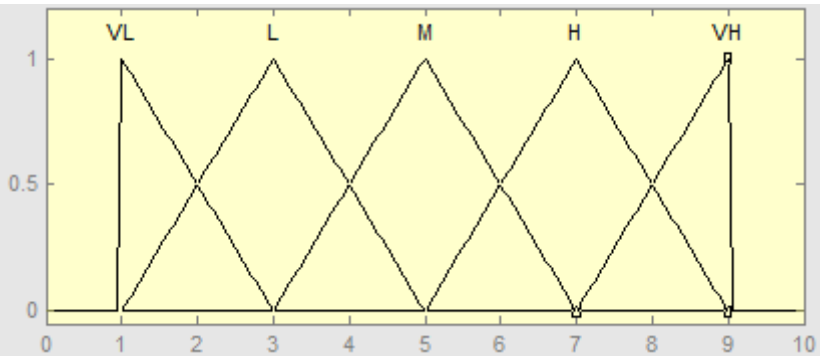


FIGURE IV.11: Illustration des nombres flous triangulaires pour attribuer l'importance des critères

TABLE IV.19: Importance attribuée aux critères d'évaluation

Critères	**Décideurs**		
	D_1	D_2	D_3
C_1	VH (7, 9, 9)	VH (7, 9, 9)	VH (7, 9, 9)
C_2	VH (7, 9, 9)	H (5, 7, 9)	VH (7, 9, 9)
C_3	VH (7, 9, 9)	H (5, 7, 9)	VH (7, 9, 9)
C_4	H (5, 7, 9)	VH (7, 9, 9)	VH (7, 9, 9)
C_5	M (3, 5, 7)	H (5, 7, 9)	M (3, 5, 7)
C_6	VH (7, 9, 9)	H (5, 7, 9)	VH (7, 9, 9)
C_7	H (5, 7, 9)	VH (7, 9, 9)	H (5, 7, 9)
C_8	M (3, 5, 7)	H (5, 7, 9)	H (5, 7, 9)
C_9	H (5, 7, 9)	H (5, 7, 9)	VH (7, 9, 9)
C_{10}	VH (7, 9, 9)	H (5, 7, 9)	VH (7, 9, 9)
C_{11}	VH (7, 9, 9)	VH (7, 9, 9)	VH (7, 9, 9)

TABLE IV.20: Matrice d'importance des critères d'évaluation

Critères	**Poids**
C_1	(7, 9, 9)
C_2	(6,33, 8.33, 9)
C_3	(6.33, 8.33, 9)
C_4	(6.33, 8.33, 9)
C_5	(3.66, 5.66, 7.66)
C_6	(6.33, 8.33, 9)
C_7	(5.66, 7.66, 9)
C_8	(4.33, 6.33, 8.33)
C_9	(5.66, 7.66, 9)
C_{10}	(6.33, 8.33, 9)
C_{11}	(7, 9, 9)

— **Construction de la matrice floue de décision (D) :**

Les évaluations linguistiques s'effectuent aussi l'évaluation des alternatives par rapport aux différents critères, où chaque décideur ($K = 1, 2, 3$) évalue chaque alternative (A_1, A_2 et A_3) par rapport à l'ensemble des critères (C_1, ..., C_{11}). Pour cette évaluation, les décideurs se basent sur l'échelle de mesure

d'évaluation des alternatives en cinq points (très faible, faible, passable, bien et très bien) [Awasthi *et al.*, 2011], [Awasthi *et al.*, 2016] et de [He *et al.*, 2017] figurée dans la table Linguistic variables for the ratings et illustrée dans la figure IV.12. La table IV.22 récapitule les évaluations linguistiques des alternatives faites par décideur.

Au final, chaque alternative reçoit une note par critère en utilisant l'équation III.25. Il résulte, ainsi, la matrice de décision floue (D) illustrée à la table IV.23.

Exemple : $x_{11} = \frac{1}{3}\left[x_{11}^1 + x_{11}^2 + x_{11}^3\right]$

$$= \frac{1}{3}\left((7,9,9) + (5,7,9) + (7,9,9)\right) = (6.33, 8.33, 9)$$

TABLE IV.21: Nombres flous triangulaires pour l'évaluation des alternatives

Termes linguistiques	**Fonctions d'appartenance**
Très faible (VP)	(1, 1, 3)
Faible (P)	(1, 3, 5)
Passable (F)	(3, 5, 7)
Bien (G)	(5, 7, 9)
Très bien (VG)	(7, 9, 9)

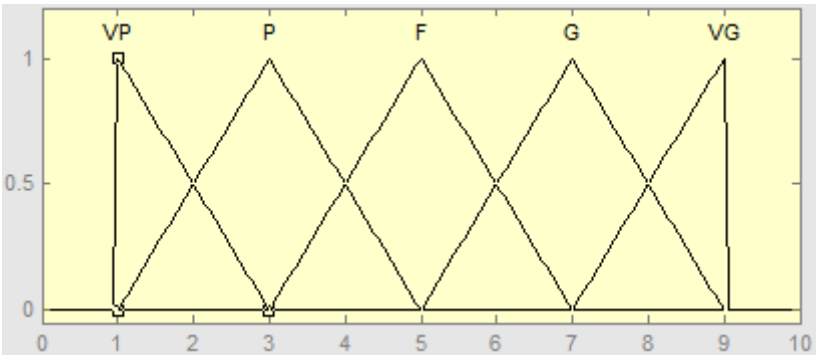


FIGURE IV.12: Illustration des nombres flous triangulaires pour évaluer les alternatives potentielles

TABLE IV.22: Notes attribuées aux alternatives

Critères	**Alternatives**	**Décideurs**		
		D_1	D_2	D_3
C_1	A_1	VG (7, 9, 9)	G (5, 7, 9)	VG (7, 9, 9)
	A_2	G (5, 7, 9)	VG (7, 9, 9)	VG (7, 9, 9)
	A_3	VG (7, 9, 9)	VG (7, 9, 9)	VG (7, 9, 9)
C_2	A_1	G (5, 7, 9)	VG (7, 9, 9)	G (5, 7, 9)
	A_2	F (3, 5, 7)	G (5, 7, 9)	F (3, 5, 7)
	A_3	P (1, 3, 5)	P (1, 3, 5)	F (3, 5, 7)
C_3	A_1	F (3, 5, 7)	G (5, 7, 9)	F (3, 5, 7)
	A_2	F (3, 5, 7)	F (3, 5, 7)	F (3, 5, 7)
	A_3	F (3, 5, 7)	G (5, 7, 9)	G (5, 7, 9)
C_4	A_1	G (5, 7, 9)	G (5, 7, 9)	F (3, 5, 7)
	A_2	F (3, 5, 7)	G (5, 7, 9)	F (3, 5, 7)
	A_3	F (3, 5, 7)	G (5, 7, 9)	G (5, 7, 9)
C_5	A_1	G (5, 7,9)	F (3, 5, 7)	G (5, 7, 9)
	A_2	G (5, 7, 9)	F (3, 5, 7)	F (3, 5, 7)
	A_3	G (5, 7, 9)	P (1, 3, 5)	G (5, 7, 9)
C_6	A_1	G(5, 7, 9)	VG (7, 9, 9)	VG (7, 9, 9)
	A_2	VG (7, 9, 9)	VG (7, 9, 9)	G (5, 7, 9)
	A_3	VG (7, 9, 9)	VG (7, 9, 9)	G (5, 7, 9)
C_7	A_1	F (3, 5, 7)	VG (7, 9, 9)	F (3, 5, 7)
	A_2	G (5, 7, 9)	G (5, 7, 9)	F (3, 5, 7)
	A_3	G (5, 7, 9)	G(5, 7, 9)	(5, 7,9)
C_8	A_1	F (3, 5, 7)	F (3, 5, 7)	G (5, 7, 9)
	A_2	G (5, 7, 9)	F (3, 5, 7)	F (3, 5, 7)
	A_3	F (3, 5, 7)	F (3, 5, 7)	F (3, 5, 7)
C_9	A_1	F (3, 5, 7)	F (3, 5, 7)	F (3, 5, 7)
	A_2	F (3, 5, 7)	P (1, 3, 5)	P (1, 3, 5)
	A_3	VP (1, 3, 5)	VP (1, 1, 3)	VP (1, 1, 3)
C_{10}	A_1	G (5, 7, 9)	G (5, 7, 9)	VG (7, 9, 9)
	A_2	VG (7, 9, 9)	G (5, 7, 9)	VG (7, 9, 9)
	A_3	G (5, 7, 9)	G (5, 7, 9)	G (5, 7, 9)
C_{11}	A_1	VG (7, 9, 9)	G (5, 7,9)	VG (7, 9, 9)
	A_2	VG (7, 9, 9)	G (5, 7, 9)	G (5, 7, 9)
	A_3	G (5, 7, 9)	VG (7, 9, 9)	VG (7, 9, 9)

TABLE IV.23: Matrice de décision floue

	A_1	A_2	A_3
C_1	(6.33, 8.33, 9)	(6.33, 8.33, 9)	(7, 9, 9)
C_2	(5.66, 7.66, 9)	(3.66, 5.66, 7.66)	(1.66, 3.66, 5.66)
C_3	(3.66, 5.66, 7.66)	(3, 5, 7)	(4.33, 6.33, 8.33)
C_4	(4.33, 6.33, 8.33)	(3.66, 5.66, 7.66)	(4.33, 6.33, 8.33)
C_5	(4.33, 6.33, 8.33)	(3.66, 5.66, 7.66)	(3.66, 5.66, 7.66)
C_6	(6.33, 8.33, 9)	(6.33, 8.33, 9)	(6.33, 8.33, 9)
C_7	(4.33, 6.33, 7.66)	(4.33, 6.33, 8.33)	(5, 7, 9)
C_8	(3.66, 5.66, 7.66)	(3.66, 5.66, 7.66)	(3, 5, 7)
C_9	(3, 5, 7)	(1.66, 3.66, 5.66)	(1, 1.66, 3.66)
C_{10}	(5.66, 7.66, 9)	(6.33, 8.33, 9)	(5, 7, 9)
C_{11}	(6.33, 8.33, 9)	(5.66, 7.66, 9)	(6.33, 8.33, 9)

— **Construction de la matrice de décision floue normalisée (R) :**

Cette étape repose sur la normalisation de la matrice de décision floue (D), en utilisant la procédure de normalisation linéaire sur la base de l'équation III.26, afin de s'assurer que les évaluations vont couvrir l'intervalle des plages de nombres flous triangulaires normalisés $[0, 1]$. Il résulte, ainsi, la matrice de décision floue normalisée désignée par R et présentée dans la table IV.24.

Exemple : $C_1 \in C$,

$$r_{11} = \left(\frac{\bar{a}}{c_{1,1}}, \quad \frac{\bar{a}}{b_{2,1}}, \quad \frac{\bar{a}}{a_{3,1}}\right),$$
$$= \left(\frac{6.33}{9}, \quad \frac{6.33}{8.33}, \quad \frac{6.33}{6.33}\right) = (0.7, 0.75, 1),$$

où r_{11} est la valeur normalisée de x_{11} et C est l'ensemble des critères de type coût.

— **Évaluation finale des alternatives :**

Après avoir construit la matrice de décision floue normalisée R , nous déterminons la valeur finale floue de chaque alternative compte tenu de l'importance de chaque critère en utilisant l'équation III.27.

La table IV.25 récapitule les notes finales floues des trois alternatives.

Exemple : $P_1 = r_{11} \,.\, w_1$

$$= (0.7, 0.75, 1) \,.\, (7, 9, 9) = (4.9, 6.75, 9)$$

TABLE IV.24: Matrice de décision floue et normalisée

Critères	a_j^-	c_j^*	**Décideurs**		
			A_1	A_2	A_3
C_1	6.33	9	(0.70, 0.75, 1)	(0.70, 0.75, 1)	(0.70, 0.70, 0.90)
C_2	1.66	9	(0.18, 0.21, 0.29)	(0.21, 0.29, 0.45)	(0.29, 0.45, 1)
C_3	3	8.33	(0.43, 0.67, 0.91)	(0.36, 0.60, 0.84)	(0.51, 0.75, 1)
C_4	3.66	8.33	(0.51, 0.75, 1)	(0.43, 0.67, 0.91)	(0.51, 0.75, 1)
C_5	3.66	8.33	(0.51, 0.75, 1)	(0.43, 0.67, 0.91)	(0.43, 0.67, 0.91)
C_6	6.33	9	(0.70, 0.92, 1)	(0.70, 0.92, 1)	(0.70, 0.92, 1)
C_7	4.33	9	(0.48, 0.70, 0.85)	(0.48, 0.70, 0.92)	(0.55, 0.77, 1)
C_8	3	7.66	(0.52, 0.73, 1)	(0.52, 0.73, 1)	(0.39, 0.65, 0.91)
C_9	1	7	(0.42, 0.71, 1)	(0.23, 0.52, 0.80)	(0.14, 0.23, 0.52)
C_{10}	5	9	(0.62, 0.85, 1)	(0.70, 0.92, 1)	(0.55, 0.77, 1)
C_{11}	5.66	9	(0.70, 0.92, 1)	(0.62, 0.85, 1)	(0.70, 0.92, 1)

TABLE IV.25: Évaluation floue finale de chaque alternative

	A_1	A_2	A_3
C_1	(4.9, 6.75, 9)	(4.9, 6.75, 9)	(4.9, 6.3, 8.1)
C_2	(1.13, 1.74, 2.61)	(1.32, 2.41, 4.05)	(1.83, 3.74, 9)
C_3	(2.72, 5.58, 8.19)	(2.27, 4.99, 7.56)	(3.22, 6.24, 9)
C_4	(3.22, 6.24, 9)	(2.72, 5.58, 8.19)	(3.22, 6.24, 9)
C_5	(1.86, 4.24, 7.66)	(1.57, 3.79, 6.97)	(1.57, 3.79, 6.97)
C_6	(4.43, 7.66, 9)	(4.43, 7.66, 9)	(4.43, 7.66, 9)
C_7	(2.71, 5.36, 7.65)	(2.71, 5.36, 8.28)	(3.11, 5.89, 9)
C_8	(2.25, 4.62, 8.33)	(2.25, 4.62, 8.33)	(1.68, 4.11, 7.58)
C_9	(2,.37, 5.43, 9)	(1.30, 3.98, 7.2)	(0.79, 1.76, 4.68)
C_{10}	(3.92, 7.08, 9)	(4.43, 7.66, 9)	(3.48, 6.41, 9)
C_{11}	(4.9, 8.28, 9)	(4.34, 7.65, 9)	(3.48, 6.41, 9)

— **Détermination des relations entre les alternatives :**

Nous déterminons, dans cette étape, les relations entre les alternatives. Pour se faire, en utilisant les équations III.28, III.29 et III.30, nous effectuons des comparaisons par paires entre couples d'alternatives par rapport à chaque critère en terme de notes finales comme le montre la table IV.26.

Les comparaisons sont divisées en fonction des relations de préférence, notamment $J^{=}(A_i, A_k)$, $J^{+}(A_i, A_k)$ et $J^{-}(A_i, A_k)$ comme les montrent les tables IV.27, IV.28 et IV.29.

Exemple : La présence du symbole $J-$ à l'intersection de la ligne A_3 et de la colonne A_1 relatif au critère C_1 signifie que l'index 1 appartient à l'ensemble $J^{-}(A_3, A_1)$. Si nous réunissons les informations relatives aux onze critères à ce couple d'alternatives, nous obtenons $J^{-}(A_3, A_1)$={1, 5, 8, 9, 10 et 11} comme indiqué dans la table IV.27. En effet, pour les critères C_1, C_5, C_8, C_9, C_{10} et C_{11}, l'alternative A_1 est préférée à l'alternative A_3.

TABLE IV.26: Relations entre alternatives

Critères	**Alternatives**	A_1	A_2	A_3
C_1	A_1	-	$J^=$	J^+
	A_2	$J^=$	-	J^+
	A_3	J^-	J^-	-
C_2	A_1	-	J^-	J^-
	A_2	J^+	-	J^-
	A_3	J^+	J^+	-
C_3	A_1	-	J^+	J^-
	A_2	J^-	-	J^-
	A_3	J^+	J^+	-
C_4	A_1	-	J^+	$J^=$
	A_2	J^-	-	J^-
	A_3	$J^=$	J^+	-
C_5	A_1	-	J^+	J^+
	A_2	J^-	-	$J^=$
	A_3	J^-	$J^=$	-
C_6	A_1	-	$J^=$	$J^=$
	A_2	$J^=$	-	$J^=$
	A_3	$J^=$	$J^=$	-
C_7	A_1	-	J^-	J^-
	A_2	J^+	-	J^-
	A_3	J^+	J^+	-
C_8	A_1	-	$J^=$	J^+
	A_2	$J^=$	-	J^+
	A_3	J^-	J^-	-
C_9	A_1	-	J^+	J^+
	A_2	J^-	-	J^+
	A_3	J^-	J^-	-
C_{10}	A_1	-	J^-	J^+
	A_2	J^+	-	J^+
	A_3	J^-	J^-	-
C_{11}	A_1	-	J^+	J^+
	A_2	J^-	-	J^+
	A_3	J^-	J^-	-

TABLE IV.27: Résumé concernant l'ensemble J^-

	A_1	A_2	A_3
A_1	-	{2, 7, 10}	{2, 3, 7}
A_2	{3, 4, 5, 9, 11}	-	{2, 3, 4, 7}
A_3	{1, 5, 8, 9, 10, 11}	{1, 8, 9, 10, 11}	-

TABLE IV.28: Résumé concernant l'ensemble $J^=$

	A_1	A_2	A_3
A_1	-	{1, 6, 8}	{4, 6}
A_2	{1, 6, 8}	-	{5, 6}
A_3	{4, 6}	{5, 6}	-

TABLE IV.29: Résumé concernant l'ensemble J^+

	A_1	A_2	A_3
A_1	-	{3, 4, 5, 9, 11}	{1, 5, 8, 9, 10, 11}
A_2	{2, 7, 10}	-	{1, 8, 9, 10, 11}
A_3	{2, 3, 7}	{2, 3, 4, 7}	-

— **Conversion des relations entre les alternatives en valeurs numériques :**

Après l'obtention des ensembles d'indices représentant les critères vérifiant les relations de préférence pour un couple d'alternatives donné, nous convertissons ces ensembles en valeurs numériques en utilisant les équations III.31, III.32 et III.33. Pour chaque ensemble, nous déterminons la somme de poids des critères appartenant à chaque famille $P^+(A_i, A_k)$, $P^=(A_i, A_k)$ et $P^-(A_i, A_k)$ comme les indiquent les tables IV.30, IV.31 et IV.32.

Exemple : A_3 est préférée à A_1 face aux critères C_2, C_3 et C_7.

D'où $P^+_{3,1} = W_2 + W_3 + W_7$

$$= (6.33, 8.33, 9) + (6.33, 8.33, 9) + (5.66, 7.66, 9)$$

$$= (18.32, 24.32, 27)$$

TABLE IV.30: Résumé concernant l'ensemble P_{ik}^{+}

	A_1	A_2	A_3
A_1	-	(28.98, 38.98, 43.66)	(33.98, 45.98, 51.99)
A_2	(18.32, 24.32, 27)	-	(30.32 , 40.32, 44.33)
A_3	(18.32, 24.32 , 27)	(24.65, 32.65, 36)	-

TABLE IV.31: Résumé concernant l'ensemble $P_{ik}^{=}$

	A_1	A_2	A_3
A_1	-	(17.66, 23.66, 26.33)	(12.66, 16.66, 18)
A_2	(17.66, 23.66, 26.33)	-	(9.99, 13.99, 16.66)
A_3	(12.66, 16.66, 18)	(9.99, 13.99, 16.66)	-

TABLE IV.32: Résumé concernant l'ensemble P_{ik}^{-}

	A_1	A_2	A_3
A_1	-	(18.32, 24.32, 27)	(18.32, 24.32, 27)
A_2	(28.98, 38.98, 43.66)	-	(24.65, 32.65, 36)
A_3	(33.98, 45.98, 51.99)	(30.32, 40.32, 44.33)	-

— **Fusion des valeurs numériques :**

Au niveau de cette étape, nous fusionnons les valeurs numériques obtenues lors de l'étape précédente. Pour se faire, nous calculons les indices de concordance CI_{ik} et les indices de discordances DI_{ik} en utilisant les équations III.34 et III.35 comme illustrées dans les tables IV.33 et IV.34.

TABLE IV.33: Résumé concernant les coefficients de concordance CI

	A_1	A_2	A_3
A_1	-	(0.71, 0.72, 0.72)	(0.71, 0.72, 0.72)
A_2	(0.55, 0.55, 0.55)	-	(0.62, 0.62, 0.62)
A_3	(0.47, 0.47, 0.47)	(0.53, 0.53, 0.54)	-

TABLE IV.34: Résumé concernant les coefficients de discordance DI

	A_1	A_2	A_3
A_1	-	(-0.47, 0, 0.44)	(-0,38, 0.14, 0.51)
A_2	(-0.38, 0.14, 0.59)	-	(-0.38, 0.14, 0.59)
A_3	(-0.47, 0.07, 0.51)	(-0.28, 0.22, 0.51)	-

— **Filtrage des alternatives :**

À ce stade, nous avons toutes les informations nécessaires pour sélectionner la meilleure alternative. Pour cela, nous réalisons un test de concordance et un test de non discordance en utilisant l'équation III.36.

Pour le test de concordance, nous avons le seuil ct égale à (0.5, 0.6, 0.7). Ce test est satisfait si $CI_{ik} \geq$ (0.5, 0.6, 0.7). À partir la table IV.33, les CI_{ik} satisfaisants le test de concordance sont CI_{12} et $CI_{1,3}$ où $CI_{1,2} = CI_{13} =$ (0.71, 0.72, 0.72) $>$ (0.5, 0.6, 0.7).

Pour le test de non discordance, nous avons le seuil dt égale à (0.3, 0.4, 0.55). Ce test est satisfait si $DI_{(ik)} \leq$ (0.3, 0.4, 0.55). Dans notre exemple, les $DI_{(ik)}$ qui satisfont ce test sont $DI_{1,2}$ et $DI_{1,3}$.

À partir de ces deux tests réalisés, nous concluons que :

— l'alternative A_1 surclasse l'alternative A_2, car la relation de concordance CI_{12} et la relation de discordance DI_{12} sont les deux vérifiées,

— l'alternative A_1 surclasse l'alternative A_3, puisque les relations de concordance DI_{13} et de discordance DI_{13} sont aussi vérifiées.

De ce fait, l'alternative A_1 est la meilleure alternative par rapport à A_2 et à A_3 .

Nous représentons les résultats obtenus dans le graphe illustré dans la figure IV.13. Cette dernière montre la relation de surclassement entre le couple d'alternative A_1, A_2 (A_1SA_2 et non A_2SA_1) et le couple d'alternative A_1, A_3 (A_1SA_3 et non A_3SA_1). Elle montre aussi la relation d'incomparabilité entre le couple d'alternative A_2, A_3 (non A_2SA_3 et non A_3SA_2).

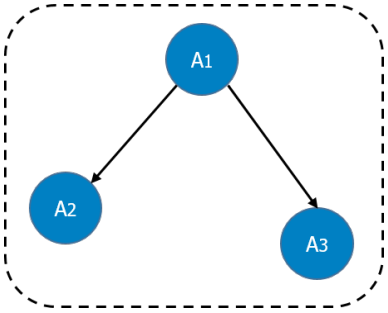


FIGURE IV.13: Graphe des relations entre alternatives

IV.5 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons testé la méthode MAADM et la méthode MAADM à travers deux études de cas. Dans la première étude de cas, en utilisant la méthode MAADM, nous avons déterminé la meilleure localisation des centres de distribution parmi trois localisations potentielles face à six critères d'évaluation. La décision est prise dans un environnement certain par trois décideurs. Dans la deuxième étude de cas, dans un environnement incertain, une meilleure localisation parmi trois localisation potentielles est sélectionnée par trois décideurs à l'aide de la méthode FMAADM. L'ensemble des localisations potentielles est évalué selon onze critères. La résolution de ces études de cas est menée par le système d'aide à la décision S-DSS.

Une analyse de sensibilité, basée sur douze expériences, est appliquée pour vérifier la sensibilité de la méthode MAADM vis-à-vis des variations de poids des critères d'évaluation. Cette analyse a montré que la méthode MAADM reste stable, pour des intervalles des poids attribués aux critères. Elle montre, aussi, les critères qui conditionnent le plus étroitement l'alternative choisie.

Les résultats obtenus des deux études de cas présentés dans ce chapitre montrent que la méthode MAADM et la méthode FMAADM répondent à l'objectif recherché et ainsi retenues pour la sélection de la meilleure alternative dans un contexte incertain de multi-attribut et multi-acteur.

Conclusion générale et Perspectives

Conclusion générale

Dans un contexte urbain, les centres de distribution jouent un rôle important non seulement dans la fluidification du trafic routier et la réduction de la pollution atmosphérique et sonore, mais aussi dans la diminution des coûts du transport. En outre, ils contribuent à la satisfaction des clients, ainsi qu'à la satisfaction des habitants mécontents qui vivent à proximité des centres de distribution impactés par la circulation des véhicules. Face à ces raisons, la prise d'une bonne décision pour sélectionner une meilleure localisation des centres de distribution, sous divers critères, est devenue, de plus en plus, un atout stratégique primordial pour la logistique urbaine.

Dans un environnement certain, si la décision de sélection de la localisation des centres de distribution a donné lieu à plusieurs travaux de recherche, elle n'a jamais été l'objet, à notre connaissance, d'une décision prise par plusieurs acteurs. De ce fait, nous avons développé une méthode multi-attribut et multi acteur (MAADM). Cette dernière est basée sur la méthode ELECTRE I, issue de l'aide à la décision multi-attribut, pour laquelle nous avons intégré l'aspect multi-acteur. Son objectif est de sélectionner une meilleure alternative parmi un ensemble d'alternatives potentielles. Pour atteindre cet objectif, la méthode MAADM évalue les différentes alternatives non seulement en fonction de divers critères, mais aussi en prenant en compte l'adéquation des préférences de plusieurs décideurs impliqués dans le processus de décision. Dans ce processus, chaque décideur est invité à exprimer ses pré-

férences, d'une part, sur l'importance des critères d'évaluation et, d'autre part, au regard de l'ensemble des alternatives potentielles. Le but est de défendre les intérêts du service de l'entreprise qui le représente, à savoir le service de la distribution, de la qualité et du développement durable, etc. La méthode MAADM se décompose des cinq grandes étapes : (1) l'identification des décideurs, les alternatives potentielles sur lesquelles va porter la décision de sélection ainsi que les critères d'évaluation, (2) la construction de la matrice d'importance des différents critères d'évaluation et la matrice de décision (3) la détermination des relations entre les alternatives, (4) l'application du test de concordance et du test de non discordance et (5) le filtrage des alternatives.

Afin d'illustrer tout l'intérêt de la méthode MAADM, nous avons conduit une étude de cas, dans un environnement certain, pour choisir une meilleure localisation des centres de distribution parmi trois localisations potentielles. Ces alternatives sont évaluées par trois décideurs par rapport à six critères. Les résultats obtenus montrent que la méthode répond à l'objectif recherché et ainsi retenue pour la sélection de la meilleure alternative dans un contexte certain de multi-attribut et multi-acteur.

D'un autre côté, afin de vérifier la fiabilité du résultat fourni par cette méthode et sa sensibilité vis-à-vis des variations des poids attribués aux critères d'évaluation par les décideurs, nous avons effectué une analyse de sensibilité basée sur douze expériences. Cette analyse a montré que la méthode MAADM demeure stable dans des intervalles des poids attribués aux critères d'évaluation. Nous avons pu aussi identifier les critères qui conditionnent le plus étroitement l'alternative choisie.

La seconde contribution a permis de développer une méthode floue multi-attribut et multi-acteur (FMAADM). Cette méthode couple la méthode MAADM et une méthode multi-critère basée sur les ensembles flous. L'apport de cette méthode, par rapport à la méthode MAADM, est de surmonter l'incertitude inhérente et l'imprécision du processus décisionnel humain ainsi que les comportements futurs du marché et des entreprises. Elle repose sur cinq étapes : (1) l'identification des décideurs et des alternatives potentielles sur lesquelles va porter la décision de sélection ainsi les critères d'évaluation, (2) la construction de la matrice floue d'importance des différents critères d'évaluation, la matrice floue de décision et la matrice de dé-

cision floue normalisée (3) la détermination des relations entre les alternatives, (4) l'application du test de concordance et du test de non discordance et (5) le filtrage des alternatives.

Pour valider, expérimentalement et opérationnellement, la méthode FMAADM, nous avons mené une étude de cas dont le but est de sélectionner une meilleure localisation des centres de distribution parmi trois localisations potentielles dans un environnement incertain. Ces trois alternatives sont évaluées par trois décideurs selon onze critères. La mise en œuvre et l'opérationnalisation de la méthode FMAADM face au processus de décision, pour lequel elle est conçue, a montré que la méthode FMAADM répond à l'objectif recherché et ainsi retenue pour la sélection de la meilleure alternative dans un contexte incertain de multi-attribut et multi-acteur.

Les expérimentations, menées dans le cadre de cette thèse, ont été traitées à l'aide du système d'aide à la décision S-DSS que nous avons développé. Ce système implémente les différents algorithmes développés pour le processus de décision. Une intention particulière a été donnée à l'utilisabilité de ce système afin qu'il soit un outil facile d'usage et d'interfaçage pour aider les décideurs impliqués dans une décision de sélection.

Perspectives

Le travail de recherche réalisé dans le cadre de cette thèse a abouti à des propositions en termes de méthodes d'aide à la décision. Il n'exclue pas le fait que tout travail de recherche présente des limites permettant de tracer les perspectives du domaine de recherche. Les résultats obtenus inspirent des idées pour des travaux futurs de recherche à la fois sur le plan théorique et le plan applicatif :

— Malgré les études de cas menées dans ce travail de thèse, celles-ci restent limitées par manque des données réelles. Il serait pertinent de tester l'intégralité de nos méthodes sur des problématiques réelles d'entreprises afin de valider leur généralisation, et si possible dans divers domaines : logistique, biomédical, touristique, ...

— Exploiter les données de préférences décideurs par une analyse de similarité

afin de construire des communautés virtuelles d'experts,

— Proposer de structurer une base de cas des alternatives sélectionnées réutilisables et à implémenter une interface de recherche de cas pour guider le décideur,

— Concevoir et développer une ontologie de domaine permettant de représenter les critères de sélection proposés et les corrélations possibles entre eux et ce, afin de proposer des nouvelles stratégies de recherche d'alternatives,

— Améliorer notre système pour pouvoir extraire les critères importants en fonction de cas étudié, et ce, de manière automatique,

— Intégrer un module de visualisation des résultats avec un sous-système d'explication,

— Proposer des adaptations dans le contexte Big Data en proposant une approche de construction d'ontologies à partir d'une large quantité de données et étendre les expérimentations afin d'appuyer la contribution de la proposition.

Bibliographie

[Agrebi *et al.*, 2015] Agrebi, M., Abed, M. et Omri, M. N. (2015). Urban distribution centers' location selection's problem : A survey. *In International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT)*, pages 246–251. IEEE.

[Agrebi *et al.*, 2016] Agrebi, M., Abed, M. et Omri, M. N. (2016). A new multi-actor multi-attribute decision-making method to select the distribution centers' location. *In IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, pages 1–7. IEEE.

[Agrebi *et al.*, 2017] Agrebi, M., Abed, M. et Omri, M. N. (2017). ELECTRE I based relevance decision-makers feedback to the location selection of distribution centers. *Journal of Advanced Transportation*, 2017.

[Agrebi *et al.*, 2018] Agrebi, M., Abed, M. et Omri, M. N. (2018). MAADM and FMAADM methods for solving the selection problem under multiple attribute group decision making : Case of distribution center location. *In Mardi des Chercheurs (MdC2018)*. UPHF & Polytech Mons.

[Ashayeri et Rongen, 1997] Ashayeri, J. et Rongen, J. M. (1997). Central distribution in Europe : A multi-criteria approach to location selection. *The International Journal of Logistics Management*, 8(1):97–109.

[Avittathur *et al.*, 2005] Avittathur, B., Shah, J. et Gupta, O. K. (2005). Distribution centre location modelling for differential sales tax structure. *European Journal of Operational Research*, 162(1):191–205.

[Awasthi *et al.*, 2016] Awasthi, A., Adetiloye, T. et Crainic, T. G. (2016). Collaboration partner selection for city logistics planning under municipal freight regulations. *Applied Mathematical Modelling*, 40(1):510–525.

[Awasthi *et al.*, 2011] Awasthi, A., Chauhan, S. S. et Goyal, S. K. (2011). A multi-criteria decision making approach for location planning for urban distribution centers under uncertainty. *Mathematical and Computer Modelling*, 53(1):98–109.

[Awasthi *et al.*, 2018] Awasthi, A., Govindan, K. et Gold, S. (2018). Multi-tier sustainable global supplier selection using a fuzzy AHP-VIKOR based approach. *International Journal of Production Economics*, 195:106–117.

[Ayadi, 2010] Ayadi, D. (2010). *Optimisation multicritère de la fiabilité : application du modèle de goal programming avec les fonctions de satisfactions dans l'industrie de traitement de gaz.* Thèse de doctorat, Université d'Angers.

[Bai *et al.*, 2010] Bai, S.-z., Meng, R.-z. et Zhang, S.-t. (2010). Research on location selection of dairy distribution center. *In International Conference on Logistics Systems and Intelligent Management*, volume 2, pages 898–901. IEEE.

[Ballou, 1992] Ballou, R. H. (1992). *Logistics Management.* Schoonhoven, The Netherlands Academic Service.

[Bashiri et Hosseininezhad, 2009] Bashiri, M. et Hosseininezhad, S. J. (2009). A fuzzy group decision support system for multifacility location problems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 42(5-6):533–543.

[Bouyssou, 2000] Bouyssou, D. (2000). *Evaluation and decision models : a critical perspective*, volume 32. Springer Science & Business Media.

[Bouyssou *et al.*, 2006] Bouyssou, D., Marchant, T., Pirlot, M., Tsoukiàs, A. et Vincke, P. (2006). *Evaluation and decision models with multiple criteria : Stepping stones for the analyst*, volume 86. Springer Science & Business Media.

[Brans et Vincke, 1985] Brans, J.-P. et Vincke, P. (1985). Note—A Preference Ranking Organisation Method : (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). *Management science*, 31(6):647–656.

[Brans *et al.*, 1986] Brans, J.-P., Vincke, P. et Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects : The PROMETHEE method. *European journal of operational research*, 24(2):228–238.

[Brauers, 2004] Brauers, W. K. (2004). *Optimization* M*ethods for a Stakeholder Society*, volume 342. Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London.

[Buckley, 1985a] Buckley, J. J. (1985a). Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy sets and systems*, 17(3):233–247.

[Buckley, 1985b] Buckley, J. J. (1985b). Ranking alternatives using fuzzy numbers. *Fuzzy sets and systems*, 15(1):21–31.

[Chaiwuttisak *et al.*, 2016] Chaiwuttisak, P., Smith, H., Wu, Y., Potts, C., Sakuldamrongpanich, T. et Pathomsiri, S. (2016). Location of low-cost blood collection and distribution centres in Thailand. *Operations Research for Health Care*, 9:7–15.

[Chakraborty *et al.*, 2013] Chakraborty, R., Ray, A. et Dan, P. (2013). Multi criteria decision making methods for location selection of distribution centers. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 4(4):491–504.

[Chan *et al.*, 2007] Chan, F., Kumar, N. et Choy, K. (2007). Decision-making approach for the distribution centre location problem in a supply chain network using the fuzzy-based hierarchical concept. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture*, 221(4):725–739.

[Chang, 1996] Chang, D.-Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European journal of operational research*, 95(3):649–655.

[Chen, 2000] Chen, C.-T. (2000). Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy sets and systems*, 114(1):1–9.

[Chen, 2001] Chen, C.-T. (2001). A fuzzy approach to select the location of the distribution center. *Fuzzy sets and systems*, 118(1):65–73.

[Cheng et Zhou, 2016] Cheng, Y.-h. et Zhou, S.-y. (2016). Research of distribution center site selection based on fuzzy analytic hierarchy process. *In Proceedings of the 22nd International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management 2015*, pages 335–342. Springer.

[Chou et Chang, 2009] Chou, C.-C. et Chang, P.-C. (2009). A fuzzy multiple criteria decision making model for selecting the distribution center location in china :

a Taiwanese manufacturer's perspective. *Human Interface and the Management of Information. Information and Interaction*, pages 140–148.

[Chou *et al.*, 2008] Chou, S.-Y., Chang, Y.-H. et Shen, C.-Y. (2008). A fuzzy simple additive weighting system under group decision-making for facility location selection with objective/subjective attributes. *European Journal of Operational Research*, 189(1):132–145.

[Chu, 2002] Chu, T.-C. (2002). Facility location selection using fuzzy TOPSIS under group decisions. *International journal of uncertainty, fuzziness and knowledge-based systems*, 10(06):687–701.

[Chu et Lai, 2005] Chu, T.-C. et Lai, M.-T. (2005). Selecting distribution centre location using an improved fuzzy MCDM approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(3):293–299.

[Collette et Siarry, 2011] Collette, Y. et Siarry, P. (2011). *Optimisation multiobjectif : Algorithmes.* Editions Eyrolles.

[Costa, 1996] Costa, C. A. B. E. (1996). Les problématiques de l'aide à la décision : vers l'enrichissement de la trilogie choix-tri-rangement. *RAIRO-Operations Research*, 30(2):191–216.

[Courbon, 1982] Courbon, J. (1982). Processus de décision et aide à la décision. *Economies et sociétés*, 16(12).

[Crama et Hansen, 1983] Crama, Y. et Hansen, P. (1983). An introduction to the ELECTRE research programme. *In Essays and surveys on multiple criteria decision making*, pages 31–42. Springer.

[Deparis, 2012] Deparis, S. (2012). *Etude de l'effet du conflit multicritère sur l'expression des préférenes : Une approche empirique.* Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris.

[Dubois et Prade, 1982] Dubois, D. et Prade, H. (1982). The use of fuzzy numbers in decision analysis. *Fuzzy information and decision processes*, pages 309–321.

[Dubois, 1980] Dubois, D. J. (1980). *Fuzzy sets and systems : theory and applications*, volume 144. Academic press.

[Efe, 2016] Efe, B. (2016). An integrated fuzzy multi criteria group decision making approach for ERP system selection. *Applied Soft Computing*, 38:106–117.

[Ertuğrul, 2011] Ertuğrul, İ. (2011). Fuzzy group decision making for the selection of facility location. *Group Decision and Negotiation*, 20(6):725–740.

[Farahani et Asgari, 2007] Farahani, R. Z. et Asgari, N. (2007). Combination of MCDM and covering techniques in a hierarchical model for facility location : A case study. *European Journal of Operational Research*, 176(3):1839–1858.

[Farahani *et al.*, 2010] Farahani, R. Z., SteadieSeifi, M. et Asgari, N. (2010). Multiple criteria facility location problems : A survey. *Applied Mathematical Modelling*, 34(7):1689–1709.

[Fei *et al.*, 2007] Fei, C., Yan, C. et Li-wei, Z. (2007). Model for selecting location of logistics distribution center. *In IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services (GSIS)*, pages 1208–1211. IEEE.

[Fei *et al.*, 2016] Fei, T., Zhang, L., Sun, Y., Chen, L. et Ren, H. (2016). The location selection of distribution centre based on DNA artificial fish swarm algorithm. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 13(2):1406–1414.

[Guo-qin et Hong-yan, 2014] Guo-qin, J. et Hong-yan, Y. (2014). Shanghai Agricultural Products Logistics Distribution Center Location Based on Fuzzy AHP. *In International Conference on Logistics Engineering, Management and Computer Science*, pages 861–864.

[Hashim *et al.*, 2014] Hashim, M., Yao, L., Nadeem, A. H., Nazim, M. et Nazam, M. (2014). Logistics distribution centers location problem under fuzzy environment. *In Proceedings of the Seventh International Conference on Management Science and Engineering Management*, pages 927–939. Springer.

[He *et al.*, 2017] He, Y., Wang, X., Lin, Y., Zhou, F. et Zhou, L. (2017). Sustainable decision making for joint distribution center location choice. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 55:202–216.

[Hinloopen *et al.*, 1983] Hinloopen, E., Nijkamp, P. et Rietveld, P. (1983). Qualitative discrete multiple criteria choice models in regional planning. *Regional Science and Urban Economics*, 13(1):77–102.

[Hu *et al.*, 2015] Hu, W., Hou, Y., Tian, L. et Li, Y. (2015). Selection of logistics distribution center location for SDN enterprises. *Journal of Management Analytics*, 2(3):202–215.

[Hu *et al.*, 2009] Hu, Y., Wu, S. et Cai, L. (2009). Fuzzy multi-criteria decision-making TOPSIS for distribution center location selection. *In International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing (NSWCTC)*, volume 2, pages 707–710. IEEE.

[Hua *et al.*, 2016] Hua, X., Hu, X. et Yuan, W. (2016). Research optimization on logistics distribution center location based on adaptive particle swarm algorithm. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 127(20):8443–8450.

[Hwang et Thill, 2005] Hwang, S. et Thill, J.-C. (2005). Modeling localities with fuzzy sets and GIS. *Fuzzy Modeling with Spatial Information for Geographic Problems, Springer-Verlag*, pages 71–104.

[Jacquet-Lagrèze *et al.*, 1980] Jacquet-Lagrèze, E., Roy, B. *et al.* (1980). Aide à la décision multicritère et systèmes relationnels de préférences. *Cahier du LAMSADE 34*.

[Jafari *et al.*, 2010] Jafari, A., Sharif-Yazdi, M. et Jafarian, M. (2010). A New Multi-objective Approach in Distribution Centers Location Pproblem in Fuzzy Environment. *Journal of Uncertain Systems*, 4(2):133–146.

[Jahanshahloo *et al.*, 2006] Jahanshahloo, G. R., Lotfi, F. H. et Izadikhah, M. (2006). Extension of the TOPSIS method for decision-making problems with fuzzy data. *Applied Mathematics and Computation*, 181(2):1544–1551.

[Ji et Huailin, 2009] Ji, L. et Huailin, D. (2009). Research on logistics distribution center location problem based on genetic algorithm and AHP. *In International Conference on Computer Science & Education (ICCSE)*, pages 213–217. IEEE.

[Jing-min et Yan-fu, 2010] Jing-min, W. et Yan-fu, S. (2010). The Application of Multi-Level Fuzzy Comprehensive Evaluation Method in Technical and Economic Evaluation of Distribution Network. *In 2010 International Conference on Management and Service Science*.

[Ju-zhou, 2004] Ju-zhou, H. (2004). An Algorithm for Distribution Center Based on the Floyd-Shortest-Path [J]. *Journal of Hunan Agricultural University*, 4:025.

[Kahraman *et al.*, 2006] Kahraman, C., Gülbay, M. et Kabak, Ö. (2006). Applications of fuzzy sets in industrial engineering : a topical classification. *In Fuzzy Applications in Industrial Engineering*, pages 1–55. Springer.

[Kahraman *et al.*, 2003] Kahraman, C., Ruan, D. et Dogan, I. (2003). Fuzzy group decision-making for facility location selection. *Information Sciences*, 157: 135–153.

[Kamissoko, 2013] Kamissoko, D. (2013). *Aide à la décision pour l'analyse de la vulnérabilité des réseaux d'infrastructure face à une crise de catastrophe naturelle.* Thèse de doctorat, École Doctorale Systèmes (Toulouse) ; 154236462.

[Kaya et Çinar, 2006] Kaya, I. et Çinar, D. (2006). Facility location selection using a fuzzy outranking method. *In Applied Artificial Intelligence*, pages 359–366. World Scientific.

[Kuehn et Hamburger, 1963] Kuehn, A. A. et Hamburger, M. J. (1963). A heuristic program for locating warehouses. *Management science*, 9(4):643–666.

[Kumar *et al.*, 2017] Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P. et Bansal, R. (2017). A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69:596–609.

[Kuo, 2011] Kuo, M.-S. (2011). Optimal location selection for an international distribution center by using a new hybrid method. *Expert Systems with Applications*, 38(6):7208–7221.

[Lavergne, 1983] Lavergne, J.-P. (1983). *La décision : psychologie et méthodologie : connaissance du problème, applications pratiques.* ESF-Entreprise moderne d'édition : Librairies techniques.

[Leclercq, 1984] Leclercq, J. (1984). Propositions d'extension de la notion 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.

[Lee, 2005] Lee, H.-S. (2005). A fuzzy multi-criteria decision making model for the selection of the distribution center. *Advances in Natural Computation*, pages 439–439.

[Lee et Seo, 2016] Lee, S. et Seo, K.-K. (2016). A hybrid multi-criteria decision-making model for a cloud service selection problem using BSC, fuzzy Delphi method and fuzzy AHP. *Wireless Personal Communications*, 86(1):57–75.

[Lévine et Pomerol, 1990] Lévine, P. et Pomerol, J.-C. (1990). *Systèmes interactifs d" aide à la décision et systèmes experts*. Hermès.

[Li *et al.*, 2011] Li, Y., Liu, X. et Chen, Y. (2011). Selection of logistics center location using Axiomatic Fuzzy Set and TOPSIS methodology in logistics management. *Expert Systems with Applications*, 38(6):7901–7908.

[Liu *et al.*, 2011] Liu, S., Chan, F. T. et Chung, S. (2011). A study of distribution center location based on the rough sets and interactive multi-objective fuzzy decision theory. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(2):426–433.

[Lu *et al.*, 2007] Lu, J., Zhang, G., Ruan, D. et Wu, F. (2007). *Multi-objective group decision making : methods, software and applications with fuzzy set techniques*. World Scientific.

[MacQueen *et al.*, 1967] MacQueen, J. *et al.* (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *In Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability*, volume 1, pages 281–297. Oakland, CA, USA.

[Mammeri, 2013] Mammeri, M. (2013). *Une approche d'aide multicritère à la décision pour l'évaluation du confort dans les trains : construction d'un modèle d'évaluation*. Thèse de doctorat, Université Paris Dauphine-Paris IX.

[Mareschal *et al.*, 1984] Mareschal, B., Brans, J. P., Vincke, P. *et al.* (1984). PROMETHEE : A new family of outranking methods in multicriteria analysis. Rapport technique, ULB–Universite Libre de Bruxelles.

[Maystre *et al.*, 1994] Maystre, L. Y., Pictet, J. et Simos, J. (1994). *Méthodes multicritères* ELECTRE *: description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale*, volume 8. PPUR presses polytechniques.

[Min et Melachrinoudis, 1999] Min, H. et Melachrinoudis, E. (1999). The relocation of a hybrid manufacturing/distribution facility from supply chain perspectives : a case study. *Omega*, 27(1):75–85.

[Mintzberg, 1979] Mintzberg, H. (1979). *The structuring of organization :* A *synthesis of the research.* Prentice-Hall.

[Mousseau, 1993] Mousseau, V. (1993). *Problèmes liés à l'évaluation de l'importance relative des critères en aide multicritère à la décision : Réflexions théoriques, expérimentations et implémentations informatiques.* Thèse de doctorat, Paris 9.

[Nafi et Werey, 2009] Nafi, A. et Werey, C. (2009). Aide à la décision multicritère : introduction aux méthodes d'analyse multicritère de type ELECTRE I. *Module d'ingénierie financière, ENGEES*, 2010.

[Neto JL, 1999] Neto JL, d. S. (1999). *Contribution aux algorithmes d'adaptation par logique floue appliques a la commande de la machine synchrone a aimants permanents.* Thèse de doctorat, Faculté des Etudes Supérieures : Université Laval-Québec.

[Nozick et Turnquist, 1998] Nozick, L. K. et Turnquist, M. A. (1998). Integrating inventory impacts into a fixed-charge model for locating distribution centers. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 34(3):173–186.

[Ou et Chou, 2009] Ou, C.-W. et Chou, S.-Y. (2009). International distribution center selection from a foreign market perspective using a weighted fuzzy factor rating system. *Expert systems with applications*, 36(2):1773–1782.

[Pohekar et Ramachandran, 2006] Pohekar, S. et Ramachandran, M. (2006). Multi-criteria evaluation of cooking devices with special reference to utility of parabolic solar cooker (PSC) in India. *Energy*, 31(8):1215–1227.

[Rebaa, 2003] Rebaa, E.-H. (2003). *Génération automatique et optimisation de systèmes à inférence floue.* Thèse de doctorat, Université Paris-Est Créteil Val de Marne (UPEC).

[Rogers *et al.*, 2013] Rogers, M. G., Bruen, M. et Maystre, L.-Y. (2013). *Electre and decision support : methods and applications in engineering and infrastructure investment*. Springer Science & Business Media.

[Roubens, 1982] Roubens, M. (1982). Preference relations on actions and criteria in multicriteria decision making. *European Journal of Operational Research*, 10(1): 51–55.

[Roy, 1968] Roy, B. (1968). Classement et choix en présence de points de vue multiples. *Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle*, 2(8):57–75.

[Roy, 1974] Roy, B. (1974). Critères multiples et modélisation des préférences (l'apport des relations de surclassement). *Revue d'économie politique*, 84(1):1–44.

[Roy, 1978] Roy, B. (1978). Algorithme de classement basé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples. *Cahiers du CERO*, 20(1):3–24.

[Roy, 1985] Roy, B. (1985). *Méthodologie multicritère d" aide à la décision*. Economica.

[Roy, 1989] Roy, B. (1989). *L'aide multicritère à la décision*. Editions Ellipses.

[Roy, 2013] Roy, B. (2013). *Multicriteria methodology for decision aiding*, volume 12. Springer Science & Business Media.

[Roy et Bertier, 1973] Roy, B. et Bertier, P. (1973). La méthode ELECTRE II, une application au média-planning. *M. Ross, Ed. Operational research 1972*, pages 291–302.

[Roy et Bouyssou, 1993] Roy, B. et Bouyssou, D. (1993). *Aide multicritère à la décision : Méthodes et cas*. Economica.

[Roy et Hugonnard, 1982] Roy, B. et Hugonnard, J.-C. (1982). Ranking of suburban line extension projects on the Paris metro system by a multicriteria method. *Transportation Research Part A : General*, 16(4):301–312.

[Roy et Skalka, 1987] Roy, B. et Skalka, J.-M. (1987). ELECTRE IS *: Aspects méthodologiques et guide d'utilisation*. LAMSADE, Unité associée au CNRS no 825, Université de Paris Dauphine.

[Roy et Vincke, 1981] Roy, B. et Vincke, P. (1981). Multicriteria analysis : survey and new directions. *European Journal of Operational Research*, 8(3):207–218.

[Saaty, 1980] Saaty, T. (1980). The analytical hierarchy process : planning, setting priorities, resource allocation.

[Saghafian et Hejazi, 2005] Saghafian, S. et Hejazi, S. R. (2005). Multi-criteria group decision making using a modified fuzzy TOPSIS procedure. *In International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation, and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce*, volume 2, pages 215–221. IEEE.

[Sakawa, 2013] Sakawa, M. (2013). *Fuzzy sets and interactive multiobjective optimization.* Springer Science & Business Media.

[Sanayei *et al.*, 2010] Sanayei, A., Mousavi, S. F. et Yazdankhah, A. (2010). Group decision making process for supplier selection with VIKOR under fuzzy environment. *Expert Systems with Applications*, 37(1):24–30.

[Sfez, 1976] Sfez, L. (1976). *Critique de la décision.* Presses de la Fondation nationale des sciences politiques.

[Simić *et al.*, 2015] Simić, D., Ilin, V., Tanackov, I., Svirčević, V. et Simić, S. (2015). A hybrid analytic hierarchy process for clustering and ranking best location for logistics distribution center. *In International Conference on Hybrid Artificial Intelligence Systems*, pages 477–488. Springer.

[Simon, 1977] Simon, H. (1977). The New science of Management Decision, Prentice Hall. *Englewood Cliffs, NJ.*

[Sopha *et al.*, 2016] Sopha, B. M., Asih, A. M. S., Pradana, F. D., Gunawan, H. E. et Karuniawati, Y. (2016). Urban distribution center location : Combination of spatial analysis and multi-objective mixed-integer linear programming. *International Journal of Engineering Business Management*, 8:1847979016678371.

[Stal-Le Cardinal, 2000] Stal-Le Cardinal, J. (2000). *Etude des dysfonctionnements dans la prise de décision.* A*pplication au choix d'acteur.* Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris.

[Sun *et al.*, 2008] Sun, H., Gao, Z. et Wu, J. (2008). A bi-level programming model and solution algorithm for the location of logistics distribution centers. *Applied mathematical modelling*, 32(4):610–616.

[Takači *et al.*, 2012] Takači, A., Marić, M. et Drakulić, D. (2012). The role of fuzzy sets in improving maximal covering location problem (MCLP). *In Intelligent Systems and Informatics (SISY), 2012 IEEE 10th Jubilee International Symposium on*, pages 103–106. IEEE.

[Tang *et al.*, 2016] Tang, X., Lehuédé, F. et Péton, O. (2016). Location of distribution centers in a multi-period collaborative distribution network. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 52:293–300.

[Tang *et al.*, 2013] Tang, Z., Guo, C., Hou, P. et Fan, Y. (2013). Optimal Siting of Electric Vehicle Charging Stations Based on Voronoi Diagram and FAHP Method. *Energy and Power Engineering*, 5(04):1404.

[Tomić *et al.*, 2014] Tomić, V., Marinković, D. et Marković, D. (2014). The selection of logistic centers location using multi-criteria comparison : case study of the Balkan Peninsula. *Acta Polytechnica Hungarica*, 11(10):97–111.

[Tomić *et al.*, 2013] Tomić, V., Memet, A., Milosavljević, M. et Milisavljević, S. (2013). Decision on the logistics centers location, case of the balkan peninsula. *Ann. Oradea Univ. Fascicle Manage. Technol. Eng*, (2):330–338.

[Trivedi et Singh, 2017] Trivedi, A. et Singh, A. (2017). A hybrid multi-objective decision model for emergency shelter location-relocation projects using fuzzy analytic hierarchy process and goal programming approach. *International Journal of Project Management*, 35(5):827–840.

[Tsoukiàs, 2008] Tsoukiàs, A. (2008). From decision theory to decision aiding methodology. *European Journal of Operational Research*, 187(1):138–161.

[Turkoglu et Genevois, 2017] Turkoglu, D. C. et Genevois, M. E. (2017). An Analytical Approach for Evaluation of ATM Deployment Problem Criteria. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, pages 1–32.

[Van Thai et Grewal, 2005] Van Thai, V. et Grewal, D. (2005). Selecting the location of distribution centre in logistics operations : A conceptual framework and case study. *Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics*, 17(3):3–24.

[Vincke, 1992] Vincke, P. (1992). L'Aide Multicriterea la décision, Editions de l'Université de Bruxelles-Editions Ellispses, Bruxelles. *English translation : Multicriteria decision-aid, Wiley.*

[Wang *et al.*, 2005] Wang, X.-B., Li, Y.-J. et Sun, J.-Y. (2005). Research on logistics distribution center location model and fuzzy comprehensive evaluation under electronic commerce. *In Proceedings of 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, volume 5, pages 2789–2796. IEEE.

[Wang *et al.*, 2012] Wang, Y., Ma, X.-l., Wang, Y.-h., Mao, H.-j. et Zhang, Y. (2012). Location optimization of multiple distribution centers under fuzzy environment. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 13(10):782–798.

[Wang et Lee, 2007] Wang, Y.-J. et Lee, H.-S. (2007). Generalizing TOPSIS for fuzzy multiple-criteria group decision-making. *Computers & Mathematics with Applications*, 53(11):1762–1772.

[Wei et Wang, 2009] Wei, J.-Y. et Wang, C.-h. (2009). A novel approach—fuzzy ANP for distribution center location. *In International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, volume 1, pages 537–542. IEEE.

[Wolf, 2011] Wolf, G. W. (2011). Facility location : concepts, models, algorithms and case studies. Series : Contributions to Management Science : edited by Zanjirani Farahani, Reza and Hekmatfar, Masoud, Heidelberg, Germany, Physica-Verlag, 2009, 549 pp.

[Wolfslehner *et al.*, 2005] Wolfslehner, B., Vacik, H. et Lexer, M. J. (2005). Application of the analytic network process in multi-criteria analysis of sustainable forest management. *Forest ecology and management*, 207(1):157–170.

[Wu et Lee, 2007] Wu, W.-W. et Lee, Y.-T. (2007). Developing global managers' competencies using the fuzzy DEMATEL method. *Expert systems with applications*, 32(2):499–507.

[Xu *et al.*, 2011] Xu, J., Yao, L. et Zhao, X. (2011). A multi-objective chance-constrained network optimal model with random fuzzy coefficients and its application to logistics distribution center location problem. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 10(3):255–285.

[Yang *et al.*, 2007] Yang, L., Ji, X., Gao, Z. et Li, K. (2007). Logistics distribution centers location problem and algorithm under fuzzy environment. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 208(2):303–315.

[Yang, 2010] Yang, X.-S. (2010). *Nature-inspired metaheuristic algorithms*. Luniver press.

[Yegane *et al.*, 2016] Yegane, B. Y., Kamalabadi, I. N. et Farughi, H. (2016). A non-linear integer Bi-level programming model for competitive facility location of distribution centers. *International Journal of Engineering-Transactions B : Applications*, 29(8):1131.

[Yong, 2006] Yong, D. (2006). Plant location selection based on fuzzy TOPSIS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(7):839–844.

[Yoon et Hwang, 1981] Yoon, K. et Hwang, C. (1981). Topsis (technique for order preference by similarity to ideal solution)–a multiple attribute decision making, w : Multiple attribute decision making–methods and applications, a state-of-the-at survey.

[Yu *et al.*, 2009] Yu, X., Zhang, X. et Mu, L. (2009). A fuzzy decision making model to select the location of the distribution center in logistics. *In IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL)*, pages 1144–1147. IEEE.

[Zadeh, 1965] Zadeh, L. A. (1965). Information and control. *Fuzzy sets*, 8(3):338–353.

[Zadeh, 1975a] Zadeh, L. A. (1975a). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information sciences*, 8(3):199–249.

[Zadeh, 1975b] Zadeh, L. A. (1975b). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—II. *Information sciences*, 8(4):301–357.

[Zadeh, 1996] Zadeh, L. A. (1996). Fuzzy sets. *In Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, And Fuzzy Systems : Selected Papers by Lotfi A Zadeh*, pages 394–432. World Scientific.

[Zandi et Roghanian, 2013] Zandi, A. et Roghanian, E. (2013). Extension of Fuzzy ELECTRE based on VIKOR method. *Computers & Industrial Engineering*, 66(2):258–263.

[Zeng *et al.*, 2016] Zeng, Q., Li, C., Wu, X., Long, S., Zhang, Z., Liu, R., Huang, T. et Liu, Y. (2016). Location selection of multiple logistics distribution center based on particle swarm optimization. *In International Conference on Intelligent Computing*, pages 651–658. Springer.

[Zhang *et al.*, 2009] Zhang, J., Tian, C., Zhang, N. et Fang, W. (2009). Location decision model on distribution center of emergency logistics for emergency event based on multilayer fuzzy optimization. *In International Conference on Energy and Environment Technology (ICEET)*, volume 3, pages 385–388. IEEE.

[Zhang *et al.*, 2013] Zhang, M., Pang, H., Zhang, S. et Meng, R. (2013). Selection of location for book distribution center based on genetic algorithm. *Journal of Convergence Information Technology*, 8(7).

[Zhou et Liu, 2007] Zhou, J. et Liu, B. (2007). Modeling capacitated location–allocation problem with fuzzy demands. *Computers & industrial engineering*, 53(3):454–468.

[Zhou *et al.*, 2015] Zhou, L., Zhang, G. et Liu, W. (2015). A new method for the selection of distribution centre locations. *IMA Journal of Management Mathematics*, page dpv021.

[Zhou, 2005] Zhou, R. (2005). SPSS13. 0 statistical software.

[Zhuge *et al.*, 2016] Zhuge, D., Yu, S., Zhen, L. et Wang, W. (2016). Multi-period distribution center location and scale decision in supply chain network. *Computers & Industrial Engineering*, 101:216–226.

[Zimmermann, 2011] Zimmermann, H.-J. (2011). *Fuzzy set theory—and its applications*. Springer Science & Business Media.

Méthodes d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur pour résoudre le problème de sélection dans un environnement certain/incertain : cas de la localisation des centres de distribution

Résumé : Le travail de recherche présenté dans cette thèse s'inscrit dans la continuité des travaux de l'aide à la décision multi-critère de groupe (décideurs), particulièrement dans le champ de sélection de la localisation des centres de distribution. Dans un environnement certain, si la décision de sélection de la localisation des centres de distribution a donné lieu à plusieurs travaux de recherche, elle n'a jamais été l'objet, à notre connaissance, d'une décision prise par plusieurs décideurs. À cet égard, le premier objectif de cette thèse est de proposer une méthode d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur (MAADM) pour résoudre le problème posé. Pour se faire, nous avons adapté et étendu la méthode ELECTRE I. Dans un environnement incertain, au vu de l'incertitude inhérente et l'imprécision du processus décisionnel humain ainsi que les comportements futurs du marché et des entreprises, le deuxième objectif de cette thèse est de développer une méthode floue d'aide à la décision multi-attribut et multi-acteur (FMAADM) pour traiter le problème en question. Pour cela, nous avons couplé la méthode MAADM avec la théorie des ensembles flous. Pour la validation des deux contributions, nous avons conçu un système d'aide à la décision (S-DSS) pour implémenter les algorithmes de la méthode MAADM et la méthode FMAADM. Sur la base du S-DSS, deux études expérimentales ont été menées. Nous avons, aussi, appliqué une analyse de sensibilité pour vérifier la sensibilité de la solution retenue vis-à-vis aux variations de poids des critères d'évaluation. Les résultats obtenus prouvent que les deux méthodes proposées répondent à l'objectif recherché et ainsi retenues pour la sélection de la meilleure localisation dans un contexte certain/incertain de multi-attribut et multi-acteur.

Mots-clés : aide à la décision multi-critère, multi-attribut, multi-acteur, ELECTRE I, théorie des ensembles flous, système d'aide à la décision.

Multi-attribute and multi-actor decision making methods for solving the selection problem under certain/uncertain environment : case of distribution centers location

Abstract : The research work presented in this thesis is part of the works' continuity on multi-criteria group (decision-makers) decision-making, particularly in the field of the distribution centers' location selection. Under certain environment, although the decision to select the location of the distribution centers has given rise in several research works, it has never been the object, to our knowledge, of a decision taken by several decision makers. In this regard, the first objective of this thesis is to develop a multi-attribute and multi-actor decision-making method (MAADM) to resolve the posed problem. For this purpose, we have adapted and extended the ELECTRE I method. Under uncertain environment, In view of the inherent uncertainty and inaccuracy of human decision-making, the future behavior of the market and companies, the second objective of this thesis is to propose a fuzzy multi-attribute and multi-actor decision-making method (FMAADM) to treat the problem in question. To this end, we have coupled the MAADM method with the fuzzy set theory. To validate the two contributions, we designed a decision support system (S-DSS) to implement the MAADM method and the FMAADM method. Based on the S-DSS, two experimental studies were conducted. We also applied a sensitivity analysis to verify the sensitivity of the solution retained vis-a-vis to weights' variations of evaluation criteria. The obtained results prove that the MAADM method and the FMAADM method meet the desired objective and thus retained for the selection of the best location under certain/uncertain context of multi-attribute and multi-actor.

Keywords : multi-criteria decision making, multi-attribute, multi-actor, ELECTRE I, fuzzy set theory, decision support system.