



**HAL**  
open science

# Optimisation et évaluation des performances des communications mobiles dans un environnement réseaux multi-accès

Mohamed Lahby

► **To cite this version:**

Mohamed Lahby. Optimisation et évaluation des performances des communications mobiles dans un environnement réseaux multi-accès. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université Hassan II Mohammedia-Casablanca, 2013. Français. NNT: . tel-01354207

**HAL Id: tel-01354207**

**<https://hal.science/tel-01354207v1>**

Submitted on 18 Aug 2016

**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.

Copyright



**Université Hassan II Mohammedia -  
Casablanca**

**Thèse de Doctorat**

**: Présentée par**

**M. MOHAMED LAHBY**

**Spécialité :**

**Informatique**

**Sujet de la thèse :**

**Optimisation et évaluation des performances des  
communications mobiles dans un environnement  
Réseaux multi-accès**

**Thèse présentée et soutenue à Mohammedia le 30  
: Novembre 2013 devant le jury composé de**

<b>M. RAMDANI</b>	<b>PES (FSTM)</b>	<b>Président</b>
<b>A.BEKKHOCHA</b>	<b>PES (FSTM)</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>M.BELLAFKIH</b>	<b>PES (INPT)</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>M. EL KOUTBI</b>	<b>PES (ENSIAS)</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>M .ESSAIDI</b>	<b>PES (ENSIAS)</b>	<b>Examineur</b>
<b>A. ADIB</b>	<b>PES (FSTM)</b>	<b>Directeur de thèse</b>
<b>M. CHERKAOUI</b>	<b>PA (FSTM)</b>	<b>Co-encadrant</b>

**Etablissement : Faculté des Sciences et Techniques de Mohammedia  
CEDoc : Sciences, Techniques, Ingénierie et Développement Durable  
Nom du laboratoire : Laboratoire d'informatique de Mohammedia**

2013

**Optimisation et évaluation des performances des  
communications mobiles dans un environnement réseaux  
multi-accès**

**LAHBY Mohamed**

## Résumé :

Les réseaux de la future génération représentent un environnement hétérogène sans fil, dans lequel de nombreuses technologies d'accès peuvent cohabiter. Au sein de cet environnement, les utilisateurs ont le privilège de rester connectés à l'Internet à travers des terminaux multi-interfaces. De plus, ils ont la possibilité de se doter de différents services, peu n'importe le lieu et le temps. Afin de gérer la mobilité du terminal tout en assurant une meilleure continuité de service, la mise en œuvre d'une architecture pour la gestion du handover vertical est devenue indispensable. Cette thèse se focalise sur le handover vertical, plus précisément sur la phase de la sélection du réseau dans un environnement de réseaux hétérogènes sans fil. Dans ce contexte, notre première contribution propose une nouvelle architecture pour la sélection du réseau reposant sur les méthodes d'aide à la décision multi-attributs (MADM). Cette solution, simple à intégrer dans la norme IEEE 802.21, comporte deux modules : le premier pour pondérer les critères et le deuxième pour classer les réseaux. Ensuite, nous nous intéressons à la résolution de différents problèmes relatifs à la pondération des critères afin d'améliorer davantage notre architecture. Pour ce faire, nous avons développé dans un premier temps, une nouvelle approche de la validation des algorithmes du handover en utilisant la théorie de la prise de décision collective. Cette nouvelle approche nous a permis d'identifier l'algorithme de pondération qu'il faut intégrer dans notre architecture. Dans un deuxième temps, nous avons intégré une nouvelle unité de différenciation de poids au niveau du module de pondération de notre architecture. Le rôle de cette unité est de calculer le degré d'importance relatif à chaque critère en fonction de l'interface réseau. Finalement, nous proposons un nouveau modèle d'évaluation de performances qui repose sur l'approche MADM et l'analyse de criticité. L'efficacité de ce modèle se manifeste dans sa capacité de

## Abstract

The next generation of networks represents a heterogeneous wireless environment, characterized by the coexistence of multiple technologies. In this environment, the users have the privilege to stay connected to the Internet by using mobile terminals equipped with multiple interfaces. Additionally, the users have the ability to use different services at anytime and anywhere. In this context, the most important aim is to manage the terminal mobility while ensuring the best continuity of services. In order to achieve this task, the design and the development of architecture for the vertical handover management becomes an indispensable. This thesis is focusing on vertical handover management and mainly on network selection decision step within heterogeneous wireless networks. In this context, our first contribution proposes a new architecture for network selection, based on multi attribute decision making (MADM). This solution is based on the IEEE 802.21 standard, contains two modules: the first one is used to weigh the criteria. While the second is applied to rank the networks. Then, we consider the problem of optimizing the weighting algorithms of our architecture. Specifically, we first develop a new validation approach which can take into account different weighting methods. Our approach is based on group MADM and it allows determining a suitable weighting algorithm which can be used for the network selection. We then improve our architecture by introducing component based on differentiated weight which can be integrated into weighting module of our architecture. This component allows to find the differentiate weights of available networks by considering each criterion. Finally, due to the variety of vertical handoff algorithms, we provide a new evaluation model to reach an optimal network selection

**www.univh2m.ac.ma**

**Avenue Hassan II B.P. 150, Mohammedia,  
Maroc**

**Tél : +212 5 23 31 46 35/36 Fax : +212 5 31 46**

# Optimisation et évaluation des performances des communications mobiles dans un environnement réseaux multi-accès

Mohamed Lahby

Thèse présentée et soutenue à Mohammedia le 30 Novembre 2013  
Université Hassan II de mohammedia-FST-



---

# DEDICACES

Cette thèse est dédiée à

**Ma famille,**

**Mes ami(e)s,**

**Tous ceux qui m'aiment et que j'aime.**

---

# REMERCIEMENT

Les travaux évoqués dans le présent mémoire ont été réalisés dans le cadre de ma thèse qui a pris forme au sein du Laboratoire d'informatique de Mohammedia (LIM) de l'Université Hassan II Mohammedia-Casablanca, Maroc.

Tout d'abord, je remercie très sincèrement mes deux encadrants de thèse MM Abdellah Adib et Cherkoui Leghris qui m'ont accompagné durant ces quatre années. Je n'oublie pas leurs sacrifices ainsi que leur disponibilité malgré leurs multiples tâches et engagements. Je tiens aussi à leur exprimer ma plus sincère gratitude pour leur inestimable aide en vue de mener à bon terme cette thèse.

Mes vifs remerciements vont également au directeur du laboratoire Monsieur Mohammed Ramdani de m'avoir permis de m'inscrire au sein du laboratoire LIM et de m'avoir prodigué volontiers ses précieux conseils tout le temps. Je tiens à remercier aussi les membres du laboratoire avec qui j'ai partagé l'espace des ambitions motivantes durant toute ma thèse.

Dans le même cadre, j'exprime ma reconnaissance à l'égard de toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'accomplissement du présent humble travail, ceux qui m'ont apporté soutien par leurs encouragements, particulièrement Messieurs Azzedine Boulmakoul et Abdelkrim Bekkhoucha qui 'ont été généreux par leurs conseils avisés témoignant d'une riche expérience et de compétences scientifiques remarquables.

Je tiens également à adresser mes vifs remerciements au professeur Mohammed Ramdani d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse, ainsi qu'à tous les membres du jury. Je tiens à remercier particulièrement le Professeur Mohammed El koutbi à l'ENSIAS, le professeur Mostafa Bellafkih professeur à l'INPT ainsi que le professeur Abdelkrim Bekkhoucha à la FST de Mohammedia d'avoir bien voulu rapporter cette thèse. Je remercie également Monsieur Mohammed Essaidi directeur de l'ENSIAS d'avoir bien voulu examiner cette thèse.

Enfin, je souhaite remercier tous les membres de ma famille pour leur soutien constant sans lequel je ne serais jamais parvenu à ce stade de réussite. J'adresse également mes remerciements à ma soeur Rachida Lahby, qui a financé mes études universitaires et mes voyages pour participer à plusieurs conférences internationales.

---

# LISTE DES PUBLICATIONS

Le travail mené lors de cette thèse a donné lieu à plusieurs contributions scientifiques. Nous donnons ci-dessous la liste des différents articles :

## Article journal publié

1. M. LAHBY, C. LEGHRIS, A. ADIB, "**A Novel Ranking Algorithm Based Network Selection For Heterogeneous Wireless Access**", Journal of Networks, Vol. 8, no. 2, pp. 263-272, 2013.
2. M. LAHBY, C. LEGHRIS, A. ADIB, "**Towards an Efficient Network Selection Technique Based on Differentiated Weight of Access Interface**", International Journal of Business Data Communications and Networking (IJBDCN), Vol. 4, no. 8, pp. 32-48, 2012
3. M. LAHBY, C. LEGHRIS, A. ADIB, "**New Optimized Network Selection Decision in Heterogeneous Wireless Networks**", International Journal of Computer Applications (IJCA), Vol. 54, Issue 16, pp.1-7, Septembre 2012 ;
4. M. LAHBY, C. LEGHRIS, A. ADIB, "**An Enhanced Evaluation Model For Vertical Handover Algorithm In Heterogeneous Networks**", International Journal of Computer Science Issues (IJCSI), Vol. 9, Issue 3, No 2, pp.254-259, May 2012 ;
5. M. LAHBY, C. LEGHRIS, A. ADIB, "**Network Selection Decision Based on Handover History in Heterogeneous Wireless Networks**", International Journal of Computer Science and Telecommunication (IJCST), Vol.3, Issue 2, pp.21-25, February 2012 ;

## Book Chapter

1. M. LAHBY, C. LEGHRIS, A. ADIB, "**New Validation Approach Based on Group MADM for Network Selection**", Chapter book in "Networked Systems", Volume Editors Vincent Gramoli and Rachid Guerraoui, Lecture Notes in Computer Science Volume 7853, pp. 306-310, ISBN 978-3-642-40147-3, Publisher Springer Berlin Heidelberg, 2013.

## Conférences internationales

1. M. LAHBY, C. LEGHRIS, A. ADIB, "**An Enhanced-TOPSIS Based Network Selection Technique for Next Generation Wireless Networks**", In the Proceedings of the 20th International Conference on Telecommunications (ICT 2013), pp. 1-5, 2013, Casablanca, Morocco ;
2. M. LAHBY, C. LEGHRIS, A. ADIB, "**Hybrid Network Selection Strategy by Using M-AHP/E-TOPSIS for Heterogeneous Networks**", In the Proceedings of the 8th International Conference on Intelligent Systems : Theories and Applications, (SITA 2013), pp. 1-6, May 2013, Rabat Morocco ;
3. M. LAHBY, C. LEGHRIS, A. ADIB, "**Novel validation approach for network selection algorithm by applying the group MADM** ", In the Proceedings of the 10th ACS/IEEE International Conference on computer systems and applications, pp. 1-4, May 2013, Ifrane, Morocco ;
4. M. LAHBY, C. LEGHRIS, A. ADIB, "**Network Selection Mechanism by Using M-AHP and GRA For Heterogeneous Networks**", In the Proceedings of the Sixth Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC), pp. 1-6, April 2013, Dubai, United Arab Emirates ;
5. M. LAHBY, C. LEGHRIS, A. ADIB, "**Reducing Handover Metrics For Access Network Selection In Heterogeneous Wireless Networks**", the Second International Conference on Innovative Computing Technology (INTECH 2012), pp.75-80, Septembre 2012, Casablanca, Morocco ;
6. M. LAHBY, C. LEGHRIS, A. ADIB, "**New Multi Access Selection method using differentiated weight of access interface**", The 2nd International Conference on Communications and Information Technology IEEE, University of carthage, pp.237-242, June 2012, Hammamet, Tunisia ;
7. M. LAHBY, C. LEGHRIS, A. ADIB, "**Network selection algorithm based on Diff-AHP and TOPSIS in heterogeneous wireless networks**", The 3th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS'12), IEEE Morocco section, pp.485-490, May 2012, Tangier, Morocco ;

8. M. LAHBY, C. LEGHRIS, A. ADIB, "**A survey and comparison study on weighting algorithms for access network selection**", The 9th IFIP/IEEE International conference on wireless on demand network systems and services, École Polytechniques Torino, pp.35-38, January 2012, Courmayeur, Italy ;
9. M. LAHBY, C. LEGHRIS, A. ADIB, "**Optimal Network Selection Using Multi Attribute Decision Making for Future Generation Wireless Network**", The 2nd International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS'11), pp. 1-5, April 2011, Ouarzazate, Morocco ;
10. M. LAHBY, C. LEGHRIS, A. ADIB, "**A hybrid Approach for Network Selection in Heterogeneous Multi-Access Environments**", The Third IFIP/IEEE International New Technologies, Mobility and Security (NTMS'2011), Telecom ParisTech, CNRS, pp.1-5, Paris, France February 2011.

## Workshops Internationals

1. M. LAHBY, C. LEGHRIS, A. ADIB, "**Access Network Selection Using Parallel Weighting System and TOPSIS Algorithm**", the second edition of workshops devoted to the theory and applications of Error Correcting Codes, Cryptography and Communication Systems, ENSIAS, June 16-17 2011, Rabat, Morocco.

## Journées Doctorales

1. M. LAHBY, C. LEGHRIS, A. ADIB, "**Une Méthode Hybride pour la Décision de Handover Vertical dans un Environnement sans fil Hétérogène**", 3ème édition des Journées Doctorales en Technologies de l'information et de la Communication (JD-TIC'11), ENSA, 7-9 Juillet 2011, Tanger, Maroc.

## Article journal soumis à publication

1. M. LAHBY, C. LEGHRIS, A. ADIB, "**A New survey of vertical handover decision algorithms**", Submitted to Pervasive and Mobile Computing ELSEVIER, January 2013 ;
2. M. LAHBY, C. LEGHRIS, A. ADIB, "**An Intelligent Weighting Model Based on Handover Decision in Heterogeneous Networks**", Submitted to Computer Communications Elsevier, April 2013 ;
3. M. LAHBY, C. LEGHRIS, A. ADIB, "**New Normalization Algorithm Based Network Selection in Heterogeneous Wireless Networks**", Submitted to Journal of Network and Computer Application Elsevier, July 2013.

---

# TABLE DES MATIÈRES

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 ETAT DE L'ART</b>	<b>6</b>
1.1 Introduction	6
1.2 Les normes des technologies de communication	7
1.2.1 La norme IEEE 802.15	8
1.2.2 La norme IEEE 802.11	9
1.2.3 La norme IEEE 802.16	9
1.2.4 La norme GPRS	10
1.2.5 La norme UMTS	10
1.2.6 La norme LTE	11
1.2.7 Comparaison et synthèse des technologies sans fil	12
1.3 Contraintes et exigences des réseaux hétérogènes	12
1.4 Gestion de mobilité dans les réseaux hétérogènes	13
1.4.1 Définition	13
1.4.2 Types de mobilité	14
1.4.2.1 Mobilité du terminal	14
1.4.2.2 Mobilité du réseau	14
1.4.2.3 Mobilité de l'utilisateur	14
1.4.2.4 Mobilité du service	15
1.4.2.5 Mobilité de session	15
1.4.3 Les niveaux de mobilité	15
1.4.3.1 Mobilité de niveau 2	15
1.4.3.2 Mobilité de niveau 3	15
1.4.3.3 Mobilité de niveau 4	15
1.4.3.4 Mobilité de niveau 5	16
1.4.4 Mobile IPv6 (MIPv6)	16
1.4.5 Positionnement de notre étude sur la mobilité	17
1.5 Gestion de handover dans les réseaux hétérogènes	17
1.5.1 Qu'est ce qu'un handover ?	18
1.5.2 Classification de terminologies des handovers	18
1.5.3 Positionnement de notre thèse sur le handover	20
1.5.4 Le processus du handover vertical	20

1.5.5	Les caractéristiques désirables de handover vertical . . . . .	21
1.5.6	Les critères de sélection du réseau . . . . .	22
1.5.7	Classification des algorithmes du handover . . . . .	23
1.5.8	Evaluation de performance du handover vertical . . . . .	25
1.5.9	La norme IEEE 802.21 . . . . .	25
1.6	Les algorithmes de la décision du handover vertical . . . . .	27
1.6.1	Les algorithmes conventionnels . . . . .	27
1.6.1.1	La puissance du signal RSS . . . . .	27
1.6.1.2	La bande passante . . . . .	27
1.6.1.3	La vitesse . . . . .	28
1.6.1.4	La direction . . . . .	28
1.6.2	Les approches basées sur l'intelligence artificielle . . . . .	28
1.6.2.1	La logique floue . . . . .	28
1.6.2.2	Les réseaux de neurones artificiels (RNA) . . . . .	29
1.6.2.3	La théorie des jeux . . . . .	29
1.6.3	Les approches basées sur l'agrégation des paramètres . . . . .	30
1.6.3.1	La fonction de coût . . . . .	30
1.6.3.2	La fonction d'utilité . . . . .	31
1.6.3.3	Les méthodes MADM . . . . .	31
1.6.4	Les approches hybrides . . . . .	32
1.6.5	Comparaison et synthèse entre les algorithmes du handover vertical . . . . .	32
1.7	Conclusion . . . . .	34
<b>2</b>	<b>LA SELECTION DU RESEAU BASEE SUR LES METHODES MADM : Etat de l'art</b>	<b>37</b>
2.1	Introduction . . . . .	37
2.2	Classification des méthodes d'aide à la décision multi-critères . . . . .	37
2.3	Le principe de fonctionnement de l'approche MADM . . . . .	39
2.4	Optimisation de la sélection du réseau basée sur l'approche MADM . . . . .	40
2.5	Les méthodes de normalisation . . . . .	41
2.5.1	La technique de normalisation euclidienne . . . . .	41
2.5.2	La technique de normalisation par le minimum-maximum (min-max) . . . . .	42
2.5.3	La technique de normalisation par le maximum (max) . . . . .	42
2.5.4	La technique de normalisation par la somme (sum) . . . . .	42
2.6	Les algorithmes de pondération . . . . .	42
2.6.1	La méthode AHP . . . . .	43
2.6.1.1	Fondements de la méthode . . . . .	43
2.6.1.2	Contexte de sélection de réseau basée sur AHP . . . . .	45
2.6.1.3	Critiques . . . . .	45
2.6.1.4	La méthode AHP floue (Fuzzy AHP : FAHP) . . . . .	45
2.6.2	La méthode ANP . . . . .	48
2.6.2.1	Fondements de la méthode . . . . .	48
2.6.2.2	Contexte de sélection de réseau basée sur ANP . . . . .	49
2.6.2.3	Critiques . . . . .	49
2.6.2.4	La méthode ANP floue (Fuzzy ANP) . . . . .	50
2.7	Les algorithmes de classement (ranking) . . . . .	50
2.7.1	TOPSIS . . . . .	50
2.7.1.1	Fondements de la méthode . . . . .	50

2.7.1.2	Sélection de réseau basée sur TOPSIS . . . . .	51
2.7.1.3	Critiques . . . . .	53
2.7.2	GRA . . . . .	54
2.7.2.1	Fondements de la méthode . . . . .	54
2.7.2.2	Sélection de réseau basée sur GRA . . . . .	54
2.7.2.3	Critiques . . . . .	56
2.7.3	La méthode SAW . . . . .	56
2.7.3.1	Fondements de la méthode . . . . .	56
2.7.3.2	Sélection de réseau basée sur SAW . . . . .	57
2.7.3.3	Critiques . . . . .	58
2.7.4	La méthode MEW . . . . .	59
2.7.4.1	Fondements de la méthode . . . . .	59
2.7.4.2	Sélection de réseau basée sur MEW . . . . .	60
2.7.4.3	Critiques . . . . .	60
2.8	Evaluation des performances des algorithmes de handover basés sur l'approche MADM . . . . .	61
2.8.1	Evaluation et comparaison des algorithmes MADM . . . . .	61
2.8.2	Bilan . . . . .	64
2.9	Conclusion . . . . .	65
<b>3</b>	<b>UNE NOUVELLE ARCHITECTURE POUR LA SELECTION DE RESEAU</b>	<b>66</b>
3.1	Introduction . . . . .	66
3.2	Le problème d'anomalie de classement . . . . .	67
3.3	Une technique améliorée basée sur la méthode TOPSIS pour la sélection du réseau (E-TOPSIS) . . . . .	69
3.3.1	Le principe de la méthode E-TOPSIS . . . . .	69
3.3.2	Pondération AHP . . . . .	70
3.3.2.1	Elicitation de poids : service en arrière-plan . . . . .	71
3.3.2.2	Elicitation de poids : service conversationnel . . . . .	71
3.3.2.3	Elicitation de poids : service interactif . . . . .	72
3.3.2.4	Elicitation de poids : service streaming . . . . .	72
3.3.3	L'algorithme de la sélection réseau basé sur E-TOPSIS et AHP . . . . .	73
3.3.4	Simulations et résultats . . . . .	73
3.3.4.1	Scénario de simulation . . . . .	73
3.3.4.2	La simulation 1 . . . . .	74
3.3.4.3	La simulation 2 . . . . .	75
3.3.4.4	La simulation 3 . . . . .	76
3.3.4.5	La simulation 4 . . . . .	77
3.3.5	Discussion . . . . .	78
3.4	Un algorithme hybride pour la sélection du réseau basé sur l'historique de la performance . . . . .	78
3.4.1	Le principe de l'algorithme de la sélection basé sur AHP flou et TOPSIS . . . . .	78
3.4.2	Pondération AHP flou . . . . .	79
3.4.2.1	Elicitation de poids : service en arrière-plan . . . . .	80
3.4.2.2	Elicitation de poids : service conversationnel . . . . .	80
3.4.2.3	Elicitation de poids : service interactif . . . . .	80
3.4.2.4	Elicitation de poids : services streaming . . . . .	82
3.4.3	Simulations et résultats . . . . .	82

3.4.3.1	Scénario de simulation . . . . .	82
3.4.3.2	La simulation 1 . . . . .	83
3.4.3.3	La simulation 2 . . . . .	84
3.4.3.4	La simulation 3 . . . . .	85
3.4.3.5	La simulation 4 . . . . .	86
3.4.4	Discussion . . . . .	87
3.5	Une nouvelle architecture pour la sélection du réseau . . . . .	87
3.5.1	Introduction . . . . .	87
3.5.2	Un nouveau schéma pour la sélection du réseau . . . . .	88
3.5.2.1	Module de pondération basé sur la classification de critères . . . . .	89
3.5.2.2	Module de classement basé sur la distance de Mahalanobis . . . . .	90
3.5.3	L'algorithme de sélection du réseau basé sur notre schéma (FADM) . . . . .	91
3.5.4	Simulations et résultats . . . . .	92
3.5.4.1	Scénario de simulation . . . . .	92
3.5.4.2	La simulation 1 . . . . .	93
3.5.4.3	La simulation 2 . . . . .	95
3.5.4.4	La simulation 3 . . . . .	97
3.5.5	Discussion . . . . .	99
3.6	Conclusion . . . . .	100
<b>4</b>	<b>UNE NOUVELLE APPROCHE DE LA SELECTION RESEAU AVEC DIFFERENCIATION DE POIDS</b>	<b>102</b>
4.1	Introduction . . . . .	102
4.2	Limitations des algorithmes de pondération existants dans le contexte de la sélection du réseau . . . . .	103
4.3	Une nouvelle approche pour la validation de la sélection du réseau basée sur le groupe MADM . . . . .	105
4.3.1	La théorie de la prise de décision collective . . . . .	105
4.3.2	L'approche proposée basée sur la prise de décision en groupe . . . . .	107
4.3.2.1	Formulation du problème basé sur le groupe de la décision MADM . . . . .	108
4.3.2.2	Notre algorithme de validation proposé basé sur le groupe MADM . . . . .	108
4.3.3	Simulations et résultats . . . . .	109
4.3.3.1	Scénario de simulation . . . . .	109
4.3.3.2	La simulation 1 . . . . .	110
4.3.3.3	La simulation 2 . . . . .	112
4.3.3.4	La simulation 3 . . . . .	114
4.3.3.5	La simulation 4 . . . . .	116
4.3.4	Discussion . . . . .	119
4.4	Vers une technique efficace pour la sélection du réseau basée sur la différenciation de poids . . . . .	119
4.4.1	L'amélioration du module de pondération de la stratégie FADM avec la différenciation de poids . . . . .	119
4.4.2	Le principe de fonctionnement de l'unité de la différenciation de poids . . . . .	121
4.4.3	L'algorithme de sélection du réseau basé sur notre schéma (FADM) avec la différenciation de poids . . . . .	121
4.4.4	Simulations et résultats . . . . .	122

4.4.4.1	Scénario de simulation . . . . .	122
4.4.4.2	La simulation 1 . . . . .	122
4.4.4.3	La simulation 2 . . . . .	125
4.4.4.4	La simulation 3 . . . . .	127
4.4.4.5	La simulation 4 . . . . .	129
4.4.5	Discussion . . . . .	132
4.5	Conclusion . . . . .	133
<b>5</b>	<b>VALIDATION ET OPTIMISATION DE L'ARCHITECTURE FADM</b>	<b>134</b>
5.1	Introduction . . . . .	134
5.2	Intérêts et limitations des modèles d'évaluation du handover existants . . . . .	135
5.3	Le schéma du modèle d'évaluation choisi . . . . .	137
5.4	Notre proposition : Le processus du modèle d'évaluation évolutif . . . . .	138
5.5	Validation de l'architecture FADM à travers le modèle d'évaluation évolutif . . . . .	140
5.5.1	Résultats numériques . . . . .	140
5.5.1.1	Scénario de simulation . . . . .	140
5.5.1.2	La simulation 1 . . . . .	140
5.5.1.3	La simulation 2 . . . . .	142
5.5.1.4	La simulation 3 . . . . .	144
5.5.1.5	La simulation 4 . . . . .	146
5.5.2	Discussion . . . . .	147
5.6	Optimisation de l'architecture FADM à travers le modèle d'évaluation évolutif . . . . .	148
5.6.1	Résultats numériques . . . . .	148
5.6.1.1	Scénario de simulation . . . . .	148
5.6.1.2	La simulation 1 . . . . .	150
5.6.1.3	La simulation 2 . . . . .	151
5.6.1.4	La simulation 3 . . . . .	152
5.6.1.5	La simulation 4 . . . . .	154
5.6.2	Discussion . . . . .	155
5.7	Conclusion . . . . .	156
	<b>Conclusion générale</b>	<b>157</b>
	<b>Bibliographie.</b>	<b>162</b>

---

## TABLE DES FIGURES

1.1	Catégories de réseaux sans fil [113] . . . . .	8
1.2	Architecture du protocole Mobile IPv6 [161] . . . . .	17
1.3	Les deux types du handover horizontal et vertical dans les réseaux 4G [66] . . .	19
1.4	Classification de handover vertical [124] . . . . .	21
1.5	Nouvelle classification des algorithmes de handover [86] . . . . .	25
1.6	L'architecture de la norme IEEE 802.21 . . . . .	26
2.1	Modèle de la sélection de réseau basé sur l'approche MADM . . . . .	41
2.2	Structure hiérarchique de la méthode AHP [94] . . . . .	43
2.3	Structure réseau de la méthode ANP [94] . . . . .	48
2.4	Architecture fonctionnelle pour Moteur VHO [31] . . . . .	52
2.5	Le modèle de la sélection réseau basé sur GRA et AHP [135] . . . . .	56
2.6	Le schéma de TDVHD [144] . . . . .	58
3.1	Décision du handover basée sur l'approche itérative de méthode TOPSIS [10] .	67
3.2	Problème de la méthode TOPSIS . . . . .	69
3.3	Hiérarchie de la méthode AHP pour la sélection du réseau . . . . .	70
3.4	Scénario de simulation . . . . .	74
3.5	Taux moyen de l'anomalie de classement basé sur E-TOPSIS pour arrière-plan	74
3.6	Taux moyen du nombre de handoffs basé sur E-TOPSIS pour arrière-plan . . .	75
3.7	Variation de l'anomalie de classement basé sur E-TOPSIS pour conversationnel	75
3.8	Taux moyen du nombre de handoffs basé sur E-TOPSIS pour conversationnel .	76
3.9	Taux moyen de l'anomalie de classement basé sur E-TOPSIS pour interactif . .	76
3.10	Taux moyen du nombre de handoffs basé sur E-TOPSIS pour interactif . . . .	77
3.11	Taux moyen de l'anomalie de classement basé sur E-TOPSIS pour streaming .	77
3.12	Taux moyen du nombre de handoffs basé sur E-TOPSIS pour streaming . . . .	78
3.13	Hiérarchie de la méthode AHP floue pour la sélection du réseau . . . . .	79
3.14	Taux moyen de l'anomalie de classement basé sur H-TOPSIS pour arrière-plan	83
3.15	Taux moyen du nombre de handoffs basé sur H-TOPSIS pour arrière-plan . . .	83
3.16	Taux de l'anomalie de classement basé sur H-TOPSIS pour le conversationnel .	84
3.17	Nombre de handoffs basé sur H-TOPSIS pour le flux conversationnel . . . . .	84
3.18	Taux moyen de l'anomalie de classement basé sur H-TOPSIS pour interactif .	85
3.19	Taux moyen du nombre de handoffs basé sur H-TOPSIS pour le flux interactif	85
3.20	Taux moyen de l'anomalie de classement basé sur H-TOPSIS pour streaming .	86

3.21	Taux moyen du nombre de handoffs basé sur H-TOPSIS pour streaming . . . . .	86
3.22	Schéma du principe du modèle proposé pour la sélection de réseau . . . . .	88
3.23	Hierarchie de la méthode AHP floue basée sur la classification de critères . . . . .	92
3.24	Degré d'importance en utilisant la méthode classique AHP . . . . .	93
3.25	Variation de l'anomalie de classement des algorithmes basés sur AHP . . . . .	94
3.26	Variation de nombre de handoffs des algorithmes basés sur AHP . . . . .	95
3.27	Degré d'importance en utilisant le module de pondération basé sur AHP . . . . .	96
3.28	Anomalie de classement des algorithmes basés sur le module de pondération . . . . .	96
3.29	Nombre de handoffs des algorithmes basés sur le module de pondération . . . . .	97
3.30	Degré d'importance en utilisant le module de pondération basé sur AHP floue . . . . .	98
3.31	Anomalie de classement obtenus en utilisant le module de pondération floue . . . . .	98
3.32	Nombre de handoffs obtenus en utilisant le module de pondération floue . . . . .	99
4.1	Amélioration de l'architecture FADM en utilisant la différenciation de poids . . . . .	120
4.2	Pondération des critères basée sur FADM-1 et FADM-2 pour arrière-plan . . . . .	122
4.3	Différenciation de poids basée sur FADM-3 pour le flux arrière-plan . . . . .	123
4.4	Différenciation de poids basée sur FADM-4 pour le flux arrière-plan . . . . .	123
4.5	Variation de l'anomalie en fonction des algorithmes pour arrière-plan . . . . .	123
4.6	Variation du nombre de handoffs en fonction des algorithmes pour arrière-plan . . . . .	124
4.7	Variation de handovers échoués en fonction des algorithmes pour arrière-plan . . . . .	124
4.8	Pondération des critères basés sur FADM-1 et FADM-2 pour conversationnel . . . . .	125
4.9	Différenciation de poids basée sur FADM-3 pour le flux conversationnel . . . . .	125
4.10	Différenciation de poids basée sur FADM-4 pour le flux conversationnel . . . . .	125
4.11	Variation de l'anomalie en fonction des algorithmes pour conversationnel . . . . .	126
4.12	Taux de nombre de handoffs en fonction des algorithmes pour conversationnel . . . . .	126
4.13	Taux de handovers échoués en fonction des algorithmes pour conversationnel . . . . .	127
4.14	Pondération des critères basés sur FADM-1 et FADM-2 pour interactif . . . . .	127
4.15	Différenciation de poids basée sur FADM-3 pour le flux interactif . . . . .	128
4.16	Différenciation de poids basée sur FADM-4 pour le flux interactif . . . . .	128
4.17	Variation de l'anomalie en fonction des algorithmes pour interactif . . . . .	128
4.18	Variation du nombre de handoffs en fonction des algorithmes pour interactif . . . . .	129
4.19	Variation de handovers échoués en fonction des algorithmes pour interactif . . . . .	129
4.20	Pondération des critères basés sur FADM-1 et FADM-2 pour streaming . . . . .	130
4.21	Différenciation de poids basée sur FADM-3 pour le flux streaming . . . . .	130
4.22	Différenciation de poids basée sur FADM-4 pour le flux streaming . . . . .	130
4.23	Variation de l'anomalie en fonction des algorithmes pour streaming . . . . .	130
4.24	Variation du nombre de handoffs en fonction des algorithmes pour streaming . . . . .	131
4.25	Variation de handovers échoués en fonction des algorithmes pour streaming . . . . .	131
5.1	Le schéma du modèle d'évaluation pour les algorithmes du handover [35] . . . . .	137
5.2	Démarche proposée pour éliminer la redondance de critères . . . . .	149

---

## LISTE DES TABLEAUX

1.1	Classification des classes de QoS offertes par la technologie WIMAX . . . . .	10
1.2	Classification des classes de QoS offertes par la technologie UMTS . . . . .	11
1.3	Tableau récapitulatif relatif aux différentes technologies réseaux . . . . .	12
1.4	Les évènements MIH . . . . .	27
1.5	Comparaison entre les différentes approches du handover vertical [67] . . . . .	33
1.6	Comparaison entre quatre groupes des algorithmes du handover [163] . . . . .	33
1.7	Principaux algorithmes du handover vertical [163] [155] . . . . .	36
2.1	Comparaison entre les deux approches MODM et MADM . . . . .	38
2.2	Echelle à 9 valeurs de Saaty . . . . .	44
2.3	Valeur de l'indice aléatoire IA . . . . .	45
2.4	Les neuf nombres flous triangulaires (TFN) en utilisant la méthode AHP floue . . . . .	46
2.5	La décision de sélection du réseau basée sur TOPSIS : itération 1 . . . . .	53
2.6	La décision de sélection du réseau basée sur TOPSIS : itération 2 . . . . .	53
2.7	Tableau d'évaluation relatif au problème de sélection réseau . . . . .	59
2.8	Matrice d'évaluation des réseaux basée sur la méthode SAW . . . . .	59
2.9	Matrice d'évaluation des réseaux basée sur la méthode MEW . . . . .	60
2.10	Étude comparative de différents algorithmes basés sur MADM [138] . . . . .	63
2.11	Bilan sur les différents algorithmes du handover basés sur l'approche MADM . . . . .	64
3.1	Techniques de normalisation pour la sélection du réseau basée sur GRA . . . . .	68
3.2	Poids accordé à chaque critère pour le flux arrière-plan . . . . .	71
3.3	Degré d'importance de $\lambda_1$ et $\lambda_2$ pour le flux arrière-plan . . . . .	71
3.4	Poids accordé à chaque critère pour le flux conversationnel . . . . .	71
3.5	Degré d'importance de $\lambda_1$ et $\lambda_2$ pour le flux conversationnel . . . . .	72
3.6	Poids accordé à chaque critère pour le flux interactif . . . . .	72
3.7	Degré d'importance de $\lambda_1$ et $\lambda_2$ pour le flux interactif . . . . .	72
3.8	Poids accordé à chaque critère pour le flux streaming . . . . .	72
3.9	Degré d'importance de $\lambda_1$ et $\lambda_2$ pour le flux streaming . . . . .	73
3.10	Performances des attributs pour les réseaux candidats . . . . .	73
3.11	Poids basés sur AHP floue pour six critères en fonction de flux arrière-plan . . . . .	80
3.12	Poids basés sur AHP floue pour sept critères en fonction de flux arrière-plan . . . . .	80
3.13	Poids basés sur AHP floue pour six critères en fonction de flux conversationnel . . . . .	81
3.14	Poids basés sur AHP floue pour sept critères pour le flux conversationnel . . . . .	81

3.15	Poids basés sur AHP floue pour six critères en fonction de flux interactif . . .	81
3.16	Poids basés sur AHP floue pour sept critères en fonction de flux interactif . . .	81
3.17	Poids basés sur AHP floue pour six critères en fonction de flux streaming . . .	82
3.18	Poids basés sur AHP floue pour sept critères en fonction de flux streaming . .	82
3.19	Performances des attributs pour les réseaux candidats . . . . .	93
3.20	Pondération inter-classes en utilisant la méthode AHP . . . . .	95
3.21	Pondération intra-classes pour la classe 1 en utilisant la méthode AHP . . . .	95
3.22	Pondération inter-classes en utilisant la méthode AHP floue . . . . .	97
3.23	Pondération intra-classes pour la classe 1 en utilisant la méthode AHP floue .	98
4.1	La décision de sélection du réseau basée sur TOPSIS . . . . .	104
4.2	Les métriques de QoS relatives à chaque réseau candidat . . . . .	110
4.3	Les performances du coût et de sécurité relatives à chaque réseau candidat . .	110
4.4	Pondération de critères par les décideurs en fonction de flux arrière-plan . . . .	111
4.5	Comparaison de classement en utilisant G1 pour le flux arrière-plan . . . . .	111
4.6	Comparaison de classement en utilisant G2 pour le flux arrière-plan . . . . .	111
4.7	Comparaison de classement en utilisant G3 pour le flux arrière-plan . . . . .	112
4.8	Comparaison de classement en utilisant G4 pour le flux arrière-plan . . . . .	112
4.9	Degré de consistance relatif à chaque groupe MADM pour le flux arrière-plan .	112
4.10	Pondération de critères par les décideurs en fonction de flux conversationnel . .	113
4.11	Comparaison de classement en utilisant G1 pour le flux conversationnel . . . .	113
4.12	Comparaison de classement en utilisant G2 pour le flux conversationnel . . . .	113
4.13	Comparaison de classement en utilisant G3 pour le flux conversationnel . . . .	114
4.14	Comparaison de classement en utilisant G4 pour le flux conversationnel . . . .	114
4.15	Degré de consistance relatif à chaque groupe MADM pour le conversationnel .	114
4.16	Pondération de critères par les décideurs en fonction de flux interactif . . . . .	115
4.17	Comparaison de classement en utilisant G1 pour le flux interactif . . . . .	115
4.18	Comparaison de classement en utilisant G2 pour le flux interactif . . . . .	115
4.19	Comparaison de classement en utilisant G3 pour le flux interactif . . . . .	116
4.20	Comparaison de classement en utilisant G4 pour le flux interactif . . . . .	116
4.21	Degré de consistance relatif à chaque groupe MADM pour le flux interactif . .	116
4.22	Pondération de critères par les décideurs en fonction de flux streaming . . . .	117
4.23	Comparaison de classement en utilisant G1 pour le flux streaming . . . . .	117
4.24	Comparaison de classement en utilisant G2 pour le flux streaming . . . . .	117
4.25	Comparaison de classement en utilisant G3 pour le flux streaming . . . . .	118
4.26	Comparaison de classement en utilisant G4 pour le flux streaming . . . . .	118
4.27	Degré de consistance relatif à chaque groupe MADM pour le flux streaming . .	118
5.1	l'échelle d'évaluation de la matrice de criticité . . . . .	139
5.2	Mesures de performances de paramètres d'évaluation pour le flux arrière-plan .	141
5.3	Matrice de criticité correspondant au flux arrière-plan . . . . .	141
5.4	Poids accordé à chaque paramètre d'évaluation pour le flux arrière-plan . . . .	141
5.5	Indices de criticité de différents algorithmes pour le flux arrière-plan . . . . .	142
5.6	Mesures de performances de paramètres d'évaluation pour le conversationnel .	142
5.7	Matrice de criticité correspondant au flux conversationnel . . . . .	143
5.8	Poids accordé à chaque paramètre d'évaluation pour le flux conversationnel . .	143
5.9	Indices de criticité de différents algorithmes pour le flux conversationnel . . . .	144
5.10	Mesures de performances de paramètres d'évaluation pour le flux interactif . .	144
5.11	Matrice de criticité correspondant au flux interactif . . . . .	145

5.12	Poids accordé à chaque paramètre d'évaluation pour le flux interactif . . . . .	145
5.13	Indices de criticité de différents algorithmes pour le flux interactif . . . . .	145
5.14	Mesures de performances de paramètres d'évaluation pour le flux streaming . .	146
5.15	Matrice de criticité correspondant au flux streaming . . . . .	146
5.16	Poids accordé à chaque paramètre d'évaluation pour le flux streaming . . . . .	147
5.17	Indices de criticité de différents algorithmes pour le flux streaming . . . . .	147
5.18	Comparaison des performances des algorithmes MADM . . . . .	148
5.19	l'échelle d'évaluation de la matrice de criticité [92] . . . . .	149
5.20	Mesures de performances relatives aux variantes de FADM pour l'arrière-plan .	150
5.21	Matrice de criticité relative aux variantes de FADM pour le flux arrière-plan . .	150
5.22	Degré d'importance de chaque paramètre d'évaluation pour l'arrière-plan . . .	151
5.23	Indice de criticité relatif à chaque variante FADM pour le flux arrière-plan . . .	151
5.24	Mesures de performances de chaque variante FADM pour conversationnel . . .	151
5.25	Matrice de criticité relative aux variantes de FADM pour conversationnel . . .	152
5.26	Degré d'importance de chaque paramètre d'évaluation pour le conversationnel	152
5.27	Indice de criticité relatif à chaque variante FADM pour le flux conversationnel .	152
5.28	Mesures de performances relatives aux variantes de FADM pour l'interactif . .	153
5.29	Matrice de criticité relatives aux variantes de FADM pour le flux interactif . . .	153
5.30	Degré d'importance de chaque paramètre d'évaluation pour l'interactif . . . .	153
5.31	Indice de criticité relatif à chaque variante FADM en fonction de flux interactif	154
5.32	Mesures de performances relatives aux variantes de FADM pour le streaming .	154
5.33	Matrice de criticité relative aux variantes de FADM pour le flux streaming . . .	154
5.34	Degré d'importance de chaque paramètre d'évaluation pour le streaming . . .	155
5.35	Indice de criticité relatif à chaque variante FADM pour le flux streaming . . . .	155

---

# GLOSSAIRE

<b>2G</b>	Second Generation
<b>3G</b>	Third Generation
<b>3GPP</b>	Third Generation Partnership Project
<b>4G</b>	Fourth Generation
<b>ABC</b>	Always Best Connected
<b>ADSL</b>	Asymmetric Digital Subscriber Line
<b>AHP</b>	Analytic Hierarchy Process
<b>ANN</b>	Artificial Neural Network
<b>ANP</b>	Analytic Network Process
<b>AP</b>	Access Point
<b>BS</b>	Base Station
<b>BTS</b>	Base Station Transceiver System
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access
<b>CN</b>	Correspondent Node
<b>DAR</b>	Dynamic Address Reconfiguration
<b>DIA</b>	Distance to Ideal Alternative
<b>ELECTRE</b>	ELimination Et Choix Traduisant la REalité
<b>E-TOPSIS</b>	Enhanced Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
<b>FA</b>	Foreign Agent
<b>FADM</b>	Fuzzy AHP Distance Mahalanobis
<b>FAHP</b>	Fuzzy Analytic Hierarchy Process
<b>FANP</b>	Fuzzy Analytic Network Process
<b>FIS</b>	Fuzzy Inference System
<b>FL</b>	Fuzzy Logic
<b>FMADM</b>	Fuzzy Multiple Attributes Decision Making
<b>GA</b>	Genetic Algorithm
<b>GPRS</b>	General Packet Radio Service
<b>GRA</b>	Grey Relational Analysis
<b>GSM</b>	Global System for Mobile
<b>HA</b>	Home Agent
<b>HI</b>	Handoff Initiation
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>IETF</b>	Internet Engineering Task Force
<b>IP</b>	Internet protocol

---

<b>LTE</b>	Long Term Evolution
<b>MADM</b>	Multiple Attributes Decision Making
<b>MAHO</b>	Mobile Assisted Handoff
<b>MCDM</b>	Multiple Criteria Decision Making
<b>MCHO</b>	Mobile-Controlled Handoff
<b>MEW</b>	Multiplicative Exponent Weighting
<b>MIP</b>	Mobile IP
<b>MIMO</b>	Multiple-Input Multiple-Output
<b>MODM</b>	Multiple Objective Decision Making
<b>MT</b>	Mobile Terminal
<b>mSCTP</b>	Mobile Stream Control Transmission Protocol
<b>NAHO</b>	Network Assisted Handoff
<b>NGWN</b>	Next Generation Wireless Network
<b>NCHO</b>	Network-Controlled Handoff
<b>ODTONE</b>	Open Dot Twenty One
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
<b>OFDMA</b>	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
<b>OSI</b>	Open Systems Interconnection
<b>PDA</b>	Personal Digital Assistant
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>QoE</b>	Quality of Experience
<b>RSS</b>	Received Signal Strength
<b>RTOPSIS</b>	Reversal Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
<b>SAW</b>	Simple Additive Weighting
<b>SCTP</b>	Stream Control Transmission Protocol
<b>SIP</b>	Session Initiation Protocol
<b>SMART</b>	Simple Multi Attribute Rating Technique
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>TCP</b>	Transmission Control Protocol
<b>TOPSIS</b>	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunications System
<b>VHDA</b>	Vertical Handoff Decision Algorithm
<b>VoIP</b>	Voice over IP
<b>W-CDMA</b>	Wideband Code Division Multiple Access
<b>WIFI</b>	Wireless Fidelity
<b>WIMAX</b>	Worldwide Interoperability for Microwave Access
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network
<b>WMAN</b>	Wireless Metropolitan Area Network
<b>WPAN</b>	Wireless Personal Area Network
<b>WWAN</b>	Wireless Wide Area Network

---



---

# RÉSUMÉ

Les réseaux de la future génération représentent un environnement hétérogène sans fil, dans lequel de nombreuses technologies d'accès peuvent cohabiter. Au sein de cet environnement, les utilisateurs ont le privilège de rester connectés à l'Internet à travers des terminaux multi-interfaces. De plus, ils ont la possibilité de se doter de différents services, peu importe le lieu et le temps. Afin de gérer la mobilité du terminal tout en assurant une meilleure continuité de service, la mise en oeuvre d'une architecture pour la gestion du handover vertical est devenue indispensable. Cette thèse se focalise sur le handover vertical, plus précisément sur la phase de la sélection du réseau dans un environnement de réseaux hétérogènes sans fil. Dans ce contexte, notre première contribution propose une nouvelle architecture pour la sélection du réseau reposant sur les méthodes d'aide à la décision multi-attributs (MADM). Cette solution, simple à intégrer dans la norme IEEE 802.21, comporte deux modules : le premier pour pondérer les critères et le deuxième pour classer les réseaux. Ensuite, nous nous intéressons à la résolution de différents problèmes relatifs à la pondération des critères afin d'améliorer davantage notre architecture. Pour ce faire, nous avons développé dans un premier temps, une nouvelle approche de la validation des algorithmes du handover en utilisant la théorie de la prise de décision collective. Cette nouvelle approche nous a permis d'identifier l'algorithme de pondération qu'il faut intégrer dans notre architecture. Dans un deuxième temps, nous avons intégré une nouvelle unité de différenciation de poids au niveau du module de pondération de notre architecture. Le rôle de cette unité est de calculer le degré d'importance relatif à chaque critère en fonction de l'interface réseau. Finalement, nous proposons un nouveau modèle d'évaluation de performances qui repose sur l'approche MADM et l'analyse de criticité. L'efficacité de ce modèle se manifeste dans sa capacité de valider notre architecture en termes de performances par rapport aux autres algorithmes existants. De plus, son second avantage est le fait de pallier le problème du choix de critères qu'il faut utiliser dans le contexte de la sélection du réseau.

**Mots clés :** Réseaux sans fil hétérogènes, Handover vertical, IEEE 802.21, Méthodes d'aide à la décision multi-attributs, Analyse de criticité.

---

## ABSTRACT

The next generation of networks represents a heterogeneous wireless environment, characterized by the coexistence of multiple technologies. In this environment, the users have the privilege to stay connected to the Internet by using mobile terminals equipped with multiple interfaces. Additionally, the users have the ability to use different services at any time and any where. In this context, the most important aim is to manage the terminal mobility while ensuring the best continuity of services. In order to achieve this task, the design and the development of architecture for the vertical handover management becomes an indispensable. This is focusing on vertical handover management and mainly on network selection decision step within heterogeneous wireless networks. In this context, our first contribution proposes a new architecture for network selection, based on multi attribute decision making (MADM). This solution is based on the IEEE 802.21 standard, contains two modules : the first one is used to weigh the criteria. While the second is applied to rank the networks. Then, we consider the problem of optimizing the weighting algorithms of our architecture. Specifically, we first develop a new validation approach which can take into account different weighting methods. Our approach is based on group MADM and it allows to determine a suitable weighting algorithm which can be used for the network selection. We then improve our architecture by introducing component based on differentiated weight which can be integrated into weighting module of our architecture. This component allows to find the differentiated weights of available networks by considering each criterion. Finally, due to the variety of vertical handoff algorithms, we provide a new evaluation model to reach an optimal network selection algorithm and to validate our architecture. This new model is based on multi attribute decision making and criticality analysis.

**Key words** : Heterogeneous wireless networks, vertical handover, IEEE 802.21, Multi Attribute Decision Making, Criticality Analysis.

---

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

## Contexte

Le secteur des télécommunications a connu une croissance exceptionnelle qui se manifeste par le passage du nombre d'abonnés de 23 millions en 1992 à plus de 5 milliards en 2012<sup>1</sup>. Cette forte augmentation est influencée par l'évolution des nouvelles technologies d'accès qui permettent d'assurer de nouveaux services qui ne sont pas disponibles dans la technologie GSM. Cette évolution technologique est dictée par les besoins et les exigences des utilisateurs qui veulent profiter des différentes applications multimédias qui ont vu le jour ces dernières années.

Entre les années 2000 et 2010, le secteur des télécommunications a connu des évolutions profondes avec le développement des nouvelles technologies telles que la troisième génération (3G) et la quatrième génération (4G). Le déploiement des nouvelles technologies d'accès 3G (WIFI, UMTS) et 4G (WIMAX, LTE) apportent une solution prometteuse en remplaçant l'infrastructure filaire avec une autre dite sans fil. Par conséquent, les utilisateurs ont bénéficié d'un changement dans la vie quotidienne concernant l'utilisation de l'Internet. Ils peuvent se connecter à l'Internet n'importe où et n'importe quand. Actuellement, nous ne parlons plus de l'Internet fixe où l'utilisateur est obligé d'avoir une ligne ADSL et de rester dans le même endroit pour profiter de tous les services Internet, mais la révolution a été faite par la naissance de l'Internet mobile. En fait, l'Internet mobile n'est que le fruit du déploiement des réseaux sans fil.

En parallèle, les terminaux mobiles ont connu une véritable explosion à travers le développement d'une architecture multi-interfaces. Cette diversité des interfaces permettent à l'utilisateur non seulement d'être connecté à l'Internet en utilisant la meilleure technologie réseau disponible, mais aussi, la possibilité de se connecter simultanément aux plusieurs technologies réseaux. D'un côté, l'évolution de l'Internet mobile ainsi que la miniaturisation de ces terminaux multi-interfaces offrent plusieurs possibilités aux utilisateurs :

- Accès à l'information n'importe où et n'importe quand ;
- Choix d'un ou de plusieurs opérateurs d'accès ;
- Choix du type de forfait ;
- Choix du type de service ;
- Possibilité de choisir un réseau où l'accès à l'Internet est gratuit.

---

<sup>1</sup><http://royal.pingdom.com/2013/01/16/internet-2012-in-numbers/>

D'un autre côté, la forte demande à l'Internet mobile a un impact considérable sur l'économie des pays. En effet, d'après une étude récemment publiée sur l'économie numérique<sup>2</sup>, l'Internet génère 8 000 milliards de dollars chaque année et représente 21% de la croissance des pays développés sur ces 5 dernières années. Un autre signe que l'Internet mobile est un acteur décisif dans l'économie mondiale, c'est que non seulement il a résisté à la crise, mais il évolue davantage d'une manière accélérée selon deux axes : matériels et logiciels.

## Motivations

Aujourd'hui, nous avons le privilège d'avoir plusieurs technologies réseaux telles que ADSL, UMTS, IEEE 802.11, IEEE 802.16 et LTE, qui constituent un environnement hétérogène. De plus, nous avons l'opportunité de se doter de différents services (annuaires, jeux, localisation, etc) offerts par ces différentes technologies en utilisant des terminaux multi-interfaces. Finalement, cet environnement hétérogène, nous offre une complémentarité entre ces différentes technologies en termes des ressources telles que la couverture, la bande passante, et le coût. A cet égard, nous sommes devant trois problèmes :

- Interconnexion et interopérabilité de ces différentes technologies ;
- Gestion de mobilité de l'utilisateur lorsqu'il se déplace physiquement d'un réseau à un autre différent ("handover vertical") ;
- Meilleure continuité de service sous le paradigme "Always Best Connected (ABC)" qui consiste à déterminer le meilleur réseau, à tous moment et n'importe où.

La norme IEEE 802.21, proposée en 2004 et standardisée en 2009 par le groupe IETF, est une solution incontournable pour surmonter ces trois problèmes. En effet, cette norme a été conçue pour supporter l'interconnexion des différentes technologies d'accès : celles qui sont développées par IEEE ou par 3GPP. De plus, ce nouveau protocole permet d'assurer le handover vertical. Nous signalons que ce protocole est le seul standard proposé jusqu'à maintenant pour répondre aux problèmes de l'interconnexion et de la mobilité.

En revanche, à travers l'implémentation de cette nouvelle norme, l'environnement hétérogène est considéré comme une plate-forme tout IP. Cette plate-forme permet de fournir de nombreux avantages tels que la sélection du réseau, l'accès permanent et ubiquitaire, la variété de services à haut débit offerts à l'utilisateur, le partage de charge, etc. Cependant, vu que cette plate-forme intègre une diversité de technologies réseaux différentes, le choix du réseau optimal, qui peut satisfaire les exigences de l'utilisateur en termes de qualité de service, est un défi majeur à relever.

Afin de pallier à ce problème, la norme IEEE 802.21 a défini trois phases essentielles qui interviennent dans le processus de gestion de la mobilité verticale. Il s'agit de la phase de la découverte dans laquelle le terminal mobile détecte les points d'accès auxquels il peut être attaché. La deuxième phase concerne la sélection du réseau, elle consiste à utiliser les différents paramètres collectés dans la première phase afin de déterminer la meilleure interface réseau. L'exécution du handover intervient comme troisième phase qui permet au terminal mobile d'établir la liaison physique avec le nouveau réseau en utilisant le protocole mobile IP.

Cependant, les trois phases définies par la norme IEEE 802.21 représentent uniquement la démarche qu'il faut suivre dans le but de proposer une solution pour le choix du réseau optimal. Nous signalons dans ce cadre que la norme IEEE 802.21 ne spécifie ni les paramètres qu'il faut collecter dans la première phase ni l'algorithme de la décision qu'il faut implémenter dans la deuxième phase. Finalement, il y a absence de spécification du protocole de mobilité

<sup>2</sup><http://www.mckinsey.com>

qu'il faut utiliser dans la troisième phase. Par conséquent, la mobilité verticale représente un axe de recherche ouvert.

Toutefois, la sélection du réseau est un facteur déterminant et décisif dans le processus de la gestion de la mobilité verticale. C'est pourquoi, nous avons choisi de nous intéresser à soulever tous les problèmes liés à cette phase. De plus, ce choix a été motivé par la nécessité et le besoin d'assurer une meilleure connectivité à l'Internet soit pour l'utilisateur mobile soit pour l'utilisateur nomade.

## Objectifs et contributions

La conception et le développement d'une nouvelle solution intelligente et automatique permettant de surmonter le problème de la sélection du réseau devient indispensable. En outre, ce problème est considéré comme un problème NP-complet [40]. L'approche traditionnelle où la sélection du réseau repose sur l'évaluation de la puissance du signal ne suffit pas car elle ne prend pas en compte les différents paramètres de chaque technologie réseau. Dans ce cadre, plusieurs algorithmes ont été proposés dans la littérature pour résoudre ce problème. Nous citons : la logique floue [50], les algorithmes génétiques [51], les fonctions de coût/d'utilité [109], la théorie des jeux [151], les réseaux de neurones artificiels [105] et les méthodes d'aide à la décision multi-attributs (MADM) [138], etc.

En raison de la nature du problème de la sélection du réseau, nos travaux de recherche pour aborder ce sujet s'appuient sur les méthodes MADM. L'objectif de nos contributions est de garantir à l'utilisateur mobile une meilleure connectivité dans un environnement réseaux hétérogènes. Cette connectivité optimale se traduit par les aspects suivants :

- Assurer le transfert d'une communication sans interruption et avec une meilleure continuité de la QoS lors du déplacement de l'utilisateur d'un réseau à un autre ;
- Gérer les interfaces multiples du terminal mobile d'une manière efficace afin de maximiser l'autonomie de la batterie ;
- Répondre aux exigences de l'utilisateur en termes de : coût de service, bande passante, sécurité, etc.

Les contributions de cette thèse sont organisées autour de trois grands axes. Le premier axe consiste à développer une nouvelle architecture pour la sélection de réseau, capable de pallier aux inconvénients des approches MADM. Pour ce faire, nous avons proposé trois contributions [81], [75] et [88]. Les deux solutions [81] et [75] ont pour objectif d'améliorer les limitations de la méthode TOPSIS qui est largement utilisée pour la sélection du réseau.

En effet, dans la première solution, nous avons proposé une extension de la méthode TOPSIS appelée E-TOPSIS [81]. Cette nouvelle technique est basée sur l'idée d'introduire deux poids  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  qui désignent respectivement le degré d'importance relatif à la solution idéale et la solution pire. La deuxième solution que nous avons fournie est appelée H-TOPSIS [75]. Il s'agit d'un algorithme hybride qui combine la méthode AHP floue et l'approche TOPSIS. L'algorithme H-TOPSIS a introduit un nouveau critère appelé historique de performance. Ce dernier permet de mémoriser la performance de chaque réseau accessible pour le terminal mobile.

A l'issue de ces deux solutions, nous avons proposé une nouvelle architecture appelée FADM, comme une troisième contribution [88]. Cette architecture contient deux modules qui reposent sur l'approche MADM. Le premier composant est un nouveau système de pondération capable de surmonter les inconvénients des méthodes classiques de pondération. Le deuxième composant est une nouvelle méthode multi-attributs qui repose sur la distance de Mahalanobis. L'architecture proposée permet au terminal mobile de sélectionner, dynamiquement et en temps réel, la meilleure interface réseau qui doit être utilisée par l'utilisateur. De plus, l'avantage de

cette architecture réside dans sa faisabilité et sa simplicité d'être intégrée dans la norme IEEE 802.21. En effet, après avoir collecté les performances de chaque paramètre de la QoS par le protocole IEEE 802.21, dans un premier temps, le module de pondération est utilisé pour attribuer un poids pour chaque paramètre. Dans un deuxième temps, le module de décision est capable d'accomplir la fonction de sélection de la meilleure alternative réseau par un simple calcul de score de toutes les alternatives réseaux accessibles au terminal mobile. Finalement, nous avons montré à travers les résultats des simulations que notre architecture permet de fournir de meilleures performances par rapport aux algorithmes MADM classiques.

Ensuite, le deuxième axe de cette thèse consiste à apporter des solutions pour les problèmes relatifs aux algorithmes de pondération et particulièrement identifier la méthode de pondération adéquate en fonction du type de flux pour l'architecture FADM. En effet, vu la diversité des algorithmes de pondération existants ainsi que leurs inconvénients, le choix de l'algorithme de pondération approprié dans le contexte du handover vertical est un axe de recherche pertinent. Dans ce cadre, nous avons proposé deux contributions [87] et [80] afin d'optimiser davantage le module de la pondération de notre architecture FADM.

Dans la quatrième contribution [87] de cette thèse, nous avons développé une nouvelle approche de validation des algorithmes du handover en utilisant la théorie de la prise de décision collective. Cette nouvelle approche nous a permis de déterminer l'algorithme de pondération à intégrer dans notre architecture FADM. Dans la cinquième contribution [80] de ce travail, nous avons intégré une nouvelle unité de différenciation de poids au niveau du module de pondération de notre architecture FADM. Le rôle de cette unité est de calculer le degré d'importance relatif à chaque critère en fonction de l'interface réseau. Les simulations que nous avons effectuées ont prouvé l'utilité de développer cette nouvelle unité de différenciation de poids.

Enfin, le dernier axe de cette thèse s'articule autour de la problématique de l'évaluation des performances des algorithmes de la sélection du réseau. En effet, ce problème apparaît lors d'évaluation et de comparaison de notre architecture FADM avec d'autres solutions afin de la valider. Pour résoudre ce problème, plusieurs modèles d'évaluation ont été proposés et développés afin d'évaluer et de comparer les performances des algorithmes de la sélection du réseau. Cependant, le choix du modèle d'évaluation qu'il faut utiliser et les paramètres d'évaluation qu'il faut tenir en compte est un sujet de recherche pertinent. Dans ce contexte, nous avons proposé deux contributions [74] et [78].

Dans la dernière contribution [74] de cette thèse, nous avons analysé dans un premier temps, les différents modèles d'évaluation existants. Ensuite, à l'issue de cette analyse nous avons développé notre modèle d'évaluation évolutif qui repose sur l'approche MADM et l'analyse de criticité. Finalement, nous avons appliqué ce modèle pour valider l'architecture FADM. Notre dernière contribution [78] a été consacré au problème la redondance des critères. Pour ce faire, nous avons utilisé notre modèle d'évaluation évolutif pour évaluer la performance de notre algorithme FADM en fonction des critères de sélection afin d'éliminer le problème de la redondance des critères.

## Organisation du manuscrit

Le manuscrit est organisé en cinq chapitres. Le premier chapitre présente les différents concepts relatifs à la gestion de la mobilité verticale. Ensuite, nous allons fournir une description de la norme IEEE 802.21. Finalement, nous établirons un état de l'art des différentes solutions proposées dans la littérature dans le contexte de la mobilité verticale et nous justifions notre choix d'utiliser l'approche MADM pour optimiser la sélection du réseau.

Le deuxième chapitre est consacré essentiellement à la deuxième phase de la mobilité verticale qui est la sélection du réseau. Dans un temps, nous décrivons les différentes méthodes de l'approche MADM proposées dans le contexte de la sélection du réseau. Ensuite, nous exposons les différents modèles d'évaluation de performance existants. Enfin, nous menons une étude comparative entre les différentes solutions de l'approche MADM afin de dégager les principaux axes de nos contributions.

Au troisième chapitre, nous présentons nos deux premières solutions [81] et [75] afin de surmonter les limitations de l'approche MADM. Ces deux solutions représentent deux extensions pour améliorer la méthode TOPSIS. La première amélioration est appelée E-TOPSIS [81], tandis que la deuxième extension est appelée H-TOPSIS [75]. La dernière partie de ce chapitre est consacrée à la présentation détaillée de l'architecture FADM [88].

Le quatrième chapitre comporte deux contributions [87] et [80] dans le but d'optimiser davantage le module de pondération de l'architecture FADM. La première contribution [87] de ce chapitre est une nouvelle approche de validation pour le handover vertical qui repose sur la théorie de la prise de décision collective. L'objectif de cette contribution est de déterminer la méthode de pondération la plus appropriée qui doit être introduite dans le module de pondération de notre architecture FADM. La deuxième contribution [80] de ce chapitre porte sur le développement d'une nouvelle unité de différenciation de poids au niveau du module de pondération de l'architecture FADM.

Le cinquième chapitre propose un nouveau modèle d'évaluation évolutif [74] afin de comparer les performances des algorithmes de la sélection du réseau. Le premier cas d'utilisation de ce modèle permet notamment de valider notre architecture FADM. Le second cas d'utilisation de ce modèle permet de surmonter le problème de la redondances des critères [78].

En conclusion générale de ce mémoire, nous rappellerons les principales contributions réalisées au cours de cette thèse. Puis, nous présenterons les différentes perspectives du domaine, susceptibles d'être explorées dans le futur.

---

---

# CHAPITRE 1

---

## ETAT DE L'ART

### 1.1 Introduction

Les systèmes de communications mobiles ont bouleversé les modes et les usages de communication dans nos sociétés. Avec le développement très rapide des applications multi-médias et le besoin de transmettre des flux de voix, de vidéo, d'images fixes ou autres types d'information, en plus des données, il est devenu nécessaire de développer des systèmes de communication qui permettent aux utilisateurs de communiquer entre eux n'importe où et n'importe quand sans faire recours aux infrastructures des réseaux filaires traditionnels.

Les réseaux sans fil (Wireless Networks) représentent une solution émergente permettant à leurs utilisateurs un accès à l'information et aux services indépendamment de leurs positions géographiques. Le succès de ce type de réseaux, ces dernières années, a suscité un grand intérêt de la part des particuliers, des entreprises et du milieu industriel. Bien qu'il existe plusieurs technologies d'accès offertes à l'utilisateur telles que IEEE 802.11, IEEE 802.16, UMTS, LTE, etc, aucune d'elle ne semble pouvoir s'imposer comme une technologie universelle, du fait que ces dernières ont des caractéristiques hétérogènes.

Cette évolution incessante des technologies d'accès et leur complémentarité en termes des ressources fournies, telles que la couverture, le débit et le coût, amènent les opérateurs à proposer des solutions d'interconnexion entre les différents réseaux et de développer des terminaux mobiles équipés de plusieurs interfaces radio, tels que les smartphones ou iPad. Cette interconnexion favorise la mobilité à l'utilisateur entre ces différentes technologies. En fait, à travers son terminal mobile multi-interfaces, l'utilisateur peut profiter simultanément de tous les réseaux disponibles.

Cependant, l'hétérogénéité des technologies d'accès implique quatre problèmes majeurs auxquels nous nous intéresserons dans cette thèse :

- Comment assurer le transfert d'une communication d'un réseau (réseau mère) à un autre réseau (réseau cible) sans coupure et avec une meilleure continuité de la qualité de service ?
- Quand l'utilisateur (terminal mobile) doit changer son réseau mère pour s'attacher à un autre réseau cible ?
- Comment se fait la décision pour choisir le meilleur réseau disponible en terme de qualité de service ?
- Quelle est l'unité responsable de la prise de décision (réseau, utilisateur, etc.) ?

### 1.1.2 Les normes des technologies de communication

Chacune de ces questions fondamentales représente un domaine prometteur de recherche qui intéresse l'industrie et le monde universitaire [38] [101] et [14].

Le reste de ce premier chapitre sera organisé comme suit : dans la section suivante, nous allons décrire les normes de communication radio mobiles les plus répandues comme : WIFI, WiMAX, LTE, etc. Dans la deuxième section, nous allons traiter des contraintes et des exigences dans les réseaux hétérogènes. La troisième section sera consacrée à la gestion de la mobilité dans les réseaux hétérogènes. Dans ce contexte, nous présenterons quelques protocoles de mobilité suivant leurs niveaux par rapport au modèle OSI. Dans la quatrième section, nous présenterons la gestion du handover dans les réseaux hétérogènes. D'abord, nous traitons les différents concepts relatifs à la gestion de handover, puis nous présenterons une classification de celui-ci. Ensuite, nous présenterons les différents paramètres qui interviennent dans la gestion du handover et aussi nous donnerons une classification des algorithmes existants dédiés au handover. Enfin, nous terminerons cette section par la présentation du protocole IEEE 802.21. Dans la cinquième section, nous présenterons l'état de l'art sur les principaux algorithmes qui sont développés pour optimiser le handover vertical. A l'issue de cet état de l'art, nous allons fournir une comparaison et une synthèse des différents algorithmes du handover. Dans la dernière section, nous concluons ce chapitre.

## 1.2 Les normes des technologies de communication

Les technologies sans fil peuvent être classées en trois classes, caractérisées par la taille de leur zone de couverture ainsi que le débit offert par le réseau. La première classe concerne les réseaux personnels sans fil (WPANs) caractérisés par une faible portée, de l'ordre de quelques dizaines de mètres, et un débit faible. Le groupe de travail qui se charge de la normalisation pour les réseaux WPAN est l'IEEE 802.15. La deuxième classe concerne les réseaux locaux sans fil (WLANx) caractérisés par une portée d'environ une centaine de mètres. La classe WLAN contient plusieurs technologies concurrentes telles que IEEE 802.11 et HiperLAN. Les réseaux métropolitains sans fil (WMANs) également appelés Boucle Locale Radio (BLR) représentent la troisième classe. Ces réseaux étaient à l'origine prévus pour interconnecter des zones géographiques d'accès difficiles. Ils ont une portée de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres comme le réseau Wimax.

Enfin, la quatrième classe concerne les réseaux étendus sans fil (WWANs). Cette catégorie est également connue sous le nom de réseaux cellulaires mobiles. Il s'agit des réseaux sans fil les plus répandus dans le domaine de la télécommunication. Ces technologies ont connu une croissance énorme selon la chronologie suivante : Les systèmes de la première génération (1G) avaient l'objectif de transmettre la voix en utilisant une communication analogique [113]. Plus tard, la plus grande évolution dans le domaine des télécommunications a été l'introduction des systèmes de la deuxième génération (2G), comme par exemple la norme GSM [113]. Ces systèmes prennent en charge, non seulement la transmission de voix numérique, mais aussi des données avec l'introduction de la technologie GPRS [113].

Avec la forte demande de services basés sur des débits élevés, l'union internationale des télécommunications (UIT) a permis l'évolution des systèmes mobiles vers la troisième génération (3G). Parmi les technologies les plus répandues dans cette classe on trouve le réseau UMTS [61] standardisé par le 3GPP. En 2002, le 3GPP a lancé un autre système de télécommunication mobile HSDPA [113], dit 3.5G. Cette technologie est une amélioration de l'UMTS, elle permet d'offrir un débit allant jusqu'à 7.2 Mbps. Vu que le besoin de services à haut débit et une forte mobilité ne cessent d'augmenter, le 3GPP a lancé des systèmes de télécommunication de la quatrième génération. Dans ce contexte, nous signalons que les deux technologies IEEE

802.16 et LTE sont les plus répandues dans la 4G.

Dans ce qui suit, nous abordons une description de six technologies mobiles à savoir Bluetooth, WiFi, WiMaX, GPRS, UMTS et LTE. Dans cette description, nous nous intéresserons aux caractéristiques techniques, comme le débit, la couverture, etc. À l'issue de cette description, nous comparons les performances de ces réseaux mobiles et nous présentons leurs avantages et inconvénients. La figure 1.1 présente les différentes catégories de réseau sans fil, ainsi que le compromis entre les débits offerts par les normes existantes et leurs couvertures réseau.

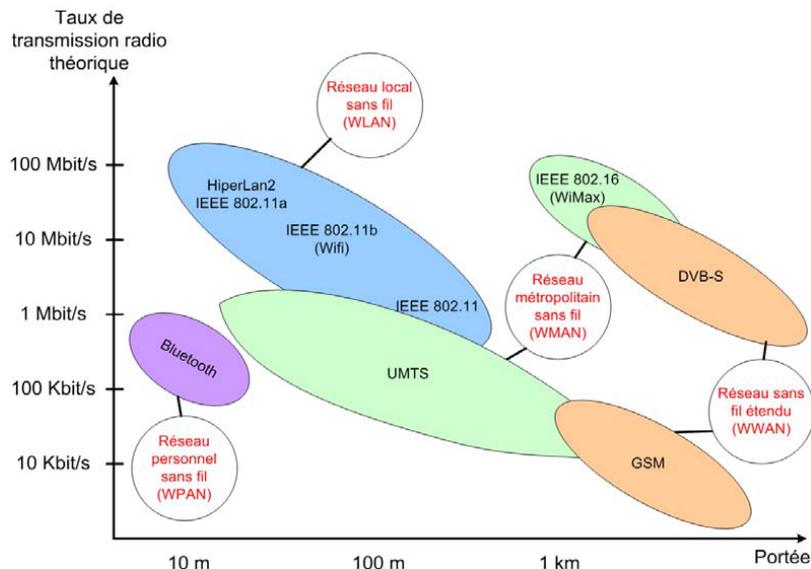


FIG. 1.1 – Catégories de réseaux sans fil [113]

### 1.2.1 La norme IEEE 802.15

La norme IEEE 802.15.1/Bluetooth [56] est une spécification de l'industrie des télécommunications dédiée aux communications mobiles pour les réseaux personnels sans fil (WPAN). L'objectif initial de cette norme était de connecter un téléphone ou un ordinateur avec ses divers accessoires en remplaçant la liaison infrarouge. La technologie IEEE 802.15.1 permet la communication radio sur de courtes distances (inférieures à 10m) dans une bande de fréquences entre 2 400 et 2 483,5 MHz. Elle offre un débit de 64 Kbit/s dans une communication synchrone, et un débit qui peut atteindre 723,2 Kbit/s dans une liaison de communication asynchrone.

Parmi les avantages de cette technologie, nous citons le coût de service gratuit et la possibilité pour les utilisateurs de connecter toutes sortes d'appareils mobiles comme les téléphones, les PDA, les imprimantes, les ordinateurs portables. D'un autre côté, la norme IEEE 802.15.1 permet d'assurer plusieurs types d'applications, comme le transfert de fichiers, l'agenda électronique, le transfert de flux audio entre un téléphone et un casque, etc. L'inconvénient majeur de cette norme réside dans le débit offert qui reste tellement faible par rapport à d'autres technologies comme IEEE 802.11 ou IEEE 802.16.

### 1.2.2 La norme IEEE 802.11

La norme 802.11 [55] est connue sous le nom commercial Wi-Fi qui désigne Wireless Fidelity. La norme IEEE 802.11 représente la technologie de réseaux sans fil (WLAN) la plus répandue dans le monde en raison de sa grande simplicité, ainsi que de son faible coût de mise en oeuvre. Elle permet de connecter des ordinateurs portables, des équipements de bureau, des assistants personnels (PDA) ou plusieurs types de périphériques à un débit qui peut atteindre 11 Mbps ou plus selon la spécification du standard. Ce dernier a été développé pour favoriser l'interopérabilité du matériel entre les différents fabricants ainsi que pour permettre des évolutions futures compatibles, un peu à la manière de l'Ethernet. Ceci signifie que les consommateurs peuvent utiliser des équipements de différents fabricants afin de satisfaire leurs besoins.

La norme 802.11 est basée sur un équipement physique appelé point d'accès (Access Point). Ce dernier permet de relier les terminaux mobiles entre eux sur un rayon d'une dizaine de mètres en environnement fermé et à plusieurs centaines de mètres en environnement ouvert. Le standard initial IEEE 802.11 a été amendé par de nombreux groupes de travail. Chaque groupe de travail fait des propositions qui donnent lieu à des améliorations [14] de la norme IEEE 802.11.

### 1.2.3 La norme IEEE 802.16

La norme IEEE 802.16 [57] est plus connue sous le nom de WiMAX. C'est une technologie principalement utilisée pour les réseaux sans fil métropolitains (WMAN) qui visent à fournir une connexion internet à haut débit sur une zone de couverture de plusieurs kilomètres de rayon. Le débit théorique du WiMAX est de l'ordre de 70 Mbits/s avec une portée de 50 kilomètres. La technologie WiMAX propose d'introduire des fonctionnalités de mobilité dans son réseau : un terminal WiMAX peut se déplacer tout en conservant un accès fiable au réseau. Cette fonctionnalité est introduite par la norme IEEE 802.16e qui peut être classée dans les réseaux sans fil étendus (WWAN).

Le WiMAX fonctionne en mode point à multi-point, c'est-à-dire le mode infrastructure que l'on connaît pour le Wifi, ou encore le même fonctionnement que les technologies 2G, 3G de téléphonie mobile. Ainsi, comme en 2G, une station de base nommée BTS (Base Transceiver Station) ou BS (Base Station) émet vers les clients et reçoit leurs requêtes, puis les transmet vers le réseau du fournisseur d'accès. Plusieurs variantes de standard ont été proposées, modifiées et ratifiées comme sont résumées dans [14].

En plus, la norme IEEE 802.16 a défini quatre classes de services à savoir : le service à acceptation non-sollicitée (UGS), le service temps réel (rtPS), le service de transfert de données (nrtPS) et trafic interactif (BE). En outre, une dernière classe a récemment intégré la norme constituant une extension du service temps réel (ertPS) [57]. Les caractéristiques de chaque classe sont définies dans tableau 1.1 ci-dessous.

TAB. 1.1 – Classification des classes de QoS offertes par la technologie WIMAX

Classe de service	Description	Application
Services en arrière-plan BE (Best Effort)	la classe BE est dédiée aux trafic n'exigeant pas de niveau de performance particulier, rien n'est garanti, on envoi les données sans garantie de réception.	la navigation Internet
service de transfert de données nrtPS (non real time Polling Service)	la classe nrtPS doit quant à elle permettre la bonne gestion des trafics insensibles au délai mais requérant un débit minimum. La taille des paquets peut donc être variable, ainsi que le délai entre deux transmissions de paquets.	transfert de fichiers (FTP)
service temps réel rtPS (real-time Polling Services)	la classe rtPS est destinée à traiter les trafics temps réel pour lesquels la taille des paquets de flux de données est variable et à intervalle régulier. Cette classe respecte donc les trafics sensibles au délai en évitant aux requêtes de mise à jour, les collisions impliquées par l'intervalle de contention.	flux vidéo tels que le MPEG, H.263
extension du service temps réel ertPS (extended real time Polling Service)	la classe ertPS est destinée à supporter les flux de données temps réel caractérisés par une taille variable de paquets reçus périodiquement	voix sur IP (VoIP) avec suppression de silence
service à acceptation non-sollicitée UGS (Unsolicited Grant Services)	la classe UGS est destinée à supporter les flux de données temps réel caractérisés par une taille fixe de paquets reçus périodiquement.	la voix sur IP (VoIP) sans suppression de silence

## 1.2.4 La norme GPRS

Le GPRS (General Packet Radio Services) [113], est une technologie cellulaire de génération deux et demi (2G+) fondée sur l'interface radio du GSM [113]. La technologie GPRS est conçue pour pouvoir pallier au problème de transfert de données dans le réseau GSM. Contrairement à la norme GSM qui utilise le mode circuit, la technologie GPRS introduit le mode paquet. Ce mode est plus adapté à la transmission des données permettant de ne pas réserver le canal de communication à un seul utilisateur, mais plutôt de le partager, ce qui rend la tarification plus souple.

GPRS permet d'atteindre un débit théorique maximum de 171,2 KBits/s, ce qui correspond pour l'utilisateur à environ 115 Kbits/s. Le principal apport de la technologie GPRS est la compatibilité avec les protocoles TCP/IP, ce qui permet à cette technologie de supporter des services mobiles dont les exigences en terme de qualité de service ne dépassent pas 115 Kbits/s. Parmi les services supportés, nous citons accès au web, email, jeux en ligne, E-commerce etc.

## 1.2.5 La norme UMTS

L'UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) [61] est un réseau mobile de troisième génération de la famille IMT-2000 (International Mobile Telecommunication system 2000). Les spécifications techniques de cette norme sont développées au sein du 3GPP. La technologie UMTS améliore les deux technologies GPRS et GSM par une qualité de service rendue au moins comparable à celle fournie par les réseaux fixes. L'UMTS se base principalement sur la technique d'accès multiple large bande (W-CDMA) pour y offrir ce type de service. La technique d'accès W-CDMA utilise une bande passante de 5 MHz autorisant des débits de 144 et 384 Kbit/s. Des débits de 2 Mbit/s peuvent être atteints sous certaines conditions. De plus, la technologie UMTS est capable de fournir une large gamme de services, tels que l'accès Internet à haut débit, le téléchargement de fichiers (audio et vidéo) ou alors la visiophonie. Le 3GPP [1] a défini quatre classes de services que l'UMTS peut offrir à l'utilisateur. Le

## 1.1.2 Les normes des technologies de communication

tableau 1.2 contient une classification des classes de QoS offertes par la technologie UMTS.

TAB. 1.2 – Classification des classes de QoS offertes par la technologie UMTS

Classe de service	Description	Application
services conversationnels (Conversational class)	les services de cette catégorie permettent de transmettre principalement du son et des images entre deux personnes ou groupes de personnes. Leur qualité est donc assez sensible à des délais dans la transmission, ces délais pouvant être facilement perceptibles par les utilisateurs.	la voix et la vidéophonie.
services streaming (Streaming class)	dans cette classe les services qui traitent l'information au niveau du terminal de façon continue, c'est à dire au moment même où elle est reçue (avant de la recevoir dans sa totalité). Ce type de service est unidirectionnel. Ces services sont assez récents et offrent un potentiel d'application assez vaste.	Le streaming audio et vidéo
services interactifs (Interactive class)	ce type de service est caractérisé par le fait que le terminal ayant envoyé un message/commande attend une réponse du destinataire dans un certain intervalle de temps. Par conséquent, un paramètre clé pour identifier la QoS des services interactifs est le temps d'aller-retour, c'est à dire le temps écoulé entre le moment où le message/commande est émis et celui où la réponse arrive.	Navigation Web
services en arrière-plan (Background class)	il existe des services qui ne posent, ou presque, aucune contrainte de temps dans le transfert de l'information qu'ils génèrent. Ils peuvent s'exécuter en "arrière-plan"	E-mail, téléchargement

## 1.2.6 La norme LTE

LTE (Long Term Evolution) [103] [15] est une technologie avancée de communication radio mobile proposée par l'organisme 3GPP. L'accès aux canaux de fréquences utilisés dans la norme LTE sont la division de fréquences (FDD) et La division temporelle (TDD). De plus, cette technologie repose sur le multiplexage OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) qui apporte une optimisation dans l'utilisation des fréquences en minimisant les interférences [113]. Finalement, le réseau LTE utilise la technologie d'antennes multiples MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), ce qui permet d'avoir des débits de 75 Mbit/s dans le sens montant et 300 Mbit/s dans le sens descendant [103].

En termes techniques, l'ensemble de ce réseau s'appelle EPS (Evolved Packet System) [15]. Il est constitué de deux entités : le réseau évolué d'accès radio LTE, et le réseau coeur évolué appelé SAE (System Architecture Evolution). Contrairement aux réseaux 2G et 3G où l'on distinguait les domaines de commutation de circuit et de commutation de paquet, le réseau coeur SAE ne contient qu'un seul domaine paquet appelé EPC (Evolved Packet Core). Tous les services sont basés sur IP y compris ceux qui étaient auparavant offerts par le domaine circuit tels que la voix, la visiophonie, le SMS, etc.

L'organisme de normalisation 3GPP a défini les différents types de services supportés par le réseau LTE. Cette technologies a proposée des changements fondamentaux par rapport aux anciens standards proposés par le 3GPP dans le but d'améliorer la capacité de l'architecture réseau LTE et d'assurer des services à valeur ajoutée. En effet, le réseau LTE fournit une haute qualité de service et un accès à internet fiable grâce à sa gestion dynamique des services ainsi que son routage du service IP. Le standard LTE permet de supporter une large gamme d'applications mobiles telles que la géolocalisation, la télévision mobile personnelle, la vidéoconférence, etc [15].

## 1.2.7 Comparaison et synthèse des technologies sans fil

La variété des normes de communications existantes soulève le problème du choix de la technologie qu'il faut adopter pour satisfaire les besoins des utilisateurs de l'internet mobile. Pour faciliter ce choix, une analyse comparative entre différentes technologies mobiles s'avère nécessaire afin d'aboutir à la meilleure technologie qu'il faut utiliser. Le tableau 1.3 présente les éléments clés de cette analyse comparative. Nous nous focalisons dans cette comparaison sur un ensemble de paramètres pertinents tels que le débit, la couverture, le coût de service, la vitesse de mobilité, la consommation d'énergie, etc.

D'après ce tableau, nous remarquons que les deux technologies de la 4G : WIMAX et LTE permettent d'améliorer les performances d'une communication radio-mobile comparativement à la 3G ou la 2G, notamment en terme de : débit, couverture et coût de service. Or, ces deux technologies n'ont pas encore connu de déploiement commercial de grande ampleur, vu que les opérateurs de télécommunication n'ont pas encore la volonté de changer leurs infrastructures basées sur les autres technologies de 2G ou 3G. Pour cette raison, de nombreux défis sont à relever :

- Faire cohabiter la 2G, la 3G et la 4G ;
- Faire coexister un environnement multiaccès hétérogène ;
- Développer de nouveaux terminaux multi-mode ;
- Assurer une mobilité sans coupure et optimisée dans un environnement sans fil hétérogène.

Dans la section suivante, nous allons traiter les contraintes et les exigences dans les réseaux hétérogènes.

TAB. 1.3 – Tableau récapitulatif relatif aux différentes technologies réseaux

Paramètre	802.15.1	802.11n	GPRS	UMTS	LTE	802.16e
Méthode d'accès	FHSS	OFDM	TDMA	WCDMA	OFDMA	OFDMA
Bande de fréquence	2.4 GHZ	2.4 ou 5 GHZ	900 ou 1800 MHz	1920-1980 2110-2170 Mhz	2.4 GHZ	2.3-2.4, 2.496-2.69, 3.3-3.8 GHz
Max des Débits Lien Descendant Lien Montant	1Mbps 3Mbps(v2.0)	540Mbps	80Kbps 20Kbps	2Mbps	326Mbps 86Mbps	75Mbps 25Mbps
Couverture de la cellule	1-100m	300m	70-140Km	70-140Km	5Km	2-7Km
Capacité de cellule	8 utilisateurs	32	64	1000	200-400	100-200
Mobilité supportée	0Km/h	4Km/h	500Km/h	500Km/h	350Km/h	120Km/h
Coût de service	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	Elevée	Elevée
Consommation d'énergie	Faible	moyenne	moyenne	moyenne	Elevée	Elevée
Securité	Faible	moyenne	moyenne	moyenne	Elevée	Elevée
Qualité de service	non	oui	non	oui	oui	oui

## 1.3 Contraintes et exigences des réseaux hétérogènes

La notion d'hétérogénéité dans un réseau peut avoir différents aspects. Les sous systèmes d'un réseau peuvent être gérés par des prestataires de services différents, peuvent utiliser différents types de supports de transmission tels que le câble, la satellite ou la radio et peuvent

### 1.1.4 Gestion de mobilité dans les réseaux hétérogènes

implémenter différents types de protocoles tels que ATM, IP et MPLS. D'autre part, le réseau peut être considéré hétérogène du point de vue des utilisateurs qui exigent différents types de services avec un mode de tarification différent. Finalement, l'hétérogénéité de réseau peut être aussi par rapport aux services fournis aux utilisateurs via chaque technologie. Vu que les différentes normes de communication n'appartiennent pas à la même génération, les réseaux ne supportent pas les mêmes classes de services.

D'un autre côté, un environnement réseau hétérogène est caractérisé par une complémentarité entre les technologies d'accès disponibles. A titre d'exemple, la technologie WIFI assure une meilleure bande passante avec une couverture limitée et un coût de service faible, contrairement à la technologie UMTS qui permet d'offrir une bande passante faible avec un coût de service élevé et une meilleure couverture.

Parmi les problèmes qui se posent dans l'environnement réseau hétérogène, on a l'inter-fonctionnement et la gestion de mobilité. L'inter-fonctionnement est un ensemble de mécanismes qui permettent d'interconnecter les noeuds d'accès de technologies différentes afin de partager des services et des ressources, tout en conservant une indépendance entre les différents réseaux élémentaires. Plusieurs modèles d'inter-fonctionnement entre systèmes hétérogènes sont envisageables. On peut distinguer les principales approches en fonction du type de "couplage réseau" considéré [91] [16] :

- Le couplage léger (loose coupling) : ce type considère l'utilisation de fonctions d'interconnexion de haut niveau dans les réseaux en se basant généralement sur l'utilisation du protocole IP pour la mobilité et l'identification.
- Le couplage intégré (integrated coupling) : ce type applique plutôt des mécanismes de coopération directe entre les éléments de réseaux d'accès différents (stations de bases par exemple) ou leur intégration au sein de noeuds d'accès multi-technologies.

Dans le contexte d'inter-fonctionnement des réseaux hétérogènes, il est important de gérer efficacement la mobilité des usagers dans le but d'assurer une continuité de service lorsque l'utilisateur se déplace d'un réseau à l'autre. Dans la section suivante, nous introduisons les principes de la gestion de mobilité dans les réseaux hétérogènes.

## 1.4 Gestion de mobilité dans les réseaux hétérogènes

### 1.4.1 Définition

La mobilité est une opération de changement du point d'attachement dans un réseau d'accès sans fil vers un autre point d'attachement tout en gardant la continuité des services. L'objectif principal de la gestion de mobilité est de maintenir des informations sur la position des terminaux mobiles et de gérer leurs connexions lorsqu'ils se déplacent dans les zones de couverture permises par les réseaux. La gestion de la mobilité inclut deux procédures [142] :

1. La gestion de la localisation : cette fonctionnalité permet de fournir au réseau des informations sur la position courante d'un terminal mobile. Elle contient deux étapes, d'abord le processus d'inscription de la localisation, où le terminal mobile est authentifié et sa position est mise à jour. Ensuite le paging, où la position du terminal mobile est recherchée pendant l'initialisation d'une nouvelle session.
2. La gestion des handovers : le handover est le processus par lequel le terminal mobile peut maintenir la communication quand il se déplace d'un point d'attachement (station de base) vers un autre point d'attachement.

Classiquement, la gestion de la mobilité implique l'ensemble des protocoles de mobilité utilisés dans le contexte d'un réseau hétérogène pour assurer une continuité de la communication dans les meilleures conditions possibles. Parmi ces protocoles on peut citer mobile IPv6 (MIPv6) [62], Fast Handover for Mobile IPv6 (FMIPv6) [68], Hierarchical Mobile IPv6 (HMIPv6) [133] et Proxy Mobile IPv6 (PMIPv6) [43]. En plus, la gestion de mobilité est de plus en plus complexe vu qu'il faut tenir en compte plusieurs facteurs tels que la La gestion des ressources, la qualité de service et la sécurité. Pour comprendre cette complexité, nous analyserons les différents types de mobilité ainsi que ses différents niveaux. Nous détaillerons après le protocole mobile IPv6.

### 1.4.2 Types de mobilité

Généralement, on distingue plusieurs types de mobilité en fonction des entités qui sont impliquées [166]. Une connexion réseau peut être définie comme une liaison établie par deux entités qui se trouvent aux deux bouts de la connexion et qui s'envoient des données. Ces entités peuvent désigner les machines, les applications ou même les utilisateurs. Dans ce qui suit, nous présentons les caractéristiques de ces différents types de mobilité.

#### 1.4.2.1 Mobilité du terminal

Cette mobilité se rapporte à un terminal qui se déplace soit à travers différents points d'accès d'un réseau, soit à travers différents réseaux d'accès, tout en maintenant l'accès à un même ensemble de services. Ce type de mobilité doit permettre le déplacement des terminaux sans coupure. De ce fait, la mobilité du terminal est au centre des problèmes abordés dans notre thèse.

#### 1.4.2.2 Mobilité du réseau

La mobilité du réseau se rapporte au déplacement de l'infrastructure du support de transport. C'est le cas des passagers d'un train ou d'un avion. En fait, c'est le sous réseau qui bouge avec tous ces noeuds, la problématique est la même que pour la mobilité du terminal. Par contre, lorsqu'il s'agit d'un noeud du réseau coeur qui se déplace, nous avons aussi une problématique d'interconnexion.

#### 1.4.2.3 Mobilité de l'utilisateur

La mobilité de l'utilisateur est dénommée aussi mobilité personnelle. Ce type de mobilité représente la possibilité de l'utilisateur à utiliser n'importe quel terminal pour communiquer à travers des applications et services de n'importe quel réseau. Les utilisateurs peuvent se servir de différents terminaux en fonction de l'endroit et la situation où ils se trouvent. Par conséquent, avec la pluralité des terminaux et services de communication, l'utilisateur possède plusieurs identifiants, en fonction de l'application utilisée : adresses e-mail professionnelles et personnelles, numéros de téléphone (téléphone portable, téléphone fixe) et d'autres noms d'utilisateur pour d'autres applications Internet comme la messagerie instantanée et la téléphonie sur Internet.

### 1.4.2.4 Mobilité du service

La mobilité du service doit permettre à un utilisateur d'accéder aux services auxquels il est souscrit auprès de son fournisseur d'accès où qu'il se situe (éventuellement chez un autre fournisseur d'accès) et quel que soit le type de terminal ou de technologie qu'il utilise. Ainsi, en prenant l'exemple du service VoIP, le fait que l'utilisateur a été souscrit à ce service, il aura accès n'importe où, à la liste de ses contacts et aux préférences de médias relatifs à ce service.

### 1.4.2.5 Mobilité de session

La mobilité de la session doit permettre à un utilisateur de maintenir ses sessions actives tout en changeant de terminal. Ainsi, un utilisateur ayant une communication de VoIP sur son smartphone peut, en arrivant à son bureau de travail, choisir de continuer sa conversation sur son PC sans qu'il y ait rupture de communication.

## 1.4.3 Les niveaux de mobilité

Selon le modèle OSI (Open Systems Interconnection), la mobilité peut être mise en oeuvre à différents niveaux. Chaque niveau correspond à une couche de modèle OSI dans lequel intervient un protocole de gestion de mobilité. Dans ce qui suit, nous présentons les propriétés de ces différents niveaux de mobilité.

### 1.4.3.1 Mobilité de niveau 2

Ce niveau de mobilité se réfère à la couche liaison de données. Il est connu sous le nom de Micro Mobilité. Par définition, la Micro Mobilité concerne le déplacement d'un noeud mobile entre deux points d'attachement situés sur le même réseau sans changement des caractéristiques de niveau 3 (son adresse IP courante par exemple).

### 1.4.3.2 Mobilité de niveau 3

La mobilité de niveau réseau est plus connue sous le nom de Macro Mobilité. Il s'agit de gérer le déplacement d'un utilisateur mobile entre deux domaines différents du même réseau, ou entre deux réseaux différents. Ce déplacement nécessite une mise à jour de la base de données "Location Directory" et une mise à jour de l'adresse IP courante de la station mobile. Cette dernière effectuée, dans ce cas, un transfert intercellulaire entre deux cellules gérées par différentes passerelles.

### 1.4.3.3 Mobilité de niveau 4

La mobilité de niveau transport est proposée comme un concurrent à la mobilité de niveau réseau pour mieux supporter l'intégration des services. La gestion de la mobilité au niveau transport est prise en charge dans le monde IP par le protocole SCTP (Stream Control Transmission Protocol) [140] et son extension DAR (Dynamic Address Reconfiguration) [141].

### 1.4.3.4 Mobilité de niveau 5

La mobilité de niveau application correspond à la mobilité au niveau de trois couches hautes du modèle OSI, qui sont, la couche session, présentation et application. Le protocole d'initiation de session (SIP) [116] présente des fonctionnalités de base très utiles dans le contexte de mobilité au niveau 5. Le standard SIP est un protocole de signalisation standardisé par l'IETF conçu pour établir, modifier et terminer des sessions avec un ou plusieurs participants. Sa principale utilisation réside actuellement dans la gestion des sessions de voix sur IP (VoIP, Voice over IP), dont il est actuellement le standard ouvert le plus répandu.

### 1.4.4 Mobile IPv6 (MIPv6)

Le protocole Mobile IPv6 [62] normalisé par l'IETF présente une solution incontournable pour la gestion de la mobilité sur Internet. L'architecture du protocole Mobile IPv6 est basée sur trois entités qui interviennent dans le processus de mobilité :

1. Le terminal mobile (MN, Mobile Node) qui peut se déplacer d'un réseau à l'autre et donc changer son point d'attachement d'un réseau ou sous réseau à un autre ;
2. L'agent mère (HA, Home Agent) en charge de rediriger les paquets à destination du MN lorsqu'il se trouve dans un réseau visité ;
3. Le terminal correspondant (CN, Correspondant Node) qui communique avec le MN.

La figure 1.2 illustre cette architecture. En plus, dans cette architecture, on distingue trois types de réseaux qui sont :

- Le réseau mère, qui est le réseau d'origine du MN. Dans ce réseau, le MN possède une adresse permanente dite adresse mère (HoA, Home Address) ;
- Le réseau correspondant, qui est le réseau du CN (peut être le même que le réseau mère) ;
- Le réseau visité, qui est un réseau autre que le réseau mère pour un MN. Le MN aura une adresse temporaire (CoA, Care-of Address) quand il s'attache à ce réseau.

Il y a deux scénarios possibles pour le fonctionnement du protocole mobile IPv6. Le premier scénario représente le cas lorsque le MN se trouve dans son réseau mère, le routage s'effectue de manière classique en se basant sur les tables de routage, puisque, dans son réseau mère, le MN se comporte comme un terminal fixe.

Le deuxième scénario est lorsque le MN se déplace dans un réseau visité, il obtient une CoA dont le préfixe sera évidemment celui du réseau visité. Pour cela, à son arrivée dans le réseau visité, soit il reçoit directement un Router Advertisement (RA) non sollicité, soit il envoie un Router Solicitation pour forcer l'envoi d'un RA. Grâce à ce message, il connaît le préfixe du réseau. Ensuite, il construit une adresse grâce au mécanisme d'autoconfiguration IPv6. Une fois que les mécanismes de DAD (Duplicate Address Detection) ont été effectués pour garantir l'unicité des adresses IPv6 (lien-local et unicast) sur le lien, le MN enregistre sa CoA auprès de son HA en lui envoyant un message de mise à jour d'association : un Binding Update (BU) qui comprend à la fois son adresse mère et son adresse temporaire. Le MN attend alors la réponse de son HA par l'intermédiaire d'un Binding Acknowledgement (BACK). L'agent mère joue ensuite le rôle de proxy : les paquets envoyés par le CN à destination du MN sont interceptés par le HA qui les encapsule et les transmet à travers le tunnel mis en place entre le HA et le MN à destination de la CoA du MN tandis que le MN transmet ses paquets au CN par l'intermédiaire du HA.

### 1.1.5 Gestion de handover dans les réseaux hétérogènes

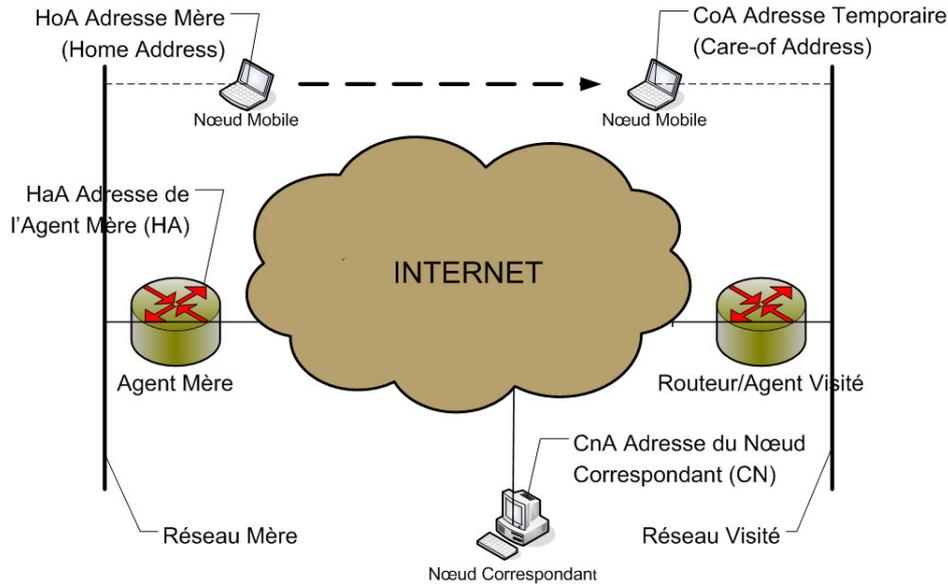


FIG. 1.2 – Architecture du protocole Mobile IPv6 [161]

## 1.4.5 Positionnement de notre étude sur la mobilité

Dans la littérature des réseaux mobiles, les deux termes mobilité et handover désignent la même chose. Ils sont souvent utilisés pour décrire la même fonctionnalité. Cependant, dans le but de positionner précisément le contexte de notre sujet de thèse et d'éviter certaines confusions, il est important de distinguer entre les deux termes.

Nous avons constaté que le terme "mobilité" couvre un grand nombre de significations [91] [16], ce qui en fait un domaine très complexe. En effet, le terme handover désigne en réalité la mobilité de terminal. Ainsi, vu que ce type de mobilité est le plus important parmi tous les autres types, il représente l'objet de plusieurs travaux de recherche [38] [166]. Notre sujet de thèse se focalise sur la gestion du handover. Pour la suite de ce mémoire, nous nous intéressons à la mobilité du terminal (handover) sachant aussi que la mobilité du niveau 3 intervient dans la gestion du handover [161].

## 1.5 Gestion de handover dans les réseaux hétérogènes

La gestion du handover dans l'internet est devenue un enjeu plus important surtout dans un environnement réseau hétérogène et multi-accès. L'hétérogénéité du réseau se manifeste par l'existence de différentes technologies d'accès telles que : IEEE 802.11, IEEE 802.16, UMTS, et LTE, ainsi qu'une diversité d'applications offertes aux utilisateurs telles que les jeux en ligne, la vidéofréquence, le chat, etc. L'aspect multi-accès se traduit par l'évolution des terminaux équipés par plusieurs interfaces réseaux, ce qui permet aux utilisateurs de profiter simultanément de ces différentes technologies réseaux disponibles. La gestion du handover est considérée comme la gestion de la mobilité au niveau du terminal. Elle représente un ensemble de mécanismes qui permettent à un terminal mobile multimode de basculer d'un réseau à l'autre tout en gardant une continuité de service pendant la communication.

Dans le but d'introduire le contexte et les objectifs de notre thèse, cette section sera consacrée à la présentation des différents concepts relatifs à la gestion du handover. D'abord, nous allons présenter une classification des terminologies relatives aux handovers. Puis nous allons

présenter les différents paramètres qui interviennent dans la gestion du handover et nous proposons également une nouvelle classification des algorithmes du handover existants. Enfin, nous allons présenter le protocole IEEE 802.21 comme étant le nouveau standard pour la gestion de la mobilité pour les réseaux hétérogènes.

### 1.5.1 Qu'est ce qu'un handover ?

Le terme handover, appelé aussi le transfert intercellulaire, est utilisé au niveau de la gestion de la connectivité entre une ou plusieurs stations de service et une station mobile, afin de désigner deux concepts [156]. Le premier concept est le changement de cellule de la station mobile dans le but de bénéficier des services d'une autre cellule au lieu de l'ancienne tout en restant dans la même technologie d'accès. Le deuxième concept sert à désigner le basculement de l'interface de connectivité de la station mobile de son point d'accès à un autre point d'attachement d'une technologie différente. Dans ce cas, la station mobile aura la possibilité de continuer sa communication en cours avec un minimum d'interruption.

La raison majeure pour déclencher le handover est la dégradation de la qualité de signal. Néanmoins, le handover peut se produire pour d'autres raisons à savoir :

- Une meilleure satisfaction de la QoS : si la cellule courante ne peut satisfaire la qualité de service exigée par l'utilisateur, ou lorsqu'il existe une autre cellule qui assure des services avec une meilleure QoS, l'appel est servi par une autre cellule pouvant satisfaire les paramètres de QoS requis ;
- La réduction de la congestion : dans le cas où une congestion a lieu dans la cellule courante, un appel peut être servi par une cellule alternative ;
- L'itinérance ou roaming : un fournisseur de service pourrait empêcher les abonnés de passer à certains réseaux particuliers.

### 1.5.2 Classification de terminologies des handovers

De nombreux facteurs interviennent dans la classification du handover. Nous présentons ci-après un aperçu sur quelques facteurs utiles pour comprendre la suite de notre thèse :

- **Handover horizontal et vertical** : cette classification est basée sur le type de réseaux. En effet, selon le type de transfert, le handover peut être classifié en deux types horizontal et vertical [5]. Un handover horizontal (handoff intra-system) est un handover classique entre deux cellules gérées par la même technologie. Autrement dit, le handover horizontal se déclenche lorsque le terminal mobile change son point d'accès d'une technologie à un autre point d'accès tout en restant dans la même technologie réseau. Par exemple, UMTS vers UMTS, WLAN vers WLAN, WIMAX vers WIMAX etc. Le handover vertical (handoff inter-system) se passe entre deux cellules hétérogènes, c'est-à-dire le handover apparaît lorsque le terminal mobile change son point d'accès d'une technologie à un autre point d'accès d'une technologie différente. Par exemple entre une station de base de IEEE 802.16 vers un point d'accès de IEEE 802.11. La figure 1.3 présente les deux types du handover dans un environnement réseaux sans fil hétérogènes.

D'un autre côté, dans le handover vertical nous distinguons deux types : le handover montant et le handover descendant [156]. Le premier se déclenche d'un réseau de couverture réduite et a grand débit vers un autre réseau avec une couverture plus étendue et moins de débit, par exemple WLAN vers UMTS. A l'inverse, le handover descendant

### 1.1.5 Gestion de handover dans les réseaux hétérogènes

se produit dans le sens opposé, par exemple UMTS vers WLAN. En raison des différentes capacités des réseaux, le handover montant ou le handover descendant doivent être traités différemment. Dans le cas du handover descendant, le terminal mobile effectue un transfert de contrôle à un nouveau réseau même si le réseau actuel est encore disponible. Dans ce cas, le temps de latence du handover ne présente pas une contrainte pour les performances des services délivrés aux utilisateurs. En revanche, dans le cas du handover montant, le terminal mobile doit choisir le meilleur réseau disponible en termes de qualité de service et doit effectuer un transfert de contrôle à un réseau plus étendu suite à un déplacement à l'extérieur de la zone de couverture. Par conséquent, la latence du handover devient critique.

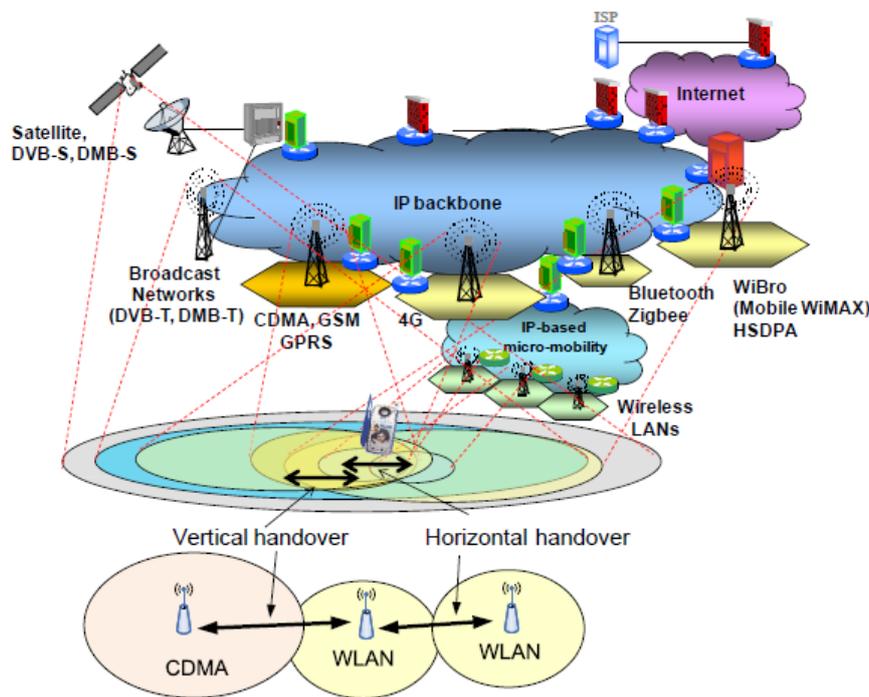


FIG. 1.3 – Les deux types du handover horizontal et vertical dans les réseaux 4G [66]

- **Hard, soft et softer** : le handover peut être classifié selon le nombre de points d'accès (ou stations de base) auxquels le terminal mobile peut se connecter à n'importe quel moment en trois types : hard, soft et softer [131] [177]. Le mécanisme du hard handover permet au terminal mobile d'interrompre la connexion avec l'ancien point d'attachement avant d'établir la connexion avec un nouveau point d'accès (principe Break before Make). Dans ce cas, le mobile ne peut être associé qu'à un seul point d'accès au cours d'une communication. Le softer handover se produit quand le terminal mobile communique avec une seule station de base qui utilise simultanément deux canaux radio. Dans le sens descendant, deux codes d'identification de signaux sont activés. Ils aident le mobile à distinguer les signaux issus des deux cellules. Durant le soft handover, le terminal mobile peut être en communication avec un ou plusieurs points d'accès à n'importe quel moment (principe Make before Break).
- **Handover contrôlé ou assisté par le mobile/le réseau** : cette classification repose sur le contrôle de la décision pour s'attacher à un nouveau point d'accès. Dans ce contexte, il existe quatre types de handovers : handover contrôlé par le mobile (MCHO),

handover contrôlé par le réseau (NCHO), handover assisté par le mobile (MAHO) et handover assisté par le réseau (NAHO) [174]. Dans le NCHO, le réseau mesure périodiquement la puissance du signal dans le sens montant et initie le processus du handover suivant les mesures effectuées. Durant le MCHO, le terminal mobile mesure la puissance du signal dans le sens descendant ainsi que la puissance des signaux en provenance des cellules adjacentes. Compte tenu des mesures effectuées, le mobile décide d'effectuer le handover à la station de base estimée comme étant la meilleure candidate pour le handover. La stratégie MCHO garantit l'établissement du handover en un temps optimal et réduit la complexité des terminaux mobiles. Dans le cas de MAHO, le réseau et le mobile effectuent conjointement des mesures des liaisons radio dans le sens montant et descendant. Les mesures effectuées sur la liaison descendante par le terminal mobile sont envoyées périodiquement au réseau. La décision du handover est prise alors par le réseau. Cette décision est basée sur les mesures effectuées sur les liaisons descendante et montante. Finalement, pour la décision NAHO, le réseau informe le terminal mobile des mesures effectuées sur le sens montant. Ainsi, le mobile effectue la décision du handover avec l'aide du réseau.

- **Seamless, smooth et fast** : en fonction de la qualité du service, le handover peut être classé en trois types : seamless handover, smooth handover et fast handover [18]. Le seamless handover est destiné à offrir une session sans coupure pour l'application et à respecter la QoS de bout en bout, ainsi que la continuité de la session sans coupure. Le smooth handover est destiné à minimiser la perte de paquets. Le fast handover est destiné à minimiser le délai du handover. Le délai du handover est la différence temporelle entre l'émission/réception de paquets du routeur précédent et l'émission/réception de paquets du routeur suivant.

Les autres classifications existantes sont illustrées par la figure 1.4 et sont détaillées dans [107] [124].

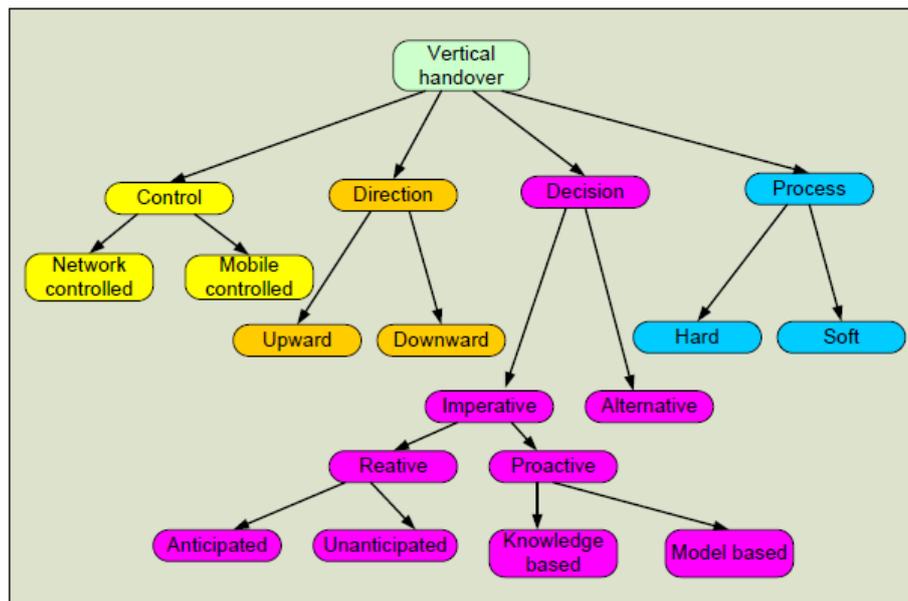


FIG. 1.4 – Classification de handover vertical [124]

### 1.5.3 Positionnement de notre thèse sur le handover

Le terme “handover” englobe plusieurs significations qui peuvent engendrer des axes de recherches différents. Dans cette thèse, nous nous focalisons sur la gestion du handover vertical, contrôlé par le mobile. De plus, nous nous intéressons à l’intégration de la QoS dans le processus de handover vertical (seamless handover) pour choisir le réseau le plus approprié parmi les technologies d’accès disponibles.

### 1.5.4 Le processus du handover vertical

Le processus du handover vertical peut être divisé en trois phases [156] :

1. La phase d’initiation : est aussi appelée la phase de découverte. Il s’agit pour un terminal mobile de découvrir les points d’attachement (PoA ) auxquels il peut s’attacher. En plus, le terminal ou le réseau collecte les informations spécifiques comme la qualité du signal, la disponibilité d’un autre canal pour identifier la nécessité du handover, etc.
2. La phase de décision : on l’appelle aussi phase de sélection du réseau. C’est la phase la plus importante dans le processus du handover. Elle comprend un ensemble de traitements que le mobile doit effectuer pour déterminer la meilleure interface réseau qui devrait être sélectionnée.
3. La phase d’exécution : elle consiste à établir la connexion avec le nouveau point d’attachement. Un protocole de mobilité (MIPv6) intervient pour allouer un nouveau lien radio et libérer l’ancien canal de communication.

Le concept “Always Best Connected” (ABC) [45] est devenu un problème majeur dans les réseaux sans fil hétérogènes. Avec la fonctionnalité ABC, les utilisateurs peuvent se connecter aux différents services à tout moment et n’importe où avec des terminaux multi-interfaces. Le processus du handover vertical permet d’assurer le principe ABC. Dans cette thèse, nous abordons la deuxième phase du processus de handover qui est la sélection du réseau. La finalité est le choix du meilleur réseau en fonction de multiples critères lorsque plusieurs réseaux d’accès sont disponibles.

Notre objectif étant d’optimiser et d’évaluer la performance de la sélection du réseau dans un environnement sans fil hétérogène. Il est important, à ce stade, de définir les critères qui interviennent dans la phase de la sélection du réseau, avant de présenter un aperçu sur les différents algorithmes de handover.

### 1.5.5 Les caractéristiques désirables de handover vertical

L’efficacité de n’importe quel algorithme du handover vertical se manifeste par la satisfaction d’un ensemble de caractéristiques désirables. Ces dernières permettent de répondre aux exigences des utilisateurs. Certaines de ces caractéristiques importantes sont décrites ci-dessous [107] :

- **Rapidité** : le handover doit être assez rapide pour éviter la dégradation et/ou l’interruption de service. La mobilité du terminal avec une grande vitesse exige un algorithme dynamique ;
- **Fiabilité** : le handover doit être fiable de telle sorte que le terminal mobile pourrait maintenir la QoS exigée après l’exécution du handover ;
- **Partage de charge** : pour réduire la probabilité de blocage d’un nouvel appel, le handover doit équilibrer le trafic entre les cellules (points d’accès) ;

- **Réussi** : les canaux libres et les ressources doivent être disponibles dans le réseau d'accès cible pour éviter l'échec de l'exécution du handover ;
- **Nombre de handovers** : il est important de réduire le nombre de handoffs car ceux-ci impliquent une forte consommation d'énergie du terminal et une rupture temporaire des communications.

### 1.5.6 Les critères de sélection du réseau

Traditionnellement, la décision de handover, en cas de handover horizontal, se base uniquement sur la puissance du signal (RSS) et les valeurs de seuils comme des paramètres d'entrée [148]. Or, en cas de handover vertical, on ne peut pas comparer directement le RSS de deux réseaux d'accès différents. Le handover vertical prend en considération plusieurs critères pour déterminer le meilleur réseau d'accès. L'ensemble de ces critères peuvent être regroupés de la manière suivante [4] :

- Critères relatifs au réseau/interface : ils représentent les informations liées aux caractéristiques de réseaux d'accès disponibles. Parmi ces métriques, nous citons la couverture réseau, la puissance de signal (RSS), la bande passante, le coût, les caractéristiques de l'interface (consommation d'énergie, niveau de sécurité), etc.
- Critères relatifs au terminal : ce sont des informations liées au terminal mobile. Par exemple la vitesse, la batterie, les informations de localisation, etc.
- Critères relatifs à l'utilisateur : ces paramètres concernent des informations liées au profil d'utilisateur et ses préférences. Ils regroupent : le réseau préféré, l'ordre de priorité de l'application, coût préféré, etc.
- Critères relatifs aux services : ils regroupent des métriques liées aux services telles que la QoS exigée par l'application, services potentiels, etc.

En plus, les critères du handover peuvent être classifiés en deux types : statique et dynamique. D'une part, les critères statiques sont des métriques relatifs aux préférences de l'utilisateur, ainsi que le coût de service. D'autre part, les critères dynamiques regroupent des métriques comme la puissance du signal, la vitesse du terminal mobile et les paramètres de QoS. Nous signalons aussi que ces critères peuvent être considérés comme paramètres de sortie pour évaluer la performance de différents algorithmes de handover. Nous citons ci-dessous les critères que nous allons utiliser durant nos simulations :

- Le coût (CB) : il désigne le coût pour avoir un tel débit (unité de mesure Dollar/byte).
- La bande passante totale (TB) : elle représente le débit total assuré par le réseau (exemple 54 Mbps pour IEEE 802.11a).
- La bande passante attribuée (AB) : c'est le débit offert pour chaque utilisateur (exemple 200Kbps/user).
- Le taux d'utilisation (TU) : elle représente la charge du réseau. Elle peut être exprimée en pourcentage(%).
- Le délai (D) : il représente le délai de transfert d'un paquet entre deux interfaces (exprimé en ms).
- La gigue (J) : la variation de délais entre deux paquets consécutifs (exprimée en ms).
- Le taux de perte (L) : c'est la proportion entre le total des paquets perdus sur l'ensemble des paquets transmis.
- La sécurité (S) : certaines applications exigent la confidentialité et/ou l'intégrité des données lors de la communication. Ce paramètre peut être utile pour basculer vers le réseau le plus sécurisé parmi les réseaux d'accès disponibles.
- Consommation d'énergie : le processus de handover exige une consommation mi-

### 1.1.5 Gestion de handover dans les réseaux hétérogènes

nimale d'énergie pour avoir une autonomie plus grande du terminal mobile. Il est préférable que celui-ci bascule vers l'interface réseau qui peut prolonger son autonomie.

- La vitesse : c'est un facteur de décision important dans la phase d'initiation de handover ou dans la phase de sélection réseau. Ce paramètre se rapporte à deux autres métriques qui sont la durée de connexion et la location de terminal. Le déplacement du terminal mobile avec une vitesse élevée peut produire un nombre excessif de handovers.

## 1.5.7 Classification des algorithmes du handover

La sélection du réseau est un problème très complexe vu qu'elle doit tenir compte de plusieurs facteurs tels que la mobilité du terminal mobile, les critères de sélection ainsi que le type de services. Pour aborder ce problème, plusieurs algorithmes sont proposés dans la littérature durant les dernières années. Selon les critères utilisés et les modèles mathématiques qui exploitent ces critères, il existe quatre propositions principales dans la littérature [67] [163] [98] [155] pour classer les algorithmes du handover.

Les auteurs M. kassar et al. [67] ont classifié les algorithmes de décision du handover en six catégories qui sont : les algorithmes classiques basés sur la puissance du signal, les algorithmes du handover basés sur la fonction du coût, les algorithmes du handover basés sur les préférences d'utilisateur, les algorithmes basés sur la logique floue et les réseaux de neurones, les algorithmes du handover basés sur les méthodes multi-critères et finalement des stratégies basées sur le contexte d'information (context-aware).

Généralement, les préférences d'utilisateur représentent un ensemble d'objectifs (peuvent être considérés comme des paramètres) fixés par l'utilisateur au moment de la décision du handover. Parmi ces objectifs nous citons : réseau préféré, service préféré, niveau de sécurité souhaité, coût monétaire limité pour bénéficier d'un service réseau, etc. L'ensemble de ces objectifs est exploité dans un modèle mathématique pour exprimer la satisfaction d'utilisateurs. Dans [109], les auteurs ont introduit la fonction d'utilité pour maximiser la satisfaction d'utilisateur en se basant sur leurs préférences.

D'autre part, la catégorie des algorithmes du handover basés sur l'information du contexte a pour but de prendre une meilleure décision pour le handover vertical. L'information du contexte se base sur la connaissance des informations relatives au terminal mobile et au réseau afin de prendre la meilleure décision dans la sélection du réseau. Les informations de contexte représentent des critères relatifs au terminal mobile (localisation, batterie, etc), des critères relatifs au réseau (couverture, QoS, etc) et des critères relatifs au service (exigence en QoS, coût, etc). Nous signalons que le contexte d'information nécessite l'utilisation d'une fonction mathématique pour regrouper l'ensemble de ces informations dans le processus du handover vertical. Dans [143], les auteurs ont proposé une solution de la sélection du réseau qui utilise les méthodes MADM comme modèle mathématique pour sélectionner le meilleur réseau. En plus, cette solution prend en considération le contexte d'information dans la phase de décision. D'après cet aperçu de la littérature sur les préférences d'utilisateur et le contexte d'informations, nous pouvons déduire que ces deux approches ne présentent pas réellement des catégories d'algorithmes du handover mais plutôt un ensemble des paramètres de décision. Ces paramètres représentent les critères qu'il faut tenir en compte en utilisant des modèles mathématiques à savoir la fonction de coût/utilité [110] et les méthodes MADM [138].

Une nouvelle classification des algorithmes du handover a été proposée dans [163] par les auteurs Xiaohuan et al. Dans cette classification, les deux catégories, les références d'utilisateur et

le contexte d'information sont éliminés. La nouvelle classification contient uniquement quatre groupes d'algorithmes qui sont : des algorithmes basés sur la puissance du signal reçu (RSS), des algorithmes basés sur la bande passante, des algorithmes basés sur la fonction de coût et la dernière catégorie concerne les algorithmes basés sur l'intelligence artificielle (combinaison algorithms). Cette dernière catégorie regroupe des algorithmes du handover qui utilisent la logique floue, les réseaux de neurones et les méthodes MADM. Cette catégorie représente une fusion de deux catégories : les algorithmes basés sur la logique floue/réseau de neurone et les algorithmes multi-critères qui sont proposés dans [67].

La troisième classification proposée dans la littérature est celle de Johann et al [98]. Cette classification divise l'ensemble des algorithmes du handover en trois grandes catégories : les algorithmes mathématiques, les algorithmes computationnels et les algorithmes d'agrégation de paramètres. La première catégorie représente des fonctions mathématiques comme la fonction de coût et la chaîne de Markov. Quant à la deuxième catégorie, elle regroupe des approches telles que la logique floue, les réseaux de neurone etc. Finalement, la dernière catégorie représente les algorithmes multi-critères.

La quatrième classification existante est celle de Bien Van Quang et al [155]. Dans cette classification, les algorithmes du handover vertical sont divisés en deux catégories appelées : les algorithmes conventionnels et les algorithmes basés sur l'intelligence artificielle.

D'après notre analyse et synthèse des quatre propositions de classifications existantes, nous proposons une nouvelle classification des algorithmes de la sélection de réseau [86]. Cette classification contient quatre groupes suivants :

1. Algorithmes conventionnels : dans ce groupe, tous les algorithmes introduisent un seul paramètre décisif, soit pour déclencher l'initiation du handover, soit pour déterminer la meilleure interface. Parmi ces algorithmes, nous citons les algorithmes basés sur la puissance de signal (RSS), les algorithmes basés sur la bande passante (BP), les algorithmes basés sur la vitesse du terminal (V), les algorithmes basés sur la direction du terminal (D) et les algorithmes basés sur la consommation d'énergie (P).
2. Algorithmes basés sur l'intelligence artificielle : cette classe regroupe la logique floue (FL), les réseaux de neurones (RN), les algorithmes génétiques (AG) ainsi que la théorie de jeux (TJ).
3. Algorithmes basés sur l'agrégation de paramètres : généralement ces méthodes consistent à combiner un ensemble de critères en utilisant une fonction mathématique. On trouve les algorithmes d'aide à la décision multi-attributs (MADM), la fonction de coût (FC) et la fonction d'utilité (FU).
4. Algorithmes hybrides : ce groupe contient des méthodes qui combinent les différents algorithmes des autres groupes entre eux. Par exemple, une méthode hybride basée sur l'algorithme génétique et la logique floue.

La figure 1.5 illustre cette classification et la section 1.6 présentera un aperçu détaillé de quelques algorithmes du handover de chaque groupe, les plus utilisés dans la littérature.

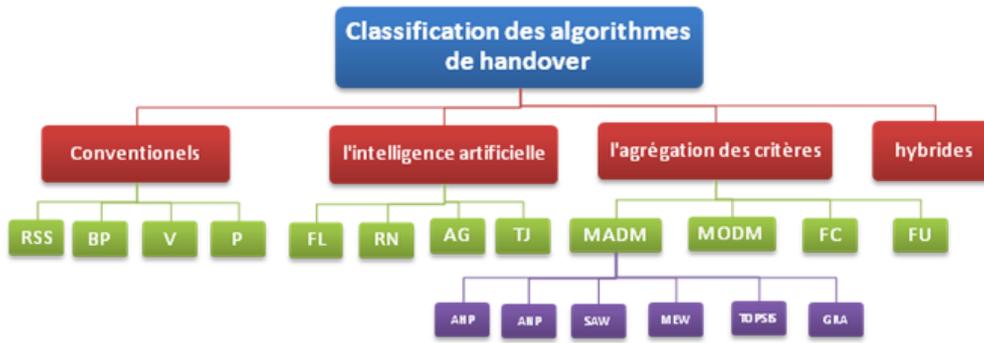


FIG. 1.5 – Nouvelle classification des algorithmes de handover [86]

### 1.5.8 Evaluation de performance du handover vertical

La performance de différents algorithmes de handover vertical peut être évaluée et comparée en se basant sur la mesure des paramètres suivants :

- Délai du handover : ce paramètre représente le temps écoulé entre la phase d'initiation de handover et la fin de la phase d'exécution du handover. De plus, cette métrique influence directement la complexité d'un algorithme du handover. En effet, un algorithme de décision simple peut produire une valeur minimale de ce paramètre. Généralement, les applications en temps réel nécessitent une valeur très sensible de cette métrique afin de satisfaire les exigences des utilisateurs ;
- Nombre des handovers : un algorithme du handover efficace doit éviter des handovers non nécessaires pour maximiser les ressources du réseau et minimiser la consommation d'énergie au niveau du terminal mobile ;
- Nombre de handovers échoués : l'échec du handover se produit lorsque le terminal mobile bascule vers un nouveau réseau cible qui ne garantit pas les ressources suffisantes pour le terminal. Cet échec est également possible quand le terminal se déplace en dehors de la couverture du réseau cible avant l'achèvement du processus du handover vertical. Ce paramètre influence directement la QoS de la session en cours ;
- Qualité de service : il est important que l'algorithme du handover optimise la performance des paramètres de QoS tels que le débit, la gigue, le taux de perte, etc.

### 1.5.9 La norme IEEE 802.21

La norme IEEE 802.21, également appelée MIH (Media Independent Handover) est un protocole de handover standardisé en 2009 par le groupe de travail IEEE 802.21 [58]. Ce standard a été développé pour supporter l'interconnexion et la mobilité entre des réseaux hétérogènes. La norme MIH regroupe un ensemble d'algorithmes permettant de maintenir les communications sans coupure entre des réseaux basés sur les technologies IEEE (802.11, 802.15, 802.16) ou cellulaire (GPRS, UMTS, LTE).

Le standard IEEE 802.21 spécifie des procédures et des primitives qui facilitent l'initiation du handover et la sélection du réseau. Il fournit l'état du niveau liaison de données sous forme d'informations aux utilisateurs de MIH. Cependant, le standard IEEE 802.21 ne définit pas les algorithmes et les politiques qu'il faut appliquer au niveau de chaque phase du handover telles que l'initiation du handover, la sélection du réseau et finalement l'exécution du handover.

L'architecture protocolaire de la norme IEEE 802.21 est basée sur une nouvelle couche qui

s'appelle fonction de Media Independent handover (MIHF). La MIHF opère entre la couche liaison de données (L2) et la couche réseau (L3) du modèle OSI (voir la figure 1.6). La fonction MIHF fournit de nouveaux points d'accès aux services : SAPs (Service Access Point) pour faire le lien entre les couches inférieures (1 et 2) et les couches supérieures (3+).

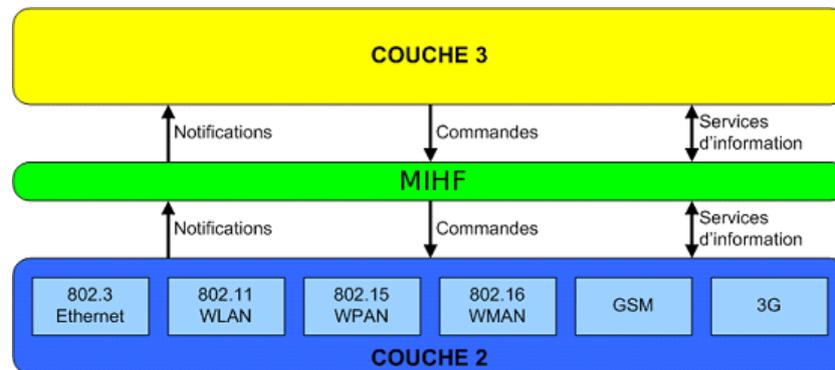


FIG. 1.6 – L'architecture de la norme IEEE 802.21

Dans la fonction MIH (MIHF), il existe trois services qui permettent le passage des messages tout au long de la pile protocolaire. Les fonctions basiques de ces services sont présentées ci-dessous :

- Media Independent Event Service (MIES) : qui fournit des services aux couches supérieures en signalant les événements locaux (au sein du terminal) et distants (en provenance d'éléments du réseau). Ainsi les événements locaux se propagent depuis les couches inférieures vers la MIHF puis vers les couches supérieures d'un terminal tandis que les événements distants peuvent se propager depuis un élément du réseau vers la couche MIH ou une couche supérieure du terminal. Ces événements peuvent par exemple être du type : Link Up (lien connecté), Link Down (lien déconnecté), Link Handover Imminent (changement de lien imminent), etc. La liste de ces événements est présentée dans le tableau 1.4.
- Media Independent Command Service (MICS) : elle concerne les commandes envoyées depuis les couches supérieures vers les couches inférieures du modèle de référence. Les couches hautes et les autres utilisateurs MIH peuvent utiliser le service de commandes pour déterminer les états des liens et/ou contrôler de manière optimale les performances du terminal multi-mode. Le service de commandes peut aussi permettre aux utilisateurs MIH d'exécuter de manière optimale le handover, car les services de commande contiennent des informations dynamiques telles que la puissance du signal, le débit du lien, etc.
- Media Independent Information Service (MIIS) : elle fournit une architecture et des mécanismes permettant à la MIHF de collecter des informations sur les réseaux disponibles. Ces informations peuvent concerner le type du réseau (GSM, IEEE 802.11, IEEE 802.16, etc.), le canal à utiliser, l'adresse MAC du point d'accès, le débit, la QoS ou encore la sécurité ainsi que d'autres informations concernant les services des couches supérieures. Ces informations sont disponibles aussi bien pour les couches supérieures que pour les couches inférieures.

Finalement, nous signalons qu'il existe d'autres solutions pour assurer la gestion de mobilité du terminal mobile. Cependant, ces solutions ne sont pas standardisées, nous citons à titre d'exemple, l'architecture intégrée Cyberté, l'architecture Ubique, l'architecture MIMA, etc. Le détail de chacune de ces architecture est donnée dans les références [18] et [102].

## 1.1.6 Les algorithmes de la décision du handover vertical

TAB. 1.4 – Les évènements MIH

Type de l'événement	Nom de l'événement	Description
changement d'état	lien connecté	connection L2 établie
changement d'état	lien déconnecté	connection L2 perdue
prévisible	lien en cours de déconnection	perte de connexion L2 imminente
changement d'état	lien détecté	nouveau lien L2 découvert
changement d'état	changement des paramètres	modification des paramètres de liaison
administratif	repositionnement d'une liaison	repositionnement d'une liaison
liaison de transmission	status de transmission	amélioration des performances du handover
liaison synchrone	liaison handover imminente	proximité de changement de réseau
liaison synchrone	liaison handover terminée	information sur l'état de handover

## 1.6 Les algorithmes de la décision du handover vertical

Les algorithmes de sélection d'interface pour le handover vertical sont assez nombreux dans la littérature. Dans cette section, nous présentons l'état de l'art sur les principaux algorithmes qui sont développés et proposés pour optimiser le handover vertical.

### 1.6.1 Les algorithmes conventionnels

#### 1.6.1.1 La puissance du signal RSS

Pour cette approche, la décision du handover est basée principalement sur la puissance du signal reçu (RSS : Received Signal Strength). L'algorithme du handover vertical mesure la valeur de la RSS pour tous les réseaux disponibles, ensuite il décide de transférer la communication vers l'interface réseau ayant la valeur la plus grande de la RSS. En raison de la simplicité de cette approche, plusieurs stratégies sont proposées pour attaquer le problème de la sélection du réseau. Les auteurs Yan et al. [163] présentent un aperçu sur l'ensemble de ces stratégies qui sont basées sur le RSS.

Il est important de signaler que les algorithmes basés sur la RSS provoquent un phénomène qui s'appelle "l'effet de ping-pong" à cause de la dégradation du signal. Ce phénomène se traduit par des handovers inutiles de terminal mobile. Ainsi, la RSS ne doit pas être le critère prioritaire par rapport aux autres critères de la sélection du réseau. Vu l'environnement hétérogène dans la 4<sup>ème</sup> génération des réseaux mobiles, l'algorithme de la décision du handover doit combiner le paramètre RSS et d'autres paramètres comme la bande passante où la durée de disponibilité du réseau pour délivrer un service donné [170].

#### 1.6.1.2 La bande passante

Les algorithmes du handover vertical basés sur la bande passante considèrent la bande passante disponible pour servir le terminal mobile comme un paramètre principal lors de la sélection de la meilleure interface réseau. L'ensemble des approches proposées dans ce cadre sont présentées d'une manière détaillée dans [163].

Pour avoir une meilleure décision dans la phase de la sélection réseau, les algorithmes du

handover vertical basés sur la bande passante utilisent généralement en parallèle, la puissance de signal comme un deuxième critère de sélection [44] [171].

### 1.6.1.3 La vitesse

Différentes techniques [9] [70] ont été proposées dans la littérature pour optimiser le handover vertical en utilisant la vitesse du terminal mobile comme critère principal dans la phase de décision. Lorsque le terminal mobile se déplace à grande vitesse, la probabilité de blocage des utilisateurs pour entrer dans une nouvelle cellule devient élevée. Pour cette raison, les techniques basées sur la vitesse doivent prendre en considération les différentes valeurs de seuil de vitesse au moment de décision.

### 1.6.1.4 La direction

Les stratégies du handover basées sur la direction de mouvement de terminal mobile sont utiles lorsque ce dernier se déplace à grande vitesse. Le critère de direction facilite la sélection de la meilleure interface réseau. Les stratégies qui utilisent ce critère permettent d'améliorer la performance de handover en termes de minimisation de nombre des handovers et aussi minimisation de délai de handover. Les détails de ces stratégies sont fournis dans [8] [176] [154].

## 1.6.2 Les approches basées sur l'intelligence artificielle

### 1.6.2.1 La logique floue

La logique floue est un outil mathématique largement utilisé dans l'intelligence artificielle. Elle permet de modéliser des aspects qualitatifs concernant des connaissances relatives à l'expertise humaine. En plus, cette logique est utilisée pour prendre en compte la subjectivité des critères étudiés et aussi pour représenter des connaissances imprécises, incertaines, ou incomplètes [169].

Le concept d'ensemble flou a été présenté par Zadeh [169] où il a décrit les mathématiques de la théorie des ensembles par une modélisation floue. En effet, la logique floue repose sur un système flou qui reçoit dans l'entrée des variables linguistiques pour fournir une valeur numérique dans la sortie de ce système. Une variable linguistique représente un état dans le système à régler comme batterie faible, une couverture large, etc. Parmi les systèmes flous utilisés, nous citons le système de Mamdani [167], le système de Takagi [167] et celui de Sugeno [167]. Dans le processus du handover vertical, le système flou est introduit pour développer des règles précises pour traiter des paramètres de la sélection du réseau qui sont non mesurables comme l'autonomie de la batterie. Plusieurs stratégies basées sur la logique floue sont proposées pour optimiser le handover vertical. La majorité des travaux publiés sont des méthodes hybrides qui combinent la logique floue et le réseau de neurones, les algorithmes génétiques ou les algorithmes MADM. Les références [132] et [50] représentent des solutions reposant principalement sur la logique floue pour résoudre le problème de la sélection de réseau.

Dans [132], l'optimisation de l'algorithme du handover vertical repose sur la théorie de la logique floue. L'algorithme proposé prend en considération, dans le système flou, trois critères qui sont la puissance du signal RSS, le coût de service ainsi que la bande passante. Les auteurs Hou et al. [50] ont proposé un algorithme de la prise de décision du handover basé entièrement

## 1.1.6 Les algorithmes de la décision du handover vertical

sur la logique floue. Cette solution prend en considération les préférences d'utilisateur ainsi que les politiques de l'opérateur. En plus, la solution proposée permet de réduire le nombre des handovers non nécessaires. Finalement, les références [69], [125] et [153] fournissent un aperçu sur l'ensemble des autres stratégies basées sur la logique floue ainsi que les nouvelles solutions pour résoudre le problème de la sélection du réseau.

### 1.6.2.2 Les réseaux de neurones artificiels (RNA)

Un réseau de neurones artificiels est un modèle mathématique inspirés des systèmes nerveux biologiques. Il simule deux aptitudes fondamentales du cerveau : l'apprentissage à partir des exemples et la généralisation [48]. Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de neurones fonctionnant en parallèle. Chaque neurone calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit.

Les RNA sont applicables, en principe, pour résoudre tout problème complexe sur lequel on dispose d'une base d'exemples ou base d'apprentissage. Parmi ces applications, nous citons la classification, la reconnaissance de formes, les systèmes de contrôle et les réseaux/télécommunications, etc. Dans le cadre du handover vertical, les réseaux de neurones peuvent apporter une solution pour optimiser la phase d'initiation du handover et aussi dans la phase de la sélection du réseau [111] et [106].

Dans [111], les auteurs Pahlavan et al. présentent un algorithme du handover vertical basé sur les réseaux de neurones dans un contexte où le WLAN et le GPRS sont interconnectés. L'algorithme proposé permet de satisfaire les exigences des utilisateurs en termes de bande passante. C'est un réseau de neurones qui prend la donnée "RSS" et en sortie donne un signal binaire où le 0 indique que le terminal doit poursuivre sa communication dans le réseau WLAN et le 1 qu'il doit effectuer un handover vers le réseau GPRS. L'architecture proposée fournit de meilleurs résultats en termes de délai et de nombre de handovers par rapport aux algorithmes classiques qui sont basés uniquement sur la puissance de signal RSS.

Les auteurs Nidal et al. [106], ont proposé une solution middleware basée sur les réseaux de neurones dans le but de choisir le meilleur réseau disponible. Cette solution prend en compte un ensemble de paramètres tels que : les préférences d'utilisateur, la capacité de terminal mobile ainsi que les caractéristiques du réseau. La fonction de décision de ce middleware utilise quatre critères qui sont le coût de service, la sécurité, la consommation d'énergie et la bande passante disponible.

Les autres approches basées sur les réseaux de neurones et qui permettent de résoudre le problème de la sélection du réseau sont abordées dans les références [105], [69] et [153].

### 1.6.2.3 La théorie des jeux

La théorie des jeux est un outil mathématique développé principalement pour l'étude des interactions entre plusieurs agents (individus, groupes, entreprises, etc.) [41]. La théorie des jeux fournit des approches mathématiques pour structurer, analyser et comprendre les problèmes qui nécessitent la prise de décision.

Le champ d'application de la théorie des jeux a envahi plusieurs domaines tels que la guerre, la biologie, l'ingénierie, les transports, les réseaux/télécommunications, etc. Dans le contexte du handover vertical, plusieurs travaux sont proposés dans la littérature pour optimiser la décision du handover [151].

Ramouna et al. [151] présentent un aperçu sur l'ensemble des travaux qui sont publiés pour

surmonter les problèmes et les défis concernant la sélection du réseau dans la 4G. Les auteurs visent à familiariser les chercheurs avec le concept de la sélection du réseau et aussi avec les différents algorithmes de la théorie des jeux qui sont utilisés dans la littérature pour modéliser le problème de la sélection réseau. Pour la même raison, les auteurs proposent une classification complète relative aux différentes approches basées sur la théorie des jeux ainsi que leurs utilisations pour attaquer le problème de la sélection de réseau. Cette classification regroupe les algorithmes du handover en trois catégories selon les interactions des acteurs qui interviennent dans le jeu : utilisateurs vs. utilisateurs, réseaux vs. réseaux et utilisateurs vs. réseaux. Enfin, les auteurs ont donné une comparaison et une analyse entre les différentes solutions développées pour résoudre le problème de la sélection de réseau en se basant sur la théorie des jeux.

Quoique la théorie des jeux est très utilisée pour la répartition de charge, elle ne s'avère pas être appropriée pour assurer le paradigme "ABC". En effet, avec la théorie des jeux, les réseaux (joueurs dans un jeu) sélectionnent leurs services appropriés. Pour le concept "ABC", il faut que les services sélectionnent leur meilleur réseau.

### 1.6.3 Les approches basées sur l'agrégation des paramètres

#### 1.6.3.1 La fonction de coût

La fonction de coût est une mesure du coût consommé en sélectionnant un réseau d'accès particulier parmi plusieurs réseaux disponibles. L'interface réseau qui a le coût le plus minimal, est considérée comme la meilleure. La fonction de coût est la somme d'une forme normalisée de chaque valeur  $x_{ij}$  qui représente la performance de l'attribut  $j$  dans le réseau  $i$ . La normalisation  $N(x_{ij})$  est nécessaire pour normaliser les attributs sur différentes unités. Les décideurs peuvent préciser les poids de chaque attribut. La forme générale de la fonction de coût  $F_i$  de réseau d'accès  $i$ , est :

$$F_i = \sum_{j=1}^m W_j * N(x_{ij}) \text{ avec } \sum_{j=1}^m W_j = 1 \quad (1.1)$$

où,  $w_j$  est le poids de l'attribut  $j$ ,  $N(x_{ij})$  représente la valeur normalisée de la performance de l'attribut  $j$  dans le réseau  $i$  et  $m$  est le nombre de critères.

La première stratégie du handover, qui utilise la fonction de coût, a été proposée en 1999 [156]. Cette stratégie permet de déterminer la meilleure interface réseau disponible ainsi que le moment pour déclencher le handover. Les paramètres utilisés sont la bande passante  $B_n$  offerte par le réseau  $n$ , la consommation de batterie  $P_n$  dans le réseau  $n$  et le coût monétaire  $C_n$  de l'utilisation du réseau  $n$ . La fonction de coût pour utiliser le réseau d'accès  $n$  s'écrit sous la forme :

$$F_n = w_b * N(1/B_n) + w_p * N(P_n) + w_c * N(C_n) \quad (1.2)$$

où,  $w_b$ ,  $w_p$  et  $w_c$  représentent respectivement les poids accordés aux trois critères : la bande passante, la consommation de batterie et le coût monétaire.

Hasswa et al. [47] ont proposé une fonction de coût dans le but de sélectionner le meilleur réseau d'accès. Dans cette approche, la normalisation et l'attribution des poids pour différents critères sont fournies. Le facteur  $Q_i$  de qualité de réseau  $i$  est utilisé pour évaluer la performance du handover et choisir le meilleur réseau. La forme de  $Q_i$  est exprimée par l'équation suivante :

$$Q_i = w_1 a C_i + w_2 b W_i + w_3 c S_i + w_4 d U_i + w_5 e N_i + w_6 f P_i + w_7 g V_i \quad (1.3)$$

## 1.1.6 Les algorithmes de la décision du handover vertical

$C_i, W_i, S_i, U_i, N_i, P_i$  et  $V_i$  représentent respectivement le coût de service, la consommation d'énergie, la sécurité, les préférences d'utilisateur, les conditions du réseau  $i$ , la performance du réseau  $i$  et la vitesse du terminal mobile. D'autre part,  $w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6$  et  $w_7$  sont les poids associés aux différents critères. Finalement, les scores numériques  $a, b, c, d, e, f, g$  sont utilisés pour décrire la quantité et l'ampleur de chaque critère en fonction du réseau. La valeur de chaque score est donnée par l'équation suivante :

$$0 \leq a, b, c, d, e, f, g \leq \infty \quad (1.4)$$

### 1.6.3.2 La fonction d'utilité

La fonction d'utilité est un modèle mathématique qui décrit le niveau de satisfaction d'un décideur ou d'un objectif spécifique en fonction de plusieurs variables. Cette fonction est utilisée souvent dans les domaines d'économie et de finance. Elle permet de mesurer d'une manière subjective le degré de satisfaction du client. Pour le processus de la sélection du réseau, la fonction d'utilité représente le degré de satisfaction du terminal mobile par rapport à un ensemble de services offerts par le réseau cible. Cette fonction est définie comme suit :

$$U_i = \sum_j w_j * f_j(x_{ij}) \quad (1.5)$$

Où  $x_{ij}$  représente la valeur de performance du critère  $j$  dans le réseau  $i$ ,  $w_j$  est le poids du critère  $j$  ( $\sum_j w_j = 1$ ) et  $f_j(\cdot)$  représente la fonction de normalisation.

Plusieurs schémas [110] et [108] ont été proposés pour la sélection de la meilleure interface réseau en utilisant des fonctions d'utilité. Dans [110], les auteurs ont proposé un aperçu sur l'ensemble des stratégies du handover qui sont basées sur la fonction d'utilité. En plus, ils ont proposé un nouvel algorithme de handover qui utilise la fonction d'utilité.

Le problème majeur des schémas présentés dans [110] est qu'il n'existe pas de fonction d'utilité adéquate qu'il faut appliquer pour tous les types de trafic et pour tous les critères. Pour cette raison, les auteurs [108] ont examiné les différents modèles de la fonction d'utilité existants dans la littérature. Suite à cette étude, les auteurs ont défini la fonction d'utilité adéquate pour le handover vertical.

### 1.6.3.3 Les méthodes MADM

Les méthodes d'aide à la décision multi-attributs [168] [172] représentent un outil mathématique efficace pour les problèmes qui nécessitent une prise de décision. Cette dernière est une action qui consiste à trancher entre plusieurs alternatives (solutions) et choisir celle qui sera la meilleure. Cette approche est largement appliquée dans plusieurs domaines comme l'économie, la sociologie, la statistique, l'informatique, etc. Les méthodes d'aide à la décision multi-attributs permettent d'évaluer plusieurs alternatives selon plusieurs critères conflictuels dans le but de classer, de la première à la dernière, toutes les alternatives.

L'approche MADM est une solution adéquate et prometteuse pour étudier et modéliser le handover vertical. Au cours de ces dernières années, plusieurs travaux de recherche ont utilisé les méthodes MADM pour résoudre le problème du handover vertical. Parmi les méthodes MADM qui sont développées et modifiées pour ce but, nous citons : AHP (Analytic Hierarchy Process), SAW (Simple Additive Weighting), MEW (Multiplicative Exponent Weighting), TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), and GRA (Grey relational Analysis), etc.

Les auteurs K.Savitha et al. [121] ont proposé un aperçu sur l'ensemble des algorithmes du handover basés sur l'approche MADM. Un autre travail intéressant est celui de E. Stevens-Navarro et al dans [138] où les auteurs ont présenté une étude comparative et une évaluation de performances entre tous les algorithmes du handover existants dans la littérature qui se basent sur l'approche MADM.

### 1.6.4 Les approches hybrides

Les algorithmes hybrides constituent des éléments clés pour répondre au problème du handover vertical. Ces algorithmes combinent les différentes approches du handover entre elles pour aboutir aux solutions efficaces et pertinentes dans le but de satisfaire les exigences des utilisateurs. Plusieurs algorithmes hybrides pour le handover sont proposés et développés dans la littérature [175], [23], [51], [49] et [6].

Dans [175], la solution proposée pour le handover vertical est une solution hybride qui combine la logique floue et les méthodes MADM. La logique floue est utilisée pour traiter les informations imprécises relatives aux quelques critères de décision et aussi aux préférences d'utilisateur. D'autre part, les méthodes MADM sont utilisées pour aider l'utilisateur à choisir le meilleur réseau.

Les auteurs Lei Chen et al. [23] ont proposé une nouvelle approche pour la sélection de réseau, basée sur la méthode AHP et la fonction d'utilité. Les poids de différents critères sont calculés par la méthode AHP, alors que la fonction d'utilité est utilisée pour classer tous les réseaux disponibles.

Dans [51], la décision du handover vertical est basée sur l'approche MADM et les algorithmes génétiques. La méthode AHP est utilisée pour attribuer les poids pour les différents critères, ensuite, la méthode TOPSIS est appliquée pour classer les différents réseaux. Finalement, les algorithmes génétiques sont utilisés pour garantir les exigences de QoS.

Horrich et al. [49] ont proposé un algorithme du handover vertical qui combine le réseau de neurone et la logique floue. Le réseau de neurone est appliqué pour déterminer les paramètres optimaux qui doivent être utilisés dans la phase de sélection du réseau. Ensuite, la logique floue est utilisée pour résoudre le problème des informations imprécises et aussi pour donner un score pour chaque réseau.

Enfin les auteurs M. Alkhawani et al. [6] ont développé une solution hybride pour optimiser le problème de la sélection du réseau. Cette solution combine trois méthodes : la logique floue, les algorithmes génétiques et une méthode MADM appelée SMART (Simple Multiattribute Rating Technique). D'abord, la logique floue est appliquée dans cette stratégie pour traiter les critères de la sélection de réseau qui sont imprécis. Ensuite, les algorithmes génétiques sont utilisés pour associer des poids pour chaque critère. Finalement, la méthode SMART permet de classer les différents réseaux.

### 1.6.5 Comparaison et synthèse entre les algorithmes du handover vertical

Cette section fournit une comparaison et une synthèse de différents algorithmes du handover qui sont discutés dans les sections ci-dessus. Du fait que la sélection du réseau est la phase la plus importante lors du handover vertical, l'évaluation et la comparaison entre les différentes approches de handover vertical se focalisent principalement sur cette phase. La performance du réseau, la satisfaction d'utilisateur, les préférences d'utilisateur, l'efficacité, la

### 1.1.6 Les algorithmes de la décision du handover vertical

complexité, la flexibilité et la fiabilité pour l'ensemble des algorithmes du handover doivent être considérées pour comparer et évaluer les approches du handover vertical. Un autre groupe de paramètres d'évaluation des algorithmes a été déjà présenté dans la section 1.5.8.

En effet, une étude comparative des différentes classes des algorithmes du handover a été effectuée dans les références [67], [163] et [155]. Le tableau 1.5 [67] présente une comparaison entre les différentes stratégies du handover vertical. Cette comparaison est basée sur les paramètres d'évaluation tels que : le choix multi-critères, les préférences des utilisateurs, l'efficacité, la flexibilité, la complexité et le type des services supportés.

TAB. 1.5 – Comparaison entre les différentes approches du handover vertical [67]

Handoff	RSS	Fonction de coût	User centric	MADM	Context Aware	Intelligence artificielle
Multi-critères	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Préférences utilisateur	Non	Faible	Elevé	Moyen	High	Moyen à élevé
Efficience	Faible	Moyen	Moyen	Elevé	Elevé	Elevé
Flexibilité	Faible	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Elevé
Complexité	Faible	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Elevé
Services supportés	Non temps réel	Plusieurs types	Plusieurs types	Plusieurs types	Multiple types	Multiple types

En outre, le tableau 1.6 [163] fournit une comparaison entre quatre groupes de handover selon cinq aspects : les technologies réseaux applicables, les paramètres d'entrée, les critères de sélection du réseau cible, la complexité et la fiabilité.

Finalement, le tableau 1.7 [155] résume la comparaison entre les différentes approches du handover selon six différentes métriques : les critères de sélection, l'effet "ping pong", le temps de latence, le nombre de handovers, le nombre de handovers inutiles et l'effet "corner".

TAB. 1.6 – Comparaison entre quatre groupes des algorithmes du handover [163]

Group	RSS based	Bandwidth based	Cost function based	Combination algorithms
Applicable networking technologies	Usually between macrocellular and microcellular networks	Between any two heterogeneous networks	Between any two heterogeneous networks	Between any two heterogeneous networks
Input parameters	RSS as the main input	Bandwidth combined with other parameters such as RSS	Various parameters such as cost, bandwidth and security	Different input parameters depending on different methods
Handover target selection criteria	The network candidate with the most stable RSS	The network candidate with the highest bandwidth	The network candidate with the highest overall performance	The network candidate with the highest overall performance
Complexité	Simple	Simple	Complexe	Très complexe
Reliability	Reduced reliability because of fluctuation of RSS	Reduced reliability because of the changing available bandwidth	Reduced reliability because of difficulty in measuring some parameters	High reliability because of the training of the system

D'après les trois comparaisons précédentes, les algorithmes du handover qui sont proposés malgré leurs aspects développés présentent quelques inconvénients et certaines limites. En terme de complexité, les algorithmes conventionnels sont généralement les plus simples à implémenter parmi toutes les catégories puisqu'ils utilisent principalement un seul critère comme RSS, bande passante, etc. La complexité augmente avec les méthodes MADM qui exigent non seulement un ensemble de critères mais aussi le fait que ces derniers doivent être normalisés. D'ailleurs, l'utilisation de l'intelligence artificielle et les algorithmes hybrides présentent l'inconvénient d'être trop complexes à implémenter.

En termes de fiabilité, les algorithmes du handover qui sont basés sur l'intelligence artificielle et l'approche MADM sont considérés comme les algorithmes les plus fiables parmi toutes les approches du handover existantes [163] [155]. Ils peuvent fournir des solutions précises en prenant en compte plusieurs facteurs de décision dans le processus de sélection du réseau.

En termes de services, les algorithmes conventionnels ne sont pas applicables pour la transmission en temps réel. D'autre part, les méthodes basées sur l'intelligence artificielle et l'approche MADM peuvent supporter toutes classes de services.

A travers cette étude et l'analyse comparative basée sur les algorithmes du handover, nous optons pour le choix de l'approche MADM afin d'optimiser le handover vertical. La question que nous pouvons se poser est : Pourquoi choisit-on les méthodes MADM pour cette finalité ? Nous choisissons l'approche MADM comme noyau de notre schéma de la sélection du réseau, pour les raisons suivantes :

- La sélection du réseau est un problème de nature multi-critères ;
- L'approche MADM est relativement simple à implémenter par rapport à d'autres techniques comme l'intelligence artificielle et les algorithmes hybrides.
- Les préférences d'utilisateur ainsi que le contexte d'information sont utilisés implicitement dans l'approche MADM ;
- L'approche MADM offre la possibilité de choisir le réseau optimal en termes de qualité de service ;
- L'approche permet de garantir l'amélioration des performances du handover telles que le temps de latence, le nombre du handover, etc ;
- La stratégie de sélection du réseau devrait prendre une décision en quelques millisecondes, l'approche MADM satisfait cette exigence. Par contre, les techniques hybrides ou celles basées sur l'intelligence artificielle, nécessitent trop de temps ;
- La logique floue et la fonction d'utilité peuvent être combinées facilement avec l'approche MADM dans le cas des stratégies hybrides. L'approche MADM représente toujours le noyau de chaque stratégie hybride dédiée pour la sélection du réseau.

### 1.7 Conclusion

Les technologies réseaux sans fil sont appliquées dans différents domaines tels que l'industrie et la science. Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes normes de communications mobiles avec leurs performances et capacités hétérogènes. Nous avons constaté également que ces différentes normes constituent un environnement hétérogène pour l'utilisateur.

L'intégration des différentes technologies réseaux sans fil est devenue nécessaire pour fournir une interopérabilité sans coupure pour les utilisateurs. Le handover vertical a été proposé comme une solution efficace pour réaliser l'intégration entre les différentes technologies existantes dans la quatrième génération (4G) tout en assurant le paradigme "Always Best Connected".

Nous avons décrit aussi le processus du handover vertical, les différentes phases qui constituent ce processus, ainsi que les paramètres qui interviennent dans la phase de la décision du handover. Nous avons choisi d'optimiser la phase de la sélection du réseau qui représente la deuxième phase la plus importante dans le processus du handover.

Concernant les paramètres d'évaluation du handover, nous avons présenté les métriques les plus utilisées dans la littérature pour comparer et évaluer les performances des différentes stratégies du handover. En plus, nous avons décrit le protocole de la gestion du handover IEEE 802.21.

En outre, nous avons proposé une nouvelle classification pour regrouper les algorithmes du handover. Cette classification contient quatre groupes d'algorithmes. Chaque groupe contient un ensemble de solutions qui sont basées sur le même concept pour optimiser le handover. Ensuite, nous avons présenté l'état de l'art des principaux algorithmes de la sélection du réseau de chaque groupe.

Finalement, nous avons choisi les méthodes MADM pour optimiser le handover vertical. Le deuxième chapitre sera consacré aux algorithmes de la sélection qui sont basés sur l'approche MADM, leurs descriptions, ainsi que leurs différentes limitations.

TAB. 1.7 – Principaux algorithmes du handover vertical [163] [155]

Handoff	Conventional handoffs						Intelligent handoffs			
	RSS	SIR	Bandwidth	Minimum power	Velocity adaptive	Direction Based	Fuzzy logic	Neural network	Prediction	MCDM
Resource management	Signal strength	SIR integrated resource management	Bandwidth, RSS	SIR, Power, integrated resource management	Velocity, RSS	Direction, RSS	Mutiple decision criteria	Mutiple decision criteria	Mutiple decision criteria	Mutiple decision criteria
Ping-Pong effect	Yes	Avoided (by using hysteresis)	Yes	NA	Avoided	Avoided	Avoided	Avoided	Avoided	Relatively high
Handoff Latency	Relatively low	Relatively low	Short handover delay	NA	Reduced	Reduced	Reduced	Reduced	Reduced	NA
Number of handoffs	Can be very high	reduced	Not provided	NA	NA	Low	Reduced	Reduced	Reduced	Relatively high
Number of unnecessary handoffs	Can be very high	Relatively high	Not provided	NA	NA	Low	Low	NA	Low	Can be very high
Corner Effect (NLOS)	Possible	Possible	Possible	Possible	Yes	Yes	Yes, but can be avoided			

---

---

## CHAPITRE 2

---

# LA SELECTION DU RESEAU BASEE SUR LES METHODES MADM : ETAT DE L'ART

### 2.1 Introduction

Comme nous l'avons déjà avancé dans le chapitre précédent, les méthodes d'aide à la décision multi-critères (MCDM) représentent une solution prometteuse pour le problème de la sélection du réseau. Dans ce chapitre, nous abordons les éléments clés relatifs à l'ensemble des méthodes MCDM afin de comprendre comment se fait le processus d'optimisation via cette approche. Dans un premier temps, nous allons présenter une classification des méthodes MCDM existantes dans la littérature (section 2). Ensuite, dans la section 3, nous nous focalisons sur le principe des méthodes d'aide à la décision multi-attributs (MADM). Puis, nous décrivons les quatre facteurs qu'il faut prendre en compte dans l'optimisation du handover (section 4). Dans un deuxième temps, nous allons décrire les différentes techniques de normalisation (section 5). Dans la section 6, nous présentons les différents algorithmes de pondération qui ont été récemment proposés dans la littérature dans le contexte du handover vertical. Dans la section 7, nous donnons un aperçu détaillé de l'état de l'art sur les principaux algorithmes de classement qui sont développés et proposés pour optimiser le handover vertical. A l'issue de cet état d'art, nous allons synthétiser et évaluer la performance des différents algorithmes de handover (section 8). Enfin, une conclusion de ce chapitre sera donnée dans la section 9.

### 2.2 Classification des méthodes d'aide à la décision multi-critères

La prise de décision est un élément clé dans de nombreuses disciplines dans la vie quotidienne. Les méthodes d'aide à la décision multi-critères (MCDM) [152] interviennent comme une solution prometteuse pour la prise de décision. Bien que les problèmes qui nécessitent l'utilisation de l'approche MCDM soient largement divers (économie, sociologie, statistique, informatique, etc.), ils en partagent des caractéristiques communes :

## CHAPITRE 2. LA SELECTION DU RESEAU BASEE SUR LES METHODES MADM : ETAT DE L'ART

---

- Le domaine de choix représente un ensemble fini/infini des alternatives qui possèdent au moins deux critères de décision.
- L'existence de conflit entre les critères : par exemple lors de la conception d'un ordinateur portable, l'objectif de réduire le coût de la production entraîne la renonciation à une partie de la performance.
- Les critères n'ont pas la même unité de mesure : chaque critère possède sa propre unité de mesure. Dans le même exemple, le coût est quantifié par dirhams, tandis que la vitesse du processeur est exprimée par le gigahertz (GHZ).
- La modélisation des préférences : c'est une étape de traitement importante dans la théorie de la décision. C'est une façon par laquelle le décideur exprime ses préférences vis-à-vis d'une alternative dans le but de choisir l'alternative optimale parmi les solutions disponibles.

La dernière caractéristique nous offre la possibilité de classifier les méthodes d'aide à la décision multi-critères en deux catégories : les méthodes d'aide à la décision multi-objectifs (MODM) et les méthodes d'aide à la décision multi-attributs (MADM).

Le tableau 2.1 contient une comparaison des caractéristiques des deux classes. En effet, pour les problèmes basés sur l'approche MODM, les critères sont définis par des objectifs. Un objectif est le but à atteindre, fixé à l'avance par des concepteurs. Par exemple, dans le contexte de la sélection du réseau, nous citons comme des objectifs pour l'utilisateur : minimiser le coût du service, minimiser le délai du handover, maximiser la durée de vie de la batterie, etc. Ainsi, le but est explicite dans cette approche. En outre, l'approche MODM repose sur un ensemble de contraintes bien définies, ce qui constitue un autre point de distinction par rapport à l'approche MADM.

Par contre, pour les problèmes basés sur l'approche MADM, les critères sont considérés comme des attributs relatifs à chaque alternative. Un attribut représente réellement la performance d'un paramètre ou d'un facteur qui influence directement la sélection de l'alternative optimale. Dans cette approche, chaque alternative est caractérisée par un ensemble fini d'attributs. Toujours dans le même exemple, un réseau se caractérise par un ensemble d'attributs tels que le coût de service, la couverture, le débit, etc. La décision définitive pour déterminer le meilleur réseau s'effectue en comparant tous les attributs de tous les réseaux disponibles. Pour les problèmes basés sur l'approche MADM, généralement le but n'est pas explicite, mais il est mal défini. La maximisation de la satisfaction est parfois définie comme le but souhaité. Dans les méthodes MADM, les contraintes sont incluses directement dans les attributs.

TAB. 2.1 – Comparaison entre les deux approches MODM et MADM

Characteristics	MODM	MADM
Criteria defined by	Objectives	Attributes
Goal	Explicit	Implicit
Constraint	Active	Inactive
Alternative	Infinite field	Finite field
Decision space	Continue	Discrete
Usage	Design	Selection/Evaluation

Après avoir exposé une comparaison entre les deux approches MODM et MADM, nous pouvons déduire que le problème de la sélection du réseau doit être traité en utilisant l'approche MADM. En effet, dans le processus de la sélection du réseau, un réseau candidat représente une solution connue a priori qui peut être choisie par l'utilisateur. De plus, cette solution est caractérisée par

### 2.2.3 Le principe de fonctionnement de l'approche MADM

un ensemble de paramètres tels que le débit, le délai, le taux de perte, etc qui sont considérés comme des attributs pour l'approche MADM. Finalement, le nombre des alternatives réseaux auxquelles l'utilisateur peut se connecter à un instant donné est fini et l'espace de décision est discret.

Dans le contexte de la sélection du réseau, nous distinguons deux groupes d'algorithmes dans l'approche MADM :

1. Les algorithmes de pondération qui sont utilisés pour attribuer des poids pour les critères comme AHP, ANP, etc.
2. Les algorithmes de classement qui sont appliqués pour classer les alternatives selon leurs performances comme SAW, MEW, TOPSIS. etc.

Nous signalons que les méthodes de pondération comme AHP ou ANP peuvent être utilisées pour ranger les alternatives.

## 2.3 Le principe de fonctionnement de l'approche MADM

L'objectif fondamental de MADM [53] [172] consiste à déterminer l'alternative optimale parmi un ensemble d'alternatives. Chacune est définie par un ensemble fini d'attributs. Dans le contexte de la décision du handover vertical, les alternatives représentent les réseaux d'accès disponibles pour un terminal mobile et les attributs représentent les critères de la sélection du réseau. Le principe de fonctionnement de l'approche MADM repose sur les étapes suivantes :

1. La construction de la matrice de décision  $D$  : cette matrice contient  $n$  lignes et  $m$  colonnes et elle est exprimée comme suit :

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & \dots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & \dots & d_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & \dots & d_{nm} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

- Les lignes représentent la liste des alternatives  $A = \{A_i, i = 1, 2, 3, \dots, n\}$
  - Les colonnes indiquent la liste des attributs  $C = \{C_j, j = 1, 2, 3, \dots, m\}$
  - $d_{ij}$  représente la performance de l'alternative  $A_i$  qui correspond au critère  $C_j$
2. Normalisation des critères : vu que les critères n'ont pas la même unité de mesure, il est important de les normaliser. Pour chaque  $d_{ij}$ , on calcule sa valeur normalisée en utilisant la formule suivante :

$$r_{ij} = N(d_{ij}) \quad (2.2)$$

Où  $N(x_{ij})$  représente la valeur normalisée de l'alternative  $i$  de l'attribut  $j$ ,  $N$  est une fonction de normalisation (voir la section 2.4.1). On obtient la matrice de décision normalisée  $R(r_{ij})$  définie par :

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & \dots & r_{nm} \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

De plus, à chaque critère  $C_j$ , on associe un poids  $W_j$  qui représente son degré d'importance. L'ensemble de poids est exprimé par le vecteur de poids  $W = \{W_j, j = 1, 2, 3, \dots, m\}$  qui doit satisfaire la contrainte  $\sum_{j=1}^m W_j = 1$ .

3. La construction de la matrice de décision normalisée pondérée  $V$  : la matrice pondérée  $V(v_{ij})$  est obtenue à partir de la matrice  $R(r_{ij})$ , selon la formule suivante :

$$v_{ij} = W_j * r_{ij} \text{ avec } \sum_{j=1}^m W_j = 1 \quad (2.4)$$

Donc, la matrice  $V$  sera exprimée par l'équation

$$V = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & \dots & v_{1m} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & \dots & v_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{n1} & v_{n2} & \dots & \dots & v_{nm} \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

4. Classement des alternatives : l'approche MADM introduit des techniques pour calculer le score global par alternative  $A_i$ , ce qui permettra de classer les alternatives. Le score est calculé en prenant en compte les performances de chaque critère qui sont exprimées dans la matrice  $V$ .

En général, toutes les méthodes MADM respectent la même démarche pour classer les alternatives. En revanche, elles se distinguent en deux points. Le premier concerne la technique de normalisation utilisée (étape 2) pour unifier les attributs, tandis que le deuxième point réside dans la technique utilisée pour classer les alternatives (étape 4).

## 2.4 Optimisation de la sélection du réseau basée sur l'approche MADM

La conception et la modélisation d'une architecture pour le handover vertical en utilisant l'approche MADM comme le noyau de la décision, nécessite l'étude de quatre points particuliers :

1. Identifier l'ensemble de critères de la sélection ;
2. Normaliser les critères ;
3. Déterminer le poids pour chaque critère ;
4. Choisir la méthode MADM à utiliser pour regrouper les critères.

Afin de définir l'ensemble des critères qui doivent être considérés dans la phase de sélection réseau, il est nécessaire d'évaluer et de comparer l'ensemble des algorithmes de handover. Ceci ne peut être fait qu'avec des simulations pour éliminer les critères redondants. Le deuxième point qu'il faut traiter consiste à identifier une technique efficace pour normaliser les critères vu que ces derniers n'ont pas la même unité de mesure.

Le choix des poids à assigner à chaque critère requiert également une bonne connaissance de l'état de l'art relatif à ce problème. Comme nous le verrons par la suite, il peut être très difficile de trouver un algorithme unique pour attribuer les poids relatifs aux critères pour les différents types de flux.

Enfin, le choix de la méthode à mettre en oeuvre pour l'agrégation des critères dépendra souvent de la complexité de la méthode ainsi que de sa performance. En effet, en fonction de l'évaluation des performances de différentes solutions basées sur l'approche MADM, nous décidons quelle est la meilleure méthode qu'il faut utiliser. D'ailleurs, dans le contexte de la sélection du réseau, il n'existe pas une méthode MADM appropriée par rapport à une autre. La figure 2.1 illustre le modèle de la sélection de réseau qu'il faut tenir en compte afin de proposer une solution pour le handover vertical ou d'optimiser une solution existante en utilisant

l'approche MADM. Notre travail, au cours de cette thèse, se focalise sur l'optimisation et l'évaluation de trois axes à savoir les algorithmes de pondération, les algorithmes de classement ainsi que les critères de la sélection utilisés dans le handover vertical.

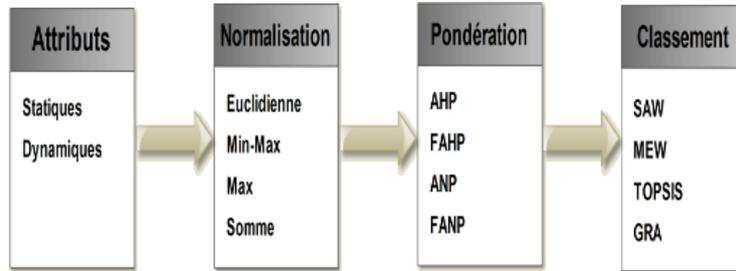


FIG. 2.1 – Modèle de la sélection de réseau basé sur l'approche MADM

## 2.5 Les méthodes de normalisation

Lorsque les méthodes MADM sont appliquées, les unités utilisées pour comparer les différents attributs provoquent des problèmes de calcul. En effet, généralement les critères qui interviennent dans la phase de décision n'ont pas la même unité de mesure. Par la suite une comparaison directe entre eux devient impossible. Afin de résoudre ce problème, il est important d'introduire le processus de normalisation [168] comme une étape cruciale dans n'importe quelle méthode de l'approche MADM. Ce processus permet d'unifier les différents critères afin d'effectuer une comparaison entre eux. De plus, les attributs de décision peuvent être classifiés en deux groupes avant d'appliquer une technique de normalisation [12] :

1. Les attributs de bénéfice : la fonction d'utilité pour ces attributs est monotone croissante. Plus la valeur de l'attribut est grande, plus son degré de préférence est grand. Par exemple le débit offert par une technologie d'accès.
2. Les attributs de coût : la fonction d'utilité pour ces attributs est monotone décroissante. Plus la valeur de l'attribut est petite, plus son degré de préférence est grand. Par exemple le coût de service.

Il existe quatre techniques de normalisation qui sont utilisées dans l'approche MADM. Ces techniques sont décrites ci-dessous.

### 2.5.1 La technique de normalisation euclidienne

Dans cette procédure, chaque valeur d'attribut  $x_{ij}$  de la matrice de décision est divisée par sa norme. La valeur normalisée  $r_{ij}$  est alors obtenue selon l'équation suivante :

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (2.6)$$

Cette technique a l'avantage de normaliser les attributs sur différentes unités d'une manière très simple [53] [168].

## 2.5.2 La technique de normalisation par le minimum-maximum (min-max)

Dans cette procédure les attributs sont normalisés en fonction du minimum et maximum observés pour le paramètre. La valeur normalisée  $r_{ij}$  est définie en fonction de types de l'attribut :

- Pour un critère de bénéfice : La valeur normalisée  $r_{ij}$  est calculée comme suit :

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (2.7)$$

- Pour un critère de coût : la valeur normalisée  $r_{ij}$  est calculée comme suit :

$$r_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (2.8)$$

Où  $x_j^{\min}$  et  $x_j^{\max}$  représentent respectivement la valeur minimale et maximale de l'attribut  $x_{ij}$  parmi toutes les alternatives. Cette procédure présente l'avantage que l'échelle de mesure est précisément entre 0 et 1 pour chaque attribut [53] [168].

## 2.5.3 La technique de normalisation par le maximum (max)

Cette technique est similaire à la normalisation Min-Max mais au lieu d'utiliser la valeur maximale et minimale, elle utilise uniquement la valeur maximale. La procédure divise la valeur de chaque attribut par la valeur maximale de l'attribut parmi toutes les alternatives. La valeur normalisée  $r_{ij}$  est obtenue par :

- Pour un critère de bénéfice : La valeur normalisée  $r_{ij}$  est calculée comme suit :

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j^{\max}} \quad (2.9)$$

- Pour un critère de coût : La valeur normalisée  $r_{ij}$  est calculée comme suit :

$$r_{ij} = 1 - \frac{x_{ij}}{x_j^{\max}} \quad (2.10)$$

## 2.5.4 La technique de normalisation par la somme (sum)

Cette procédure consiste à diviser la valeur  $x_{ij}$  de l'attribut pour chaque alternative par la somme des valeurs de toutes les alternatives correspondantes à cet attribut. La valeur normalisée  $r_{ij}$  est obtenue comme suit :

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (2.11)$$

Finalement, le choix de la technique de normalisation adéquate qu'il faut utiliser pour une telle méthode MADM reste un problème ouvert. Or, il n'y a pas une spécification réalisée pour répondre à ce problème vu la diversité des méthodes MADM dans la littérature.

## 2.6 Les algorithmes de pondération

La pondération des critères est une étape importante dans le processus de la prise de la décision. Dans cette phase, les décideurs expriment leur préférences entre les critères par la pondération ou le poids relatif qu'ils attribuent à chaque critère. Le poids exprime donc l'importance accordée par un décideur à un critère [100].

## 2.2.6 Les algorithmes de pondération

Il existe différentes méthodes de pondération qui permettent de calculer le poids de chaque critère. Ces méthodes peuvent être classées en deux catégories. La première catégorie représente les méthodes de pondération subjective. La détermination subjective des poids conduit à plusieurs jeux de poids qui reflètent des échelles de valeurs différentes et des opinions qui peuvent être divergentes. Parmi les méthodes de cette catégorie, nous citons AHP, ANP, AHP floue, ANP floue, la logique floue et les moindres carrés.

La deuxième catégorie représente la pondération objective dans laquelle les décideurs n'interviennent pas pour attribuer des poids. Le degré d'importance de chaque critère est calculé selon les mesures numériques de l'ensemble des critères. Cette catégorie contient des méthodes telles que l'entropie, la pondération aléatoire et les algorithmes génétiques.

Cette section sera consacrée à la description des deux méthodes de pondération AHP et ANP. Pour chaque méthode, nous présentons son principe de fonctionnement, l'état de l'art relatif à la sélection du réseau, les critiques ainsi que son extension basée sur la logique floue. Nous signalons que les autres méthodes de pondération telles que la logique floue [64], l'algorithme génétique [6] et l'entropie [126] sont moins utilisées dans le contexte du handover par rapport aux méthodes MADM.

### 2.6.1 La méthode AHP

#### 2.6.1.1 Fondements de la méthode

Le processus d'analyse hiérarchique (Analytic Hierarchy Process : AHP) a été développé par Saaty [117] dans les années 1980. Cette méthode consiste à représenter un problème de décision par une structure hiérarchique reflétant les interactions entre les divers éléments du problème. Le principe de fonctionnement de la méthode AHP est défini par les six étapes suivantes :

1. Construire la structure hiérarchique : le problème est décomposé sous la forme d'une arborescence hiérarchique des critères, des sous critères et des alternatives. Au sommet de la hiérarchie, on trouve l'objectif, et dans les niveaux inférieurs, les éléments contribuant à atteindre cet objectif. Le dernier niveau est celui des actions. La figure 2.2 illustre cette structure hiérarchique de la méthode AHP.

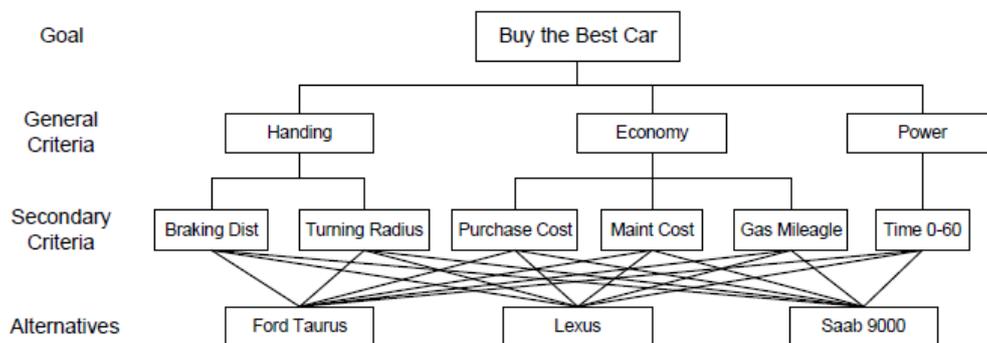


FIG. 2.2 – Structure hiérarchique de la méthode AHP [94]

2. Construire les matrices de décisions : cette étape consiste à procéder aux comparaisons par paires des éléments de chaque niveau hiérarchique par rapport à un élément du niveau hiérarchique supérieur. Cette étape permet de construire des matrices de comparaisons.

## CHAPITRE 2. LA SELECTION DU RESEAU BASEE SUR LES METHODES MADM : ETAT DE L'ART

---

Les valeurs de ces matrices sont obtenues par la transformation des jugements en valeurs numériques selon l'échelle de Saaty (Echelle de comparaisons binaires).

La forme générale d'une matrice de décision est exprimée par :

$$A = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & \dots & x_{nn} \end{pmatrix} \text{ avec } x_{ji} = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j; \\ \frac{1}{x_{ij}} & \text{si } i \neq j. \end{cases} \quad (2.12)$$

Les éléments  $x_{ij}$  sont obtenus à partir du tableau 2.2, qui contient les niveaux de préférences de 1-9.

TAB. 2.2 – Echelle à 9 valeurs de Saaty

Valeur numérique	Jugement verbal
1	Important égale
3	Modérément plus important
5	Fortement plus important
7	Très fortement plus important
9	Extrêmement plus important
2,4,6,8	Valeurs Intermédiaires entre deux jugements, utilisées pour affiner le jugement

3. Construire la matrice de décision normalisée : la matrice normalisée  $A_{norm}(a_{ij})$  est obtenue à partir de la matrice  $A(x_{ij})$ , selon la formule suivante :

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (2.13)$$

$$A_{norm} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

4. Déterminer l'importance relative à chaque élément : le poids de chaque facteur  $i$  peut être calculé par :

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n} \text{ et } \sum_{i=1}^n W_i = 1 \quad (2.15)$$

Où  $n$  représente le nombre des éléments comparés.

5. Vérifier la cohérence des jugements : pour tester la cohérence, Saaty [117] a introduit trois paramètres : le ratio de cohérence  $RC$ , l'indice aléatoire  $IA$  et l'indice de cohérence  $IC$ .

- On calcule d'abord, l'indice de cohérence  $IC$ .

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2.16)$$

- Aussi, nous avons besoin de calculer  $\lambda_{max}$  en utilisant la formule suivante :

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{n} \text{ sachant que } b_i = \frac{\sum_{j=1}^n W_j * a_{ij}}{W_i} \quad (2.17)$$

- On calcule le ratio de cohérence  $RC$  comme suit :

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (2.18)$$

Où  $IA$  est l'indice aléatoire obtenu à partir du tableau 2.3.

## 2.2.6 Les algorithmes de pondération

Selon Saaty [117], la valeur de ce dernier doit être au plus égale à 10%. Dans le cas où cette valeur dépasse 10%, les appréciations peuvent exiger certaines révisions, et la cohérence est dite non acceptée.

TAB. 2.3 – Valeur de l'indice aléatoire IA

Nombre de critères	3	4	5	6	7	8	9	10
IA	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

### 2.6.1.2 Contexte de sélection de réseau basée sur AHP

La méthode AHP est largement utilisée dans la littérature pour attribuer des poids à chaque critère dans la phase de la décision du handover. Cette méthode est combinée avec plusieurs algorithmes de classement des réseaux tels que la méthode TOSPSIS [123], [122], [126], la méthode GRA [135], [134], [59], [39], [97], la méthode SAW [127], [28], la fonction d'utilité [26], [112], la logique floue [164] et l'algorithme génétique [46].

D'autre part, il existe plusieurs travaux dans lesquels la méthode AHP est appliquée pour classer les réseaux accessibles au terminal mobile. Parmi ces travaux, nous citons [114], [130], [26] et [115].

### 2.6.1.3 Critiques

La méthode AHP est facile à mettre en oeuvre. Par ailleurs, elle a l'avantage de modéliser le problème de décision par une structure hiérarchique. De plus, elle utilise une échelle sémantique pour exprimer les préférences du décideur.

Toutefois, la méthode AHP a fait l'objet de plusieurs critiques :

- La méthode AHP exige la dépendance entre les éléments de même niveau hiérarchique ;
- Un grand nombre d'éléments dans le problème de décision fait augmenter le nombre de comparaisons par paires ;
- Le problème de renversement de rang ou ce qu'on appelle aussi anomalie du classement (deux actions peuvent voir leur ordre de priorité s'inverser suite à une modification (ajout ou suppression d'une ou de plusieurs actions) de l'ensemble des actions ;
- L'association d'une échelle numérique à l'échelle sémantique est restrictive, elle introduit des valeurs numériques imprécises ;
- Dans la majorité des situations, l'indice de cohérence IC dépasse 10%, ce qui nécessite la reconstruction de la matrice de préférences.

Afin d'écarter ces différentes limitations, la méthode AHP a fait l'objet de plusieurs extensions telles que la prise en compte de l'incertitude (AHP stochastique) et du flou (AHP flou) dans l'expression des jugements.

### 2.6.1.4 La méthode AHP floue (Fuzzy AHP : FAHP)

Bien que la méthode conversationnelle AHP soit largement utilisée pour pondérer les critères, elle est souvent critiquée pour son incapacité à gérer d'une manière efficace les préférences du décideur. En effet, les préférences associées à chaque critère sont exprimées sous

## CHAPITRE 2. LA SELECTION DU RESEAU BASEE SUR LES METHODES MADM : ETAT DE L'ART

---

forme linguistique [7] (voir le tableau 2.2). Par conséquent, le poids relatif à chaque critère sera représenté par une valeur numérique imprécise. A titre d'illustration, on considère l'exemple de pondération de deux critères C1 et C2 en utilisant la méthode classique AHP. La construction de la matrice de décision (eq (2.14)) est basée sur des expressions linguistiques (jugement verbal) du tableau 2.2. On suppose que le critère C1 est "modérément plus important" que C2, d'après le principe de la méthode AHP, la première ligne de la matrice décision contient les deux valeurs 1 et 3. Mais, à l'oeuvre de cette méthode, on rencontre deux problèmes. Le premier est que chaque jugement verbal représente une seule valeur numérique discrète. Le deuxième problème se manifeste par le fait que les valeurs existantes entre 1 et 3 ne sont pas clairement définies. Ces deux problèmes causent le manque de précision dans le calcul du degré d'importance de chaque critère.

La modélisation floue s'avère plus adéquate pour modéliser les jugements verbaux du tableau de Saaty. Pour cela, une extension floue de la méthode AHP, appelée AHP floue a été proposée dans la littérature [63]. La méthode floue AHP permet d'établir la matrice de préférences à partir des nombres réels flous. Le tableau 2.2 est transformé en tableau 2.4 qui contient les neuf jugements pour construire la matrice de décision floue. Dans ce ce nouveau tableau, chaque jugement verbal est exprimé à travers un nombre triangulaire flou (NTF). Ce nombre reflète le degré d'importance relatif à chaque facteur de décision. Un nombre flou triangulaire est noté généralement par  $\tilde{x} = (l, m, u)$ . Où le paramètre  $m$  est la valeur réelle la plus prometteuse qui maximise la fonction d'appartenance  $\mu(x)$ . Tandis que  $l$  et  $u$  représentent respectivement les bornes inférieures et supérieures qui limitent le champ de l'évaluation possible d'un facteur [90]. La fonction d'appartenance  $\mu(x)$  pour chaque NTF est définie dans l'équation (2.19) comme suit.

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{(x-l)}{(m-l)} & \text{si } x \in [l, m]; \\ \frac{(u-x)}{(u-m)} & \text{si } x \in [m, u]; \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (2.19)$$

Finalement, la préférence modérément plus importante entre le critère C1 et le critère C2 ne se traduit plus par le réel 3, mais par le nombre flou triangulaire  $\tilde{x}_{12} = (2, 3, 4)$ .

TAB. 2.4 – Les neuf nombres flous triangulaires (TFN) en utilisant la méthode AHP floue

Valeur numérique	Jugement verbal	TFN	TFN réciproque
1	Important égale	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
2	Valeur Intermédiaire	(1/2, 3/4, 1)	(1, 4/3, 2)
3	Modérément plus important	(2/3, 1, 3/2)	(2/3, 1, 3/2)
4	Valeur intermédiaire	(1, 3/2, 2)	(1/2, 2/3, 1)
5	Fortement plus important	(3/2, 2, 5/2)	(2/5, 1/2, 2/3)
6	Valeur intermédiaire	(2, 5/2, 3)	(1/3, 2/5, 1/2)
7	Très fortement plus important	(5/2, 3, 7/2)	(2/7, 1/3, 2/5)
8	Valeur intermédiaire	(3, 7/2, 4)	(1/4, 2/7, 1/3)
9	Extrêmement plus important	(7/2, 4, 9/2)	(2/9, 1/4, 2/7)

**Le principe de la méthode FAHP :** comme pour la méthode classique AHP, on commence par construire la matrice de jugement flou. L'unique différence réside dans le fait que la matrice  $\tilde{A}$  est construite avec des nombres flous qui sont fournis à travers des comparaisons par paire

## 2.2.6 Les algorithmes de pondération

entre les critères. La forme générale de la matrice de décision floue  $\tilde{A}$  est définie sous la forme suivante :

$$\tilde{A} = (\tilde{a}_{ij})_{n \times n} = \begin{pmatrix} (1, 1, 1) & (l_{12}, m_{12}, u_{12}) & \dots & \dots & (l_{1n}, m_{1n}, u_{1n}) \\ (l_{21}, m_{21}, u_{21}) & (1, 1, 1) & \dots & \dots & (l_{2n}, m_{2n}, u_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (l_{n1}, m_{n1}, u_{n1}) & (l_{n2}, m_{n2}, u_{n2}) & \dots & \dots & (1, 1, 1) \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

Avec  $\tilde{a}_{ij}$  est un nombre flou triangulaire et  $\tilde{a}_{ji} = [\tilde{a}_{ij}]^{-1} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})^{-1} = (\frac{1}{l_{ij}}, \frac{1}{m_{ij}}, \frac{1}{u_{ij}})$ . Plusieurs méthodes sont proposées pour calculer le poids final relatif à chaque critère. Parmi ces méthodes, l'intervalle synthétique flou (Fuzzy Extent Analysis) proposé par Chang (1996) [96] qui reste le plus utilisé. Pour chaque critère  $i$ , l'intervalle synthétique flou  $\tilde{S}_i$  se calcule selon la formule suivante :

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \oplus \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \right]^{-1} \quad (2.21)$$

Les opérations arithmétiques des  $n$  intervalles synthétiques flous telles que l'addition et l'inverse sont données respectivement par l'équation 2.22 et 2.23.

$$\sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} = \left( \sum_{j=1}^n l_{ij}, \sum_{j=1}^n m_{ij}, \sum_{j=1}^n u_{ij} \right) \quad (2.22)$$

$$\left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \right]^{-1} = \left[ \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ij}} \right] \quad (2.23)$$

Le degré de possibilité  $V$  ( $V$  nombre réel) qu'un nombre flou  $\tilde{S}_1$  soit supérieur à un nombre flou  $\tilde{S}_2$  est défini par :

$$V(\tilde{S}_1 \geq \tilde{S}_2) = SUP_{x \geq y} [\min(\tilde{S}_1(x), \tilde{S}_2(y))] \quad (2.24)$$

L'expression de l'équation 2.24 peut être écrite aussi de la manière suivante :

$$V(\tilde{S}_1 \geq \tilde{S}_2) = \begin{cases} 1 & \text{si } m_1 \geq m_2; \\ 0 & \text{si } l_2 \geq u_1; \\ \frac{(l_2 - u_1)}{(m_1 - u_1) - (m_2 - l_2)} & \text{sinon.} \end{cases} \quad (2.25)$$

Pour comparer  $\tilde{S}_1$  et  $\tilde{S}_2$ , les deux valeurs de  $V(\tilde{S}_1 \geq \tilde{S}_2)$  et  $V(\tilde{S}_2 \geq \tilde{S}_1)$  sont nécessaires.

Le degré de possibilité qu'un nombre flou  $\tilde{S}$  soit supérieur à  $K$  nombre flou  $\tilde{S}_i (i = 1, 2, \dots, k)$  est défini par :

$$V(\tilde{S} \geq \tilde{S}_1, \tilde{S}_2, \dots, \tilde{S}_k) = V[(\tilde{S} \geq \tilde{S}_1) \text{ and } \dots \text{ and } (\tilde{S} \geq \tilde{S}_k)] = \min V(\tilde{S} \geq \tilde{S}_i), \quad (2.26)$$

avec  $i = 1, 2, 3, \dots, k$

Ce degré de possibilité permet de connaître l'importance d'un critère  $i$  vis-à-vis de l'ensemble des critères. Le poids  $d'_i$  du critère  $i$  est alors donné par :  $d'_i = \min V(\tilde{S}_i \geq \tilde{S}_k)$  et le vecteur de poids est donné par  $w' = [d'_1, d'_2, \dots, d'_n]^T$ .

Finalement, après la phase de la normalisation, le vecteur de poids normalisé est donné par :

$$W = [d_1, d_2, \dots, d_n]^T \text{ avec } d_i = \frac{d'_i}{\sum_{j=1}^n d'_j} \quad (2.27)$$

**Contexte de sélection de réseau basée sur FAHP** : Malgré l'efficacité de l'approche floue AHP, elle est moins utilisée que la méthode AHP dans le contexte de la sélection de réseau. Les travaux existants dans la littérature qui se basent sur cette approche sont cités en [32], [65] et [120].

**Critique** Similaire à l'approche AHP, la méthode floue AHP présente les mêmes limitations que AHP excepté qu'elle est capable de faire l'association d'une échelle numérique à celle sémantique d'une manière efficace.

## 2.6.2 La méthode ANP

### 2.6.2.1 Fondements de la méthode

Le processus d'analyse réseau (Analytic Network Process : ANP) est proposé par Saaty pour généraliser la méthode AHP [118]. En effet, la méthode AHP nécessite que les éléments de même niveau hiérarchique doivent être indépendants. Or, cette condition n'est pas toujours satisfaite dans un problème MADM. Pour cette raison, la méthode ANP intervient pour prendre en considération les deux types de dépendances : la dépendance intérieure et la dépendance extérieure. La dépendance intérieure représente la relation de corrélation entre les éléments du même niveau hiérarchique. La dépendance extérieure se réfère à la relation entre les éléments de niveaux hiérarchiques différents [119].

Cependant, le problème de décision basé sur la méthode ANP est une structure réseau reflétant les interactions entre les divers éléments de même niveau hiérarchique ou non. La procédure pour utiliser la méthode ANP peut être résumée de la manière suivante :

1. Construire le modèle : un problème est décomposé en réseau dans lequel les noeuds correspondent aux composants. Un composant permet de regrouper un ensemble d'éléments qui peuvent agir l'un sur l'autre. En outre, un composant peut agir sur un autre composant. Les relations qui reflètent les interactions entre les éléments qui appartiennent au même composant ou entre les composants eux mêmes, sont représentées par des arcs orientés. La figure 2.3 illustre cette structure réseau de la méthode AHP.

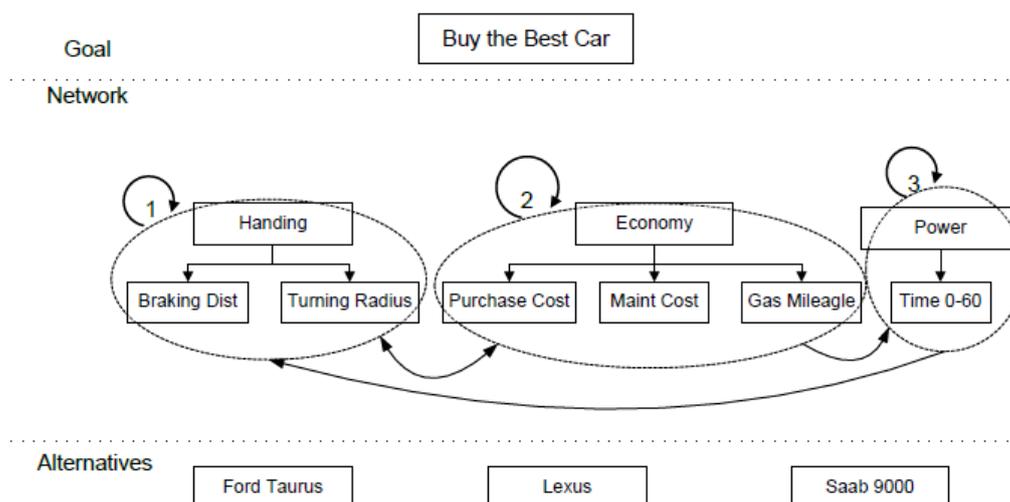


FIG. 2.3 – Structure réseau de la méthode ANP [94]

2. Construire les matrices de décisions : cette étape consiste à construire des matrices de comparaisons entre les composants et entre les éléments de chaque composant. La

manière de construction de ces matrices est identique à celle de la deuxième étape de la méthode AHP.

3. Contruire la matrice de décision normalisée : est identique à celle de la troisième étape de la méthode AHP.
4. Déterminer l'importance relative de chaque élément : on applique le même principe que la quatrième étape de l'approche AHP.
5. Vérifier la cohérence des jugements : on reprend la même procédure de la cinquième étape de la méthode AHP.
6. Construire la matrice de décision globale : cette matrice est appelée aussi super-matrice (super-matrix), elle permet de calculer les poids pour toutes les alternatives. La super-matrice est une matrice en blocs dont chaque élément représente une matrice d'interdépendance entre deux clusters ou entre les éléments du même cluster. L'équation 2.28 représente une super-matrice  $S$  d'un système composé de  $m$  clusters  $C_1, C_2, \dots, C_m$ . Chaque cluster  $C_k$  contient  $n_k$  éléments qui sont notés  $e_{k1}, e_{k2}, \dots, e_{kn_k}$ . La matrice bloc  $S_{ij}$  contient une colonne de poids prioritaires qui représente l'impact de l'ensemble des éléments dans le cluster  $C_i$  sur chacun des éléments du cluster  $C_j$ .

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & \dots & S_{1m} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & \dots & S_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots & \dots & S_{nm} \end{bmatrix} \text{ et } S_{ij} = \begin{bmatrix} e_{i_1(j_1)} & e_{i_1(j_2)} & \dots & \dots & e_{i_1(j_{n_j})} \\ e_{i_2(j_1)} & e_{i_2(j_2)} & \dots & \dots & e_{i_2(j_{n_j})} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{i_{n_i}(j_1)} & e_{i_{n_i}(j_2)} & \dots & \dots & e_{i_{n_i}(j_{n_j})} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

### 2.6.2.2 Contexte de sélection de réseau basée sur ANP

La plupart des approches proposées pour la sélection du réseau sont basées sur la méthode AHP dans la phase de pondération des paramètres. Peu de travaux utilisent la méthode ANP pour assigner des poids aux différents critères. Dans [72] et [94], les auteurs ont proposé un algorithme de la sélection réseau qui combine deux méthodes ANP et RTOPSIS. La méthode ANP est appliquée pour trouver les poids pour chaque critère. De plus, la méthode RTOPSIS [24] est aussi une méthode de la classe MADM qui représente une variante de la méthode classique TOPSIS. La méthode RTOPSIS permet de classer les alternatives réseaux. Son principe de fonctionnement est le même que TOPSIS. La seule différence entre les deux méthodes est que le calcul de la distance de similarité, donné par les deux équations 2.37 et 2.38 est modifié en utilisant une nouvelle équation définie comme suit :

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m \frac{(V_j^+ - v_{ij})^2}{w_j}} ; \quad i = 1, \dots, n, \quad (2.29)$$

et

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m \frac{(v_{ij} - V_j^-)^2}{w_j}} ; \quad i = 1, \dots, n. \quad (2.30)$$

### 2.6.2.3 Critiques

La méthode ANP a l'avantage de remédier au problème de la méthode AHP en tenant compte de la dépendance entre les éléments de même niveau hiérarchique. Par contre, elle présente les mêmes problèmes que la méthode AHP.

### 2.6.2.4 La méthode ANP floue (Fuzzy ANP)

Similaire à la méthode AHP, l'approche ANP fournit aussi des valeurs imprécises concernant les poids relatifs à chaque alternatif. Cette imprécision est due aux jugements du décideur sur les préférences entre les alternatifs réseaux. Pour éviter ce problème, la logique floue est combinée avec la méthode ANP pour élaborer une extension qu'on appelle ANP floue. Le principe du fonctionnement de la méthode ANP floue est identique à celle de la méthode AHP floue.

Jusqu'au moment de la rédaction de notre mémoire, il n'y a pas de travail qui repose sur la méthode floue ANP pour pondérer les critères dans le cadre de handover vertical. Le seul travail qui existe actuellement dans la littérature est celui que nous avons publié dans [79].

## 2.7 Les algorithmes de classement (ranking)

Cette section présente les différents algorithmes de classement qui peuvent être utilisés comme le noyau de la sélection de réseau. Nous avons discuté lors du premier chapitre que dans un environnement réseau sans fil hétérogène, l'utilisateur désire rester en connexion à tout moment et n'importe où. Afin de garantir la continuité et la qualité de service lors du transfert d'une communication, la conception et la modélisation d'une solution intelligente pour la décision de handover vertical est exigée. Cette solution permet aux utilisateurs de sélectionner le réseau optimal tout en assurant le principe ABC.

Plusieurs algorithmes, basés sur l'approche MADM comme SAW, MEW, TOPSIS, GRA, VIKOR, DIA, et ELECTRE ont été proposés pour résoudre le problème de la sélection du réseau. Ces algorithmes sont appliqués essentiellement pour classer les alternatives réseaux.

Dans le reste de cette section, nous présentons une description détaillée des principales étapes de chaque approche MADM telles que SAW, MEW, TOPSIS et GRA. En parallèle, nous présentons l'état de l'art des algorithmes de handover vertical qui sont basés sur ces quatre méthodes MADM.

### 2.7.1 TOPSIS

#### 2.7.1.1 Fondements de la méthode

TOPSIS est l'une des méthodes classiques de résolution de certains problèmes de décision multiattributs MADM, proposée pour la première fois par Hwang et Yoon en 1981 [53]. Son principe consiste à choisir une solution qui se rapproche le plus de la solution idéale et de s'éloigner le plus possible de la solution pire. La solution idéale correspond à une alternative dont les valeurs de performances de chaque critère sont les meilleures par rapport à n'importe quelle autre alternative. Par contre, la pire des solutions représente une alternative dont les critères détiennent les pires valeurs de performances.

En effet, la méthode calcule la distance euclidienne entre chaque alternative et les deux solutions l'idéale et la pire. La solution choisie par TOPSIS doit avoir la distance la plus courte de la solution idéale et la distance la plus longue de la solution pire [159]. Les étapes de la méthode TOPSIS se présentent comme suit :

1. Construire la matrice de décision : dans cette étape, la construction de la matrice de décision se fait de la même façon que l'équation 2.1.

## 2.2.7 Les algorithmes de classement (ranking)

2. Normaliser la matrice de décision : chaque élément  $r_{ij}$  est calculé en utilisant la normalisation euclidienne [20] comme suit :

$$r_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_{ij}^2}}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m. \quad (2.31)$$

3. Pondérer la matrice de décision normalisée : le calcul de la matrice pondérée se base sur l'équation 2.4.

4. Déterminer la solution idéale positive  $A^+$  et la solution idéale négative  $A^-$  :

$$A^+ = [V_1^+, \dots, V_m^+] \text{ et } A^- = [V_1^-, \dots, V_m^-], \quad (2.32)$$

- Pour un critère de bénéfice :

$$V_i^+ = \max\{v_{ij}, j = 1, \dots, n\} \quad (2.33)$$

$$V_i^- = \min\{v_{ij}, j = 1, \dots, n\} \quad (2.34)$$

- Pour un critère de coût :

$$V_i^+ = \min\{v_{ij}, j = 1, \dots, n\} \quad (2.35)$$

$$V_i^- = \max\{v_{ij}, j = 1, \dots, n\} \quad (2.36)$$

5. Calculer la distance de similarité : cette étape consiste à calculer les distances entre chaque alternative et  $A^+$  et  $A^-$ . Les distances sont calculées comme suit :

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (V_j^+ - v_{ij})^2}; i = 1, \dots, n, \quad (2.37)$$

et

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - V_j^-)^2}; i = 1, \dots, n. \quad (2.38)$$

6. Calculer le coefficient de mesure du rapprochement au profil idéal :

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{(S_i^+ + S_i^-)}; i = 1, \dots, n. \quad (2.39)$$

7. Classement : cette étape consiste à ranger les alternatives en fonction des valeurs décroissantes de  $C_i^*$ .

### 2.7.1.2 Sélection de réseau basée sur TOPSIS

L'une des raisons de la popularité de la méthode TOPSIS, dans le contexte de la sélection du réseau, est qu'elle nécessite un nombre limité de critères subjectifs de la part du décideur. Effectivement, la subjectivité des critères se manifeste à travers des poids attribués par les décideurs. Dans ce cadre de nombreuses stratégies de handover basées sur cette méthode ont été proposées dans la littérature [123], [122], [126] et [31].

La même stratégie de la sélection du réseau a été fournie par les auteurs Aggeliki et al. dans [123] et [122]. Elle est basée sur la méthode TOPSIS qui est introduite pour classer les réseaux disponibles. De plus, dans cette stratégie, la méthode AHP est utilisée pour attribuer des poids aux critères. La différence entre ces deux travaux réside uniquement dans la partie simulation pour évaluer la performance de la méthode TOPSIS. Dans [123], l'environnement de simulation contient trois technologies WLAN, UMTS et WIFI. En plus, les critères de la sélection utilisés sont : le débit, le délai, la gigue, la perte, le coût et la sécurité. Par contre, dans [122], l'environnement hétérogène contient deux technologies WIFI et WIMAX. Pour les critères considérés, on trouve la bande passante, le délai, la gigue et le coût de service.

## CHAPITRE 2. LA SELECTION DU RESEAU BASEE SUR LES METHODES MADM : ETAT DE L'ART

La stratégie proposée présente deux limitations. L'évaluation de la performance de la méthode TOPSIS se focalise uniquement sur un paramètre : le choix du réseau cible. La deuxième limitation est l'absence d'une comparaison de la stratégie basée sur la méthode TOPSIS avec d'autres algorithmes de handover.

Dans [126], une nouvelle stratégie de la sélection du réseau appelée SEA-TOPSIS a été proposée. La SEA-TOPSIS, comme son nom l'indique, combine quatre techniques : la puissance du signal (SINR), la technique entropie pour pondérer les critères, la méthode AHP pour attribuer des poids aux critères et finalement la technique TOPSIS pour classer les alternatives réseaux. Cette dernière technique est considérée comme le noyau de la stratégie SEA-TOPSIS. La matrice de décision exploitée par la méthode TOPSIS contient quatre paramètres : la bande passante exigée par l'utilisateur, la bande passante disponible, le coût de service et la puissance du signal.

L'évaluation des performances de cette stratégie est basée sur la simulation de quatre types de trafic : arrière-plan, conversationnel, interactif, et streaming. Les résultats des simulations montrent que la stratégie SEA-TOPSIS permet de fournir de meilleures performances selon les caractéristiques de chaque type de trafic.

Dans [31], les auteurs Souvar et al. ont proposé une nouvelle architecture pour le moteur de décision du handover vertical dans le cas des communications véhiculaires. Dans ce moteur de décision, l'algorithme TOPSIS est un composant important qui permet de déterminer le réseau optimal parmi trois réseaux disponibles UMTS, WLAN et WIAMX. L'architecture fonctionnelle de ce moteur est présentée dans la figure 2.4.

La performance de l'architecture proposée a été évaluée pour deux types de trafic : conversationnel et streaming en se basant sur les facteurs suivants : la charge du trafic réseau, la vitesse de la station mobile, le débit, le coût de service et le délai initial. Les résultats des simulations montrent que l'architecture proposée est très simple et nécessite un temps d'exécution plus court que celui requis par les algorithmes de handover existants.

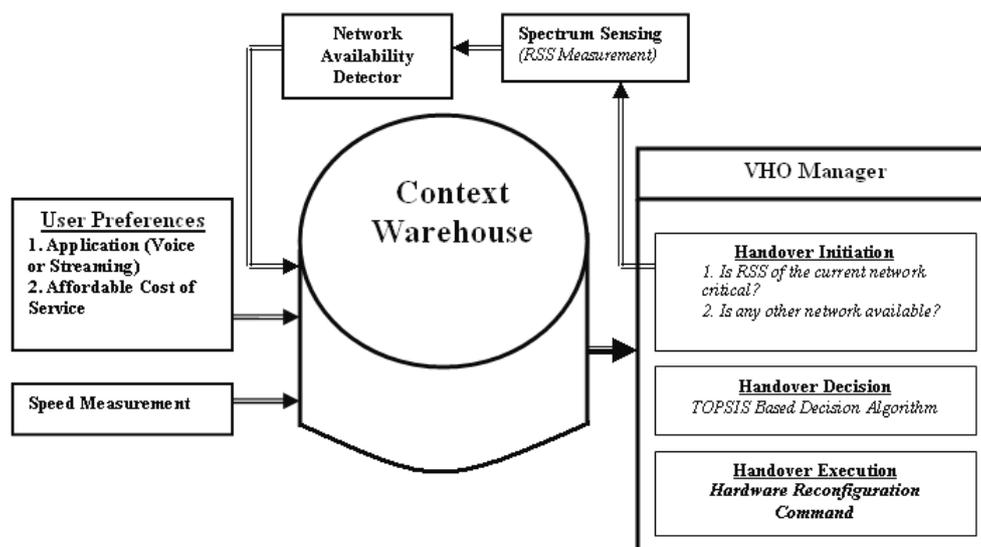


FIG. 2.4 – Architecture fonctionnelle pour Moteur VHO [31]

### 2.7.1.3 Critiques

La méthode TOPSIS permet d'ordonner les actions. Son grand apport est l'introduction des notions d'idéal et d'anti idéal. De plus, elle est facile à appliquer. Toutefois, certaines limites caractérisent cette méthode à savoir :

- Les attributs doivent être de nature cardinale ;
- Le nombre de handovers est élevé ;
- Les handovers inutiles sont élevés ;
- L'anomalie du classement (Rank Reversal) : c'est un phénomène qui caractérise la majorité des méthodes MADM. Plus particulièrement, il présente l'inconvénient majeur de la méthode TOPSIS. Cette anomalie signifie que l'ordre du classement n'est pas stable, il peut changer. Ce changement se produit lorsque de nouvelles alternatives (respectivement des critères) sont ajoutées ou supprimées. Ce phénomène est susceptible d'influencer l'efficacité de l'algorithme de décision dans le contexte du handover vertical. Un exemple qui illustre cette anomalie est donné par la suite.

**Exemple de l'anomalie du classement** : on considère le contexte de la sélection de réseau contenant quatre réseaux : #1, #2, #3 et #4 ainsi que quatre attributs : débit, coût, perte et délai. On attribue la même valeur de poids 1 à chaque critère. Les attributs et leur valeurs normalisées utilisées sont présentés dans le tableau 2.5.

TAB. 2.5 – La décision de sélection du réseau basée sur TOPSIS : itération 1

Réseau	$C_j^*$	Débit		Coût		Perte		Délai	
		Mbps	norm	Dh/MB	norm	per10 <sup>6</sup>	norm	ms	norm
#1	0.0991	3	0.4082	80	0.9562	100	0.9044	250	0.6804
#2	0.7631	4	0.5443	20	0.2390	20	0.1809	200	0.5443
#3	0.7473	2	0.2722	10	0.1195	15	0.1357	100	0.2722
#4	0.8081	5	0.6804	10	0.1195	40	0.3618	150	0.4082

L'ordre de classement de ces quatre alternatives est déterminé en calculant le coefficient de mesure du rapprochement  $C_i^*$  (défini par l'équation 2.39). Dans cet exemple, les deux réseaux #1 et #4 représentent respectivement la mauvaise solution et la meilleure solution.

Maintenant, on suppose que l'alternative du réseau de plus petit score #1 ait été enlevé de la liste des candidats (le réseau est déconnecté). La tableau 2.6 présente les nouvelles valeurs normalisées des attributs ainsi que le nouveau score obtenu pour chaque alternative. On remarque que l'ordre de classement des réseaux a été changé. Le réseau #3 devient la meilleure solution et #2 devient la mauvaise solution. Donc, on conclut qu'après la suppression de l'alternative #1 le meilleur réseau à été changé de #4 à #3, tandis que les valeurs des attributs ne sont pas changées.

TAB. 2.6 – La décision de sélection du réseau basée sur TOPSIS : itération 2

Réseau	$C_j^*$	Débit		Coût		Perte		Délai	
		Mbps	norm	Dh/MB	norm	per10 <sup>6</sup>	norm	ms	norm
#2	0.4713	4	0.5963	20	0.8165	20	0.4240	200	0.7428
#3	0.6311	2	0.2981	10	0.4082	15	0.3180	100	0.3714
#4	0.5300	5	0.7454	10	0.4082	40	0.8480	150	0.5571

## 2.7.2 GRA

### 2.7.2.1 Fondements de la méthode

La méthode d'analyse relationnelle Grey (Grey Relational Analysis : GRA) est aussi une stratégie de la classe MADM [173], qui repose sur la théorie du système Grey [29]. La mesure de performance d'un critère dans ce système est définie par un nombre de Grey. Ce dernier est caractérisé par l'absence d'une valeur exacte pour la mesure, mais l'intervalle des valeurs possibles est connu.

La méthode GRA consiste à calculer la distance de similarité GRC de chacune des alternatives à la meilleure solution et de choisir la solution qui se rapproche de la meilleure alternative. Les étapes de cette méthode se résument comme suit :

1. Construire la matrice de décision : on reprend la même étape de l'équation 2.1.
2. Normaliser la matrice de décision : chaque élément  $r_{ij}$  est calculé par la technique de normalisation par le maximum [19] comme suit :
  - Pour un critère de bénéfice, la valeur de  $r_{ij}$  est calculée par :

$$r_{ij} = \frac{d_{ij}}{d_j^{max}}, \text{ avec } i = \{1, \dots, n\}, j = \{1, \dots, m\} \quad (2.40)$$

Où  $d_j^{max}$  correspond à la valeur de la performance maximale de l'attribut  $C_j$  parmi toutes les alternatives et  $d_{ij}$  représente la valeur actuelle de cet attribut.

- Pour un critère de coût, la valeur de  $r_{ij}$  est calculée par :

$$r_{ij} = 1 - \frac{d_{ij}}{d_j^{max}}, \text{ avec } i = \{1, \dots, n\}, j = \{1, \dots, m\}. \quad (2.41)$$

Où  $d_j^{max}$  correspond à la valeur de la performance minimale de l'attribut  $C_j$  parmi toutes les alternatives et  $d_{ij}$  représente la valeur actuelle de cet attribut.

3. Pondérer la matrice de décision normalisée : dans cette étape, on applique le même principe que l'équation 2.4
4. Déterminer la solution idéale  $R^*$  :

$$R^* = [R_1^*, \dots, R_m^*] \quad (2.42)$$

- Pour un critère de bénéfice :

$$R_i^* = \max\{v_{ij}, j = 1, \dots, m\} \quad (2.43)$$

- Pour un critère de coût :

$$R_i^* = \min\{v_{ij}, j = 1, \dots, m\} \quad (2.44)$$

5. Calculer le coefficient rationnel de grey (GRC) : ce coefficient décrit la distance de similarité de chacune des alternatives à la solution idéale. La valeur du coefficient GRC est définie comme suit :

$$GRC_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^m |v_{ij} - R_j^*| + 1} ; i = 1, \dots, n. \quad (2.45)$$

6. Ranger les alternatives : les alternatives sont ordonnées en fonction des valeurs décroissantes de  $GRC_i$ .

### 2.7.2.2 Sélection de réseau basée sur GRA

Dans la littérature, il existe plusieurs travaux consacrés à la sélection du réseau en utilisant la méthode GRA [135], [134], [162], [42], [59], [39] et [97].

Les auteurs Quingyan et al. [135] [134], ont proposé un nouveau modèle pour résoudre le

## 2.2.7 Les algorithmes de classement (ranking)

problème de la sélection du réseau. Ce modèle combine les deux approches AHP et GRA. La méthode AHP se charge de l'évaluation des préférences d'utilisateur et aussi des paramètres de QoS. La méthode GRA est utilisée pour classer les deux réseaux UMTS et WLAN.

Le modèle de la sélection réseau contient trois composants : l'unité de collection, l'unité de traitement et l'unité de décision. Le schéma de ce modèle est illustré par la figure 2.6. Pour le fonctionnement de ce modèle, lorsque le terminal mobile détecte un réseau disponible, l'unité de collection intervient pour estimer les valeurs numériques concernant la performance du réseau, la classe de service et les préférences de l'utilisateur. Le terminal mobile est supposé toujours sous la couverture du réseau UMTS. La détection du réseau WLAN se produit quand la puissance du signal reçu (RSS), par le terminal mobile, du réseau WLAN devient supérieure au seuil du RSS (par exemple  $-80$  dBm). Ensuite, l'unité de traitement permet de calculer la valeur de GRC de deux réseaux UMTS et WLAN. Finalement, l'unité de décision permet de choisir le réseau qui possède la plus grande valeur de GRC comme le réseau le plus souhaitable pour le terminal mobile. Dans le cas où la puissance du signal RSS reçu par le terminal mobile du réseau WLAN est inférieure au seuil du RSS, le terminal mobile continue sa communication dans le réseau UMTS. Pour cette raison, les valeurs de GRC attribuées aux WLAN et UMTS sont respectivement 0 et 1.

Dans [162], les auteurs ont utilisé le même modèle proposé dans [135] pour pallier au problème du handover entre le réseau WIMAX et le réseau TD-SCDMA. Ce dernier est une norme de communication similaire à la technologie UMTS développée en Chine.

Les auteurs Godor et Detari [42] ont défini un mécanisme de la sélection du réseau similaire au modèle proposé dans [135]. Ce mécanisme est décomposé aussi en trois blocs fonctionnels : la collection de données, le traitement de données et la prise de décision. Les critères de handover utilisés sont regroupés en trois catégories distinctes : les caractéristiques des services, les profils utilisateurs, les caractéristiques de réseau. Les profils utilisateurs contiennent les exigences du service en terme de QoS, le coût monétaire et le débit. Les caractéristiques des services contiennent les classes de la qualité de service qui peuvent être fournies aux utilisateurs, le niveau minimum de ressources nécessaires pour chaque service, et les exigences de service en terme de délai, perte, etc. Les caractéristiques de réseau représentent les paramètres de QoS liés au réseau tels que : le débit, la gigue, la perte, et le délai. D'une part, la méthode GRA est un composant important de ce mécanisme. Elle permet de déterminer le meilleur réseau disponible dans un environnement hétérogène qui contient deux réseaux GSM, deux réseaux UMTS, un réseau WIMAX et un réseau WLAN. D'autre part, la méthode AHP est introduite aussi pour pondérer les différents critères.

D'autres solutions de la sélection réseau ont été inspirées du modèle défini dans [135] sont présentées dans [59], [39] et [97]. Ces solutions sont basées aussi sur la méthode GRA et AHP. La seule différence entre elles réside dans le fait que chaque solution utilise son propre environnement de simulation avec des critères différents. Dans [59] l'environnement de simulation contient trois technologies réseaux 3G (TD-SCDMA), WLAN et 4G. Les paramètres considérés dans la simulation sont : le coût, la bande passante totale, la bande passante disponible, le taux d'utilisation, le délai, la gigue, et la perte. De plus, dans [39] l'environnement de simulation contient trois technologies réseaux CDMA, WiBro et WLAN. Les critères de la simulation sont : les quatre paramètres de QoS débit, délai, gigue et la gigue et trois paramètres relatifs à la consommation d'énergie : Tx, Rx et Idle. Enfin, dans [97] l'environnement de simulation contient deux réseaux GPRS et WLAN. Les paramètres considérés dans la simulation sont le délai, la gigue, la perte et le débit.

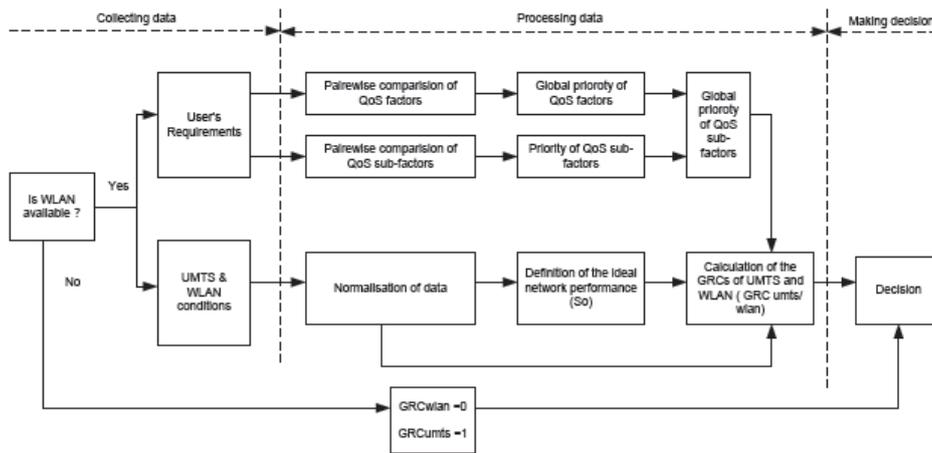


FIG. 2.5 – Le modèle de la sélection réseau basé sur GRA et AHP [135]

### 2.7.2.3 Critiques

La méthode GRA possède les mêmes avantages et les mêmes limites que la méthode TOPSIS. En plus, cette méthode présente un manque de précision dans l'identification du classement des alternatives. La précision est définie par la différence entre des valeurs de classement. Si cette différence est grande, elle permet d'identifier facilement l'ordre de classement et de sélectionner facilement la meilleure alternative.

## 2.7.3 La méthode SAW

### 2.7.3.1 Fondements de la méthode

L'approche somme pondérée (Simple Additive Weighting : SAW) est une méthode multiattributs [168] caractérisée par la simplicité de son principe et de son application. Cette simplicité explique le nombre important de travaux scientifiques où la méthode SAW a été appliquée avec succès. Cette méthode est basée sur une agrégation additive des critères par sommation pondérée. La méthode SAW se présente comme suit :

1. Construire la matrice de décision : on reprend la même étape de l'équation 2.1 ;
2. Normaliser la matrice de décision : on reprend la même étape de l'équation 2.40 et 2.41 ;
3. Pondérer la matrice de décision normalisée : où on applique le même principe que l'équation 2.4 ;
4. Calculer le score global pour chaque alternative  $A_i$  comme suit :

$$S_i = \sum_{j=1}^m v_{ij} \text{ avec } i = 1, \dots, n \quad (2.46)$$

5. Choisir la meilleure alternative : le choix de la meilleure solution est défini par la formule suivante :

$$SAW^* = \max_{i=1}^n S_i \quad (2.47)$$

### 2.7.3.2 Sélection de réseau basée sur SAW

Dans le contexte de la sélection du réseau, la méthode SAW est largement utilisée pour classer les alternatives réseaux, grâce à sa simplicité et sa facilité d'implémentation [147], [145], [146], [144] et [127]. Cette méthode intervient dans plusieurs travaux de recherche consacrés à l'évaluation et l'analyse des performances des algorithmes de handover [149], [157], [92] et [34].

Tawil et al. [147] [145] [146] ont proposé une nouvelle stratégie distribuée de la décision de handover basée sur une fonction d'estimation de QoS. La méthode SAW représente le noyau de cette fonction d'estimation. Les critères de sélection considérés par la méthode SAW sont les paramètres de QoS, le coût de service, la sécurité et la consommation d'énergie.

La stratégie de handover proposée permet de distribuer la prise de décision entre le terminal mobile et tous ses réseaux accessibles. Chaque réseau calcule sa propre valeur concernant la fonction d'estimation de QoS. Le terminal mobile choisit le réseau qui offre la plus grande valeur de QoS comme réseau cible. Pour l'évaluation de performance de cette stratégie par rapport à l'implémentation centralisée de handover, les résultats des simulations montrent que cette stratégie permet de maximiser la bande passante et de réduire le temps de latence et l'effet de "ping pong".

Pour assurer un "seamless handover", sans coupure, les auteurs Tawil et al. [144] ont défini un algorithme tiers appelé TDVHD (Trusted Vertical HO Decision algorithm). Le TDVHD est une extension de la stratégie distribuée de handover proposée par les mêmes auteurs dans les références [147], [145] et [146]. La méthode SAW est appliquée d'une manière distribuée pour calculer la valeur de la qualité de service de chaque réseau (NVQ). Les paramètres considérés pour calculer la valeur de NVQ sont : le temps de latence et le coût monétaire. Ensuite, pour éviter l'effet de ping-pong, le mécanisme tiers est appliqué comme l'indique la figure 2.6. Lorsque le terminal mobile reçoit la valeur NVQ de chaque réseau, il le compare avec son niveau de tiers (LOT) pour décider d'exécuter le handover.

Une autre stratégie de la décision de handover appelée SASAW [127] est définie par les auteurs Sheng-mei et al. Cette stratégie combine l'effet SINR et la bande passante requise par l'utilisateur, le coût de service et la bande passante disponible pour construire la matrice de décision. La méthode AHP est introduite dans SASAW pour calculer le poids de chaque critère, tandis que la méthode SAW, qui représente le noyau de cette stratégie, permet de classer les alternatives réseaux. Les résultats de simulation montrent que la stratégie SASAW permet de garantir de meilleures performances par rapport aux deux algorithmes similaires.

Enfin, les auteurs Filho et al. [28] ont proposé un nouveau mécanisme pour la décision de handover basé sur la méthode SAW. L'implémentation de ce mécanisme a été faite en utilisant la norme IEEE 802.21. L'environnement de simulation considéré pour évaluer la performance de ce mécanisme est un environnement hétérogène qui contient trois réseaux, WIFI, WIMAX, et un réseau cellulaire. Les critères de sélection utilisés dans chaque réseau sont la bande passante et le coût de service. La méthode SAW exploite ces deux critères pour déterminer la meilleure interface réseau disponible. Dans le but de valider le mécanisme de handover proposé, les auteurs ont comparé la performance de cette solution à une solution ordinaire de handover basée sur la priorité de réseau [101]. Les résultats de l'expérimentation prouvent que le mécanisme proposé assure un meilleur partage de charge entre les réseaux disponibles.

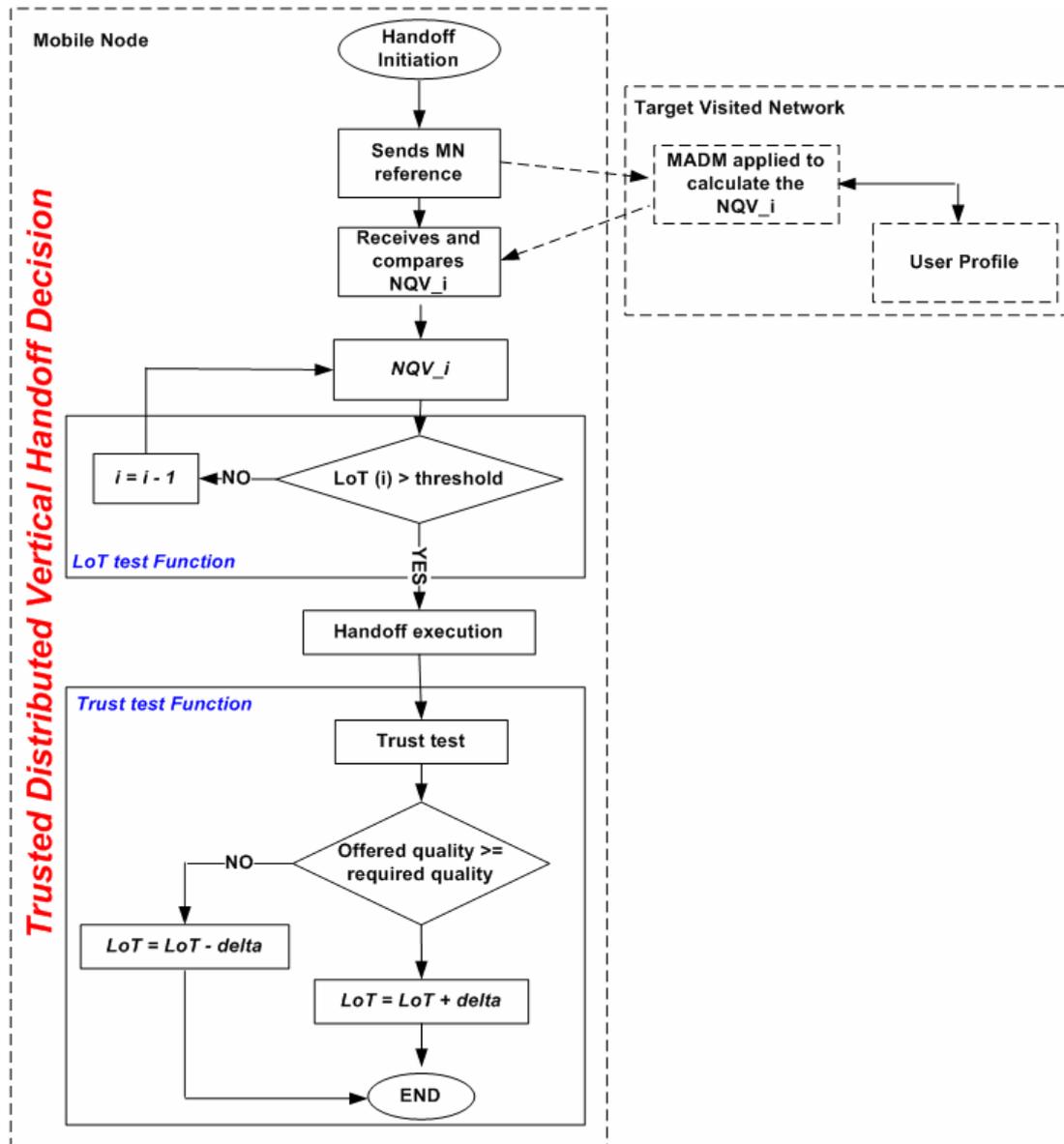


FIG. 2.6 – Le schéma de TDVHD [144]

### 2.7.3.3 Critiques

Bien que la méthode SAW soit la plus simple à mettre en oeuvre parmi toutes les méthodes MADM existantes, elle présente plusieurs inconvénients. Ces derniers sont divisés en deux catégories : la première catégorie représente les limites communes à toutes les méthodes MADM. Dans ce cadre, la méthode SAW possède les mêmes inconvénients que la méthode GRA. La deuxième catégorie contient des inconvénients propres à la méthode SAW. La compensation des mauvais critères par les critères performants est l'inconvénient majeur de cette deuxième catégorie. Cette compensation permet de masquer les faiblesses d'un critère, ce qui peut avoir des conséquences néfastes dans la phase de décision. Par exemple dans le cas du problème de handover vertical, la méthode somme pondérée peut choisir un réseau qui ne répond pas aux exigences d'utilisateur en terme de qualité de service. Prenons un exemple pour illustrer ce fait. On considère le problème de sélection de réseau, qui contient deux alternatives : réseau-1 et réseau-2 et trois critères : la bande passante disponible,

## 2.2.7 Les algorithmes de classement (ranking)

le coût et le taux d'utilisation. On attribue la même valeur de poids 1 aux trois critères. Le tableau 2.7 ci-dessous contient les caractéristiques des deux alternatives envisagées.

TAB. 2.7 – Tableau d'évaluation relatif au problème de sélection réseau

Actions Critères	Coût	Bande passante	Taux d'utilisation
réseau-1	10	30	100
réseau-2	14	25	70

On applique la méthode somme pondérée pour classer les deux réseaux. Le résultat obtenu est présenté dans le tableau 2.8. On remarque que la méthode somme pondérée sélectionne le réseau-1 comme la meilleure interface réseau. Or, le réseau-1 ne représente pas le bon choix vu qu'il n'y a plus des ressources disponibles dans ce réseau. le taux d'utilisation 100% signifie que tous les appels seront rejetés.

TAB. 2.8 – Matrice d'évaluation des réseaux basée sur la méthode SAW

Actions Critères	Coût	Bande passante	Taux d'utilisation	Somme pondérée
réseau-1	1	1	0.7	2.7
réseau-2	0.714	0.833	1	2.5

## 2.7.4 La méthode MEW

### 2.7.4.1 Fondements de la méthode

La méthode produit pondéré (Multiplicative Exponent Weighting MEW) est une méthode de la famille MADM [168], similaire à la méthode SAW. La différence majeure entre les deux méthodes MEW et SAW est que l'opérateur de multiplication est utilisé au lieu de l'addition pour l'agrégation des paramètres. La méthode MEW se présente en cinq étapes comme suit :

1. Construire la matrice de décision : on reprend la même étape de l'équation 2.1.
2. Normaliser la matrice de décision : on reprend la même étape de l'équation 2.40 et 2.41
3. Pondérer la matrice de décision normalisée : le calcul de la matrice pondérée  $V(v_{ij})$  est obtenu en appliquant la formule suivante :

$$v_{ij} = r_{ij}^{W_j} \text{ avec } \sum_{j=1}^m W_j = 1 \quad (2.48)$$

4. Calculer le score global pour chaque alternative  $A_i$  comme suit :

$$P_i = \prod_{j=1}^m v_{ij} \text{ avec } i = 1, \dots, n \quad (2.49)$$

5. Déterminer la meilleure alternative : le choix de la meilleure solution est défini par l'équation suivante :

$$MEW^* = \max_{i=1}^n P_i \quad (2.50)$$

### 2.7.4.2 Sélection de réseau basée sur MEW

Parmi les nombreuses méthodes MADM proposées dans la littérature, la méthode MEW est probablement la moins utilisée comme noyau des stratégies consacrées à l'optimisation et l'amélioration du processus du handover vertical [128] [165]. En revanche, cette méthode est largement utilisée dans la majorité des travaux relatifs à la comparaison et à l'évaluation des performances des algorithmes MADM [149], [157], [92] et [34].

Les auteurs Liu shengmei et al. [128] ont proposé un algorithme de la décision de handover vertical appelé SLE-MEW. La puissance de signal (SINR) est considérée comme étant un critère important dans cet algorithme. Ce paramètre est combiné avec le coût de service et la bande passante disponible pour construire la matrice de décision. De plus, l'approche SLE-MEW introduit deux méthodes de pondération les moindres carrés (least square :LS) et l'entropie. La méthode des moindres carrés permet la détermination subjective des poids relatifs à chaque critère. Tandis que la méthode entropie permet de pondérer les critères d'une manière objective. Finalement, la méthode MEW utilise la matrice de décision et les vecteurs de poids pour déterminer le meilleur réseau en terme de QoS.

Quatre classes de trafic sont prises en compte dans l'évaluation des performances de l'algorithme SLE-MEW avec deux autres algorithmes CSVH [128] et MASVH [128]. Les résultats de la simulation ont montré que l'algorithme proposé permet de minimiser le coût, le nombre de handovers et la probabilité de suppression des appels et de maximiser le débit par rapport aux deux autres algorithmes CSVH et MASVH.

Les auteurs Yang et al. [165] ont proposé un algorithme de la décision de handover basé sur la norme IEEE 802.21, entre deux technologies différentes WIFI et WIMAX. L'algorithme utilise la méthode AHP pour calculer le poids de différents paramètres et utilise la méthode MEW pour calculer le score relatif à la qualité de service de chaque réseau. Trois classes de trafic sont considérées dans la simulation : la voix, la vidéo, le service en arrière plan. Pour chaque type de trafic, les auteurs ont utilisé quatre critères : le coût de service, la bande passante, le délai, le taux de perte et la gigue. Pour l'évaluation de performance, cet algorithme a été comparé à l'approche classique de décision qui se base uniquement sur la puissance de signal RSS. Les résultats des simulations montrent que l'algorithme de handover proposé permet d'améliorer le temps de latence et de réduire le taux de blocage d'un nouvel appel par rapport à l'approche classique RSS.

### 2.7.4.3 Critiques

La méthode MEW présente les mêmes avantages et inconvénients que la méthode SAW. Une autre critique peut porter sur cette méthode, c'est qu'elle pénalise les alternatives qui possèdent de mauvaises valeurs pour leurs attributs. Pour illustrer cet inconvénient, on reprend le même exemple donné dans le tableau 2.7. Le résultat du classement, lorsqu'on applique l'approche MEW, est donné dans le tableau 2.9.

TAB. 2.9 – Matrice d'évaluation des réseaux basée sur la méthode MEW

Actions Critères	Coût	Bande passante	Taux d'utilisation	Produit pondéré
réseau-1	1	1	0.7	0.700
réseau-2	0.714	0.833	1	0.595

Le tableau 2.9, montre que la méthode produit pondérée sélectionne le réseau-1 comme la

## 2.2.8 Evaluation des performances des algorithmes de handover basés sur l'approche MADM

meilleure interface réseau. Or, le réseau-1 ne représente pas le bon choix vu qu'il n'y a plus de ressources disponibles dans ce réseau. Le taux d'utilisation 100% signifie que tous les appels seront rejetés.

D'ailleurs, on remarque que l'approche MEW peut se mettre sous la forme SAW, il suffit pour cela de poser  $P'_i = \log(P_i)$ , on obtient alors :

$$P'_i = \sum_{j=1}^m \log(v_{ij}) \quad (2.51)$$

Où  $P_i$  est la valeur obtenue à partir de l'équation (2.49).

## 2.8 Evaluation des performances des algorithmes de handover basés sur l'approche MADM

### 2.8.1 Evaluation et comparaison des algorithmes MADM

Le problème de la sélection de réseau basé sur l'approche MADM est considéré comme un problème NP-complet [40] en raison des quatre facteurs suivants :

1. Diversité des algorithmes de classement qui peuvent être appliqués tels que : TOPSIS, GRA, SAW, etc ;
2. Diversité des algorithmes de pondération qu'on peut utiliser pour associer un degré d'importance pour chaque critère tels que AHP, ANP, AHP floue, etc ;
3. Plusieurs critères qui peuvent être considérés par l'algorithmes de décision de handover ;
4. Une multitude de techniques de normalisation qui peuvent être utilisées pour normaliser les critères.

Chaque combinaison de ces quatre facteurs représente une solution pour le problème du handover vertical. La question qui se pose par la suite est : quelle est la meilleure combinaison possible qu'il faille choisir en vue de résoudre le problème de la sélection du réseau ?. Afin de répondre à cette question, plusieurs modèles de simulation tels que [136] [17] [22] et [104] ont été proposés et développés. Ces modèles permettent de mieux comprendre l'implication de différents algorithmes de handover. Cependant, il n'y a aucun modèle qui implémente ces différentes stratégies du handover pour comparer leurs performances. Donc ces travaux de recherche ne permettent pas d'identifier la solution du handover qui peut être considérée favorable par rapport à une autre solution. L'évaluation de performances a été réalisée, soit avec des modèles analytiques, soit avec la simulation, soit sur des plate-formes de test.

La solution du problème a été fondée sur un ensemble des méthodologies d'évaluation classiques ou des modèles analytiques. Les méthodologies classiques [149], [157], [139] et [99] permettent de comparer la performance de différents algorithmes de handover en utilisant un simulateur ou une plateforme de test. Parmi les simulateurs existants, nous citons : NS-2, NS-3, OPNET, MATLAB, etc. Les plate-formes de test proposées dans la littérature sont Short Scale et Medium Scale. Les autres outils de simulation proposés dans le contexte du handover ainsi que leurs pourcentages d'utilisation, y compris les références de travaux qui ont utilisés chacun des outils sont présentés dans [14]. Les paramètres d'évaluation de handover qui peuvent être considérés sont détaillés dans le chapitre 1. D'autre part, les méthodologies analytiques [92] [35] [34] représentent des modèles mathématiques développés pour évaluer la performance des algorithmes.

Par ailleurs, l'évaluation de différentes stratégies de handover qui utilisent l'approche MADM ou autre stratégie, est devenue obligatoire pour identifier l'algorithme de la sélection du réseau optimal qui permet aux utilisateurs mobiles de choisir le meilleur réseau d'accès disponible. Dans ce cadre, Alexander et al. [35] présentent un aperçu sur l'ensemble des travaux qui sont publiés pour évaluer la performance de tous les algorithmes du handover vertical. Dans cette thèse, nous nous focalisons sur les travaux d'évaluation des performances de différents algorithmes de handover basés sur l'approche MADM.

Dans le but de mettre en oeuvre les limitations des algorithmes de handover basés sur MADM, les auteurs Phuoc et al. [149] ont présenté une comparaison de performances entre trois algorithmes TOPSIS, SAW et MEW. Selon cette étude, l'anomalie de classement est l'inconvénient majeur de la méthode TOPSIS. Les deux méthodes SAW et MEW montrent un manque de précision dans l'identification du classement des alternatives réseaux. Ce problème d'identification du classement peut être provoqué lorsque les valeurs des attributs de chaque alternative sont proches, et par la suite les scores globaux calculés par la méthode SAW ou MEW sont presque les mêmes.

Dans [157], les auteurs ont proposé des simulations extensives pour démontrer la faisabilité de l'approche MADM pour la modélisation de la sélection du réseau, ainsi que son résultat pertinent à propos de choix du réseau optimal. Différents scénarios de simulation sont proposés pour évaluer la performance de cinq algorithmes de handover qui sont SAW, MEW, TOPSIS, GRA et ELECTRE. Les types de trafics considérés pour chaque algorithme sont : arrière-plan, conversationnel, interactif et streaming. L'environnement de simulation contient quatre catégories de réseaux : WPAN, WLAN, WMAN et WWAN. Les résultats de simulations montrent que le meilleur réseau sélectionné par les deux algorithmes SAW et MEW correspond à un réseau dont la valeur de l'attribut est le minimum parmi tous les réseaux disponibles. Par contre, les deux méthodes TOPSIS et GRA permettent de déterminer le meilleur réseau caractérisé par un attribut dont la valeur est la plus grande entre toutes les alternatives. De plus, tous les algorithmes ne permettent pas de déterminer le même réseau optimal, mais généralement, ils sélectionnent un réseau raisonnable qui peut satisfaire les exigences de l'utilisateur.

Plus récemment, les auteurs Ismail et Byeong-hee [60] ont réalisé une étude de performance de cinq approches de handover qui sont TOPSIS, SAW, Maximin, ELECTRE et AHP. Ces approches sont couplées avec la logique floue pour éliminer l'ambiguïté causée par différents critères imprécis et pour les convertir en données précises.

Une autre comparaison de performances des différents algorithmes MADM a été proposée par les auteurs Stevens et al. dans différentes références [139], [99] et [138]. Dans la référence [139], l'analyse de la performance est basée sur l'évaluation de quatre types de trafics : arrière-plan, conversationnel, interactif et streaming pour chaque algorithme de handover. Les critères utilisés dans la simulation sont : le débit, le délai, la gigue et la perte. De plus, la méthode AHP est appliquée pour l'affectation de poids pour ces quatre critères. Les résultats d'évaluation ont montré que, d'une part les trois algorithmes SAW, MEW et TOPSIS fournissent les mêmes résultats pour l'ensemble de types de trafic. D'autre part, pour les deux types de services arrière-plan et interactif, la méthode GRA permet d'assurer une bande passante légèrement élevée et de minimiser le délai. Les résultats de simulation montrent aussi que les quatre algorithmes de handover dépendent de poids relatif à chaque critère.

Une autre analyse comparative de ces quatre algorithmes SAW, MEW, TOPSIS et GRA avec trois autres méthodes MADM telles que ELECTRE [13], VIKOR [137] et WMC [160] a été proposée dans [99]. L'environnement de simulation de ces sept méthodes MADM contient trois réseaux hétérogènes WLAN, UMTS et WIMAX. La simulation prend en considération deux types d'applications : la transmission de la voix et la transmission de données. Les critères

## 2.2.8 Evaluation des performances des algorithmes de handover basés sur l'approche MADM

de décision qui interviennent dans la décision sont : la bande passante disponible, la bande passante totale, le délai, la gigue, le taux de perte et le coût de service. Les résultats de cette comparaison montrent que les trois approches TOPSIS, SAW et VIKOR sont plus adéquates pour la transmission de la voix, tandis que les deux méthodes MEW et GRA sont plus favorables pour la transmission de données.

L'extension de cette évaluation a été proposée par les mêmes auteurs Stevens et al. [138]. Cette extension fournit une analyse comparative vaste entre les sept stratégies de handover vertical qui sont utilisées pour trois types d'applications telles que la voix, le transfert de données et l'application avec contraintes de coût. Le tableau 2.10 compare les performances de toutes les approches. On peut remarquer que les deux stratégies MEW et VIKOR offrent une meilleure décision, tandis que les deux algorithmes SAW et GRA fournissent une meilleure complexité. L'évaluation de performances de ces travaux a été réalisée avec le simulateur MATLAB.

TAB. 2.10 – Étude comparative de différents algorithmes basés sur MADM [138]

Algorithme de handover	Voice	Data	Cost	Flops
SAW	Satisfactory	Satisfactory	Best	Best
MEW	Low	Best	Best	Satisfactory
TOPSIS	Satisfactory	Satisfactory	Best	Satisfactory
GRA	Low	Low	Low	Best
VIKOR	Best	Satisfactory	Best	Satisfactory
ELECTRE	Low	Satisfactory	Satisfactory	Low
WMC	Low	Low	Best	Low

Les auteurs Bonnin et al. [92] ont conçu et développé une nouvelle méthodologie d'évaluation des algorithmes de handover. Cette méthodologie est basée sur une plate-forme qui permet de simuler des scénarios réels dans le but d'évaluer la performance des algorithmes. En plus, la méthodologie proposée prend en compte les préférences d'utilisateur, les exigences des applications, le contexte d'information relatif au terminal mobile et les contraintes de l'opérateur. Cette méthodologie a été implémentée pour comparer la performance de cinq algorithmes de handover vertical : SAW, MEW, TOPSIS, GRA, et UA (Abique's Algorithm). Pour chaque algorithme du handover, la méthode AHP est utilisée pour obtenir des poids relatifs à chaque critère. Les deux types de trafic considérés dans cette simulation : sont le flux conversationnel et le flux streaming. Les paramètres de décision associés à chaque type de trafic sont : la bande passante disponible, le taux de perte, le délai, la sécurité, et le coût monétaire.

Un autre modèle efficace pour l'évaluation de performance a été proposé par les auteurs Alexander et al. [35] et [34]. Ce nouveau modèle [35] s'appuie de manière fondamentale sur l'approche MADM et l'analyse de la criticité (criticality analysis). Ce modèle consiste à mesurer les valeurs de trois paramètres pour chaque algorithme. Ces paramètres d'évaluation sont le nombre de handover, le délai et la complexité. Ensuite, le modèle d'évaluation calcule l'indice de l'analyse de criticité. L'algorithme du handover qui possède la plus grande valeur de cet indice est considéré comme le meilleur. Une extension de ce travail a été proposée par les mêmes auteurs dans la référence [34]. Dans cette extension, le même modèle a été utilisé pour évaluer la performance de cinq algorithmes de handover SAW, MEW, TOPSIS, ELECTRE, et VIKOR. Pour chaque algorithme de handover, le modèle introduit cinq critères de décision qui sont : la bande passante disponible, le délai, la gigue, et le coût. Le résultat de cette analyse montre que la méthode MEW offre la meilleure performance par rapport aux autres algorithmes.

## 2.8.2 Bilan

Le mécanisme du handover vertical vise à maintenir une continuité de la qualité de service lorsque l'utilisateur se déplace dans un environnement hétérogène. Pour assurer l'efficacité et l'efficience de ce mécanisme, le choix du meilleur algorithme de décision qu'il faut implémenter dans ce processus est devenu nécessaire. Cependant, vu la diversité des algorithmes de décision basés sur l'approche MADM, ce choix est un défi à relever. D'ailleurs, il n'y a aucun algorithme de handover favorable par rapport à un autre algorithme. Tous les algorithmes proposés dans la littérature présentent des limitations.

Pour nous focaliser sur les algorithmes du handover les plus répandus, nous avons réalisé une statistique sur l'ensemble des travaux existants dans la littérature. Le tableau 2.11 présente un aperçu sur les différents algorithmes MADM existants ainsi que leurs pourcentages d'utilisation dans le contexte du handover. En tenant compte de toutes les méthodes de pondération, nous remarquons que les deux algorithmes de classement TOPSIS et GRA sont les plus utilisés dans la littérature, 40.54% des références pour l'algorithme TOPSIS et 24.32% pour la méthode GRA. De plus, nous observons également que 21.62% des propositions combinent les deux méthodes TOPSIS et GRA avec la méthode AHP. Finalement, l'approche AHP, représente la méthode la plus utilisée pour l'affectation du poids pour chaque critère. Cette méthode a été utilisée presque à 75.68% dans la littérature.

Comme conclusion de cette analyse, les trois méthodes TOPSIS, GRA et AHP sont largement utilisées dans la littérature comme noyau de l'algorithme de décision.

TAB. 2.11 – Bilan sur les différents algorithmes du handover basés sur l'approche MADM

Bilan		Algorithmes de pondération				Algorithmes de classement				
Références	%	AHP	ANP	FAHP	FANP	SAW	MEW	TOPSIS	GRA	ELECTRE
[127] [28] [147] [157] [99] [139]	16.22	✓				✓				
[165] [157] [99] [139]	10.81	✓					✓			
[122] [123] [126] [157] [99] [139] [31] [79]	21.61	✓						✓		
[135] [134] [59] [157] [99] [139] [39] [97]	21.62	✓							✓	
[99] [157]	5.41	✓								✓
[94] [72] [79]	8.11		✓					✓		
[32]	2.70			✓						✓
[65] [120] [79]	8.11			✓				✓		
[120]	2.70			✓					✓	
[79]	2.70				✓			✓		
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>75.68</b>	<b>8.11</b>	<b>13.51</b>	<b>2.70</b>	<b>16.22</b>	<b>10.81</b>	<b>40.54</b>	<b>24.32</b>	<b>8.11</b>

## 2.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une revue de la littérature des travaux de recherches consacrés aux problèmes de sélection de réseau en utilisant l'approche MADM. Nous avons décrit les différentes techniques de normalisation. Puis, nous avons également fourni les différents algorithmes de pondération proposés dans la littérature. Ensuite, nous avons exploré les principaux algorithmes de classement basés sur l'approche MADM. Enfin, nous avons présenté les différents modèles d'évaluation de performance proposés ainsi qu'une étude comparative entre les algorithmes de handover existants.

A l'issue de cette évaluation et de cette comparaison de solutions de handover basées sur l'approche MADM, nous tirons les conclusions suivantes :

- Tous les algorithmes de handover basés sur l'approche MADM présentent des limitations telles que anomalie de classement, nombre de handover élevé handover inutile etc.
- L'algorithme de pondération utilisé pour l'affectation de poids influence la performance de l'algorithme de décision.
- Absence d'une évaluation de performance de techniques de pondération pour identifier le meilleur algorithme qu'il faut appliquer pour calculer le poids de chaque attribut ;
- Les modèles d'évaluation de performance proposés dans la littérature ne prennent pas en considération les différents paramètres d'évaluation ;
- L'optimisation ou la proposition d'un nouveau modèle mathématique pour l'évaluation de performance est un défi à relever dans notre thèse ;
- L'identification du meilleur algorithme de classement à implémenter dans le processus du handover reste un sujet ouvert de recherche.

Le chapitre suivant présente nos différentes solutions qui contribuent à l'optimisation de la sélection de réseau. Cette optimisation se focalise sur deux points essentiels. Le premier est de réduire le phénomène de l'anomalie de classement. Le deuxième consiste à minimiser le nombre de handoffs.

---

---

## CHAPITRE 3

---

# UNE NOUVELLE ARCHITECTURE POUR LA SELECTION DE RESEAU

### 3.1 Introduction

Au terme du chapitre précédent, nous avons identifié l'anomalie du classement comme l'inconvénient majeur qui influence la performance des algorithmes de la sélection du réseau. Dans ce chapitre, nous proposons trois contributions à même de remédier à cet inconvénient. Le premier objectif est de déterminer les facteurs qui provoquent l'anomalie de classement. Pour cela, la première partie présente l'état de l'art de l'ensemble des solutions proposées pour surmonter l'anomalie de classement. Une étude analytique de ces solutions nous a permis d'aboutir aux différents facteurs qui impliquent cette anomalie.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à notre première contribution. Cette dernière est une technique améliorée basée sur la méthode TOPSIS et la méthode AHP. Cette technique est appelée E-TOPSIS (Enhanced TOPSIS), elle introduit deux poids  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  qui désignent respectivement les degrés d'importance relatifs aux solutions idéale et anti-idéale (pire). D'abord, la méthode AHP est utilisée pour pondérer les différents critères. Ensuite, notre technique E-TOPSIS est appliquée pour classer les alternatives réseaux.

Notre deuxième contribution est donnée dans la troisième partie de ce chapitre. Il s'agit d'un algorithme hybride appelé H-TOPSIS. Cet algorithme repose sur deux méthodes MADM qui sont AHP floue et TOPSIS. La première méthode est utilisée pour l'élicitation de poids et la deuxième méthode est appliquée pour classer les alternatives réseaux. L'idée de base de notre algorithme H-TOPSIS consiste à introduire un nouveau critère appelé historique de performance. Ce dernier permet de mémoriser la performance de chaque interface réseau accessible pour le terminal mobile et par conséquent, réduire l'anomalie de classement en choisissant l'interface réseau la plus favorable.

Dans la quatrième partie de ce chapitre, nous présentons une nouvelle stratégie pour la sélection du réseau appelée FADM (Fuzzy AHP Combined with Distance of Mahalanobis) dans le but de contourner les limites des algorithmes classiques basés sur l'approche MADM. Cette troisième contribution propose deux modules : le premier est un système de pondération appliqué pour calculer le poids pour chaque critère, tandis que le second module est un nouvel algorithme de classement qui repose sur la distance de Mahalanobis pour ranger les alternatives réseaux.

Finalement, afin d'évaluer la performance de chaque contribution que nous proposons dans ce chapitre, nous présentons et analysons les résultats obtenus par les simulations. Nous comparons également leur efficacité par rapport aux algorithmes classiques de la sélection du réseau. La dernière partie de ce chapitre présente une conclusion et des perspectives d'investigation pour de futurs travaux.

## 3.2 Le problème d'anomalie de classement

Bien que les deux algorithmes de classement TOPSIS et GRA aient été largement utilisés dans le contexte de la sélection du réseau, ils sont loin d'être efficaces vu qu'ils présentent des limitations. Parmi ces contraintes nous citons le nombre de handovers qui reste élevé et l'inconvénient de l'anomalie du classement (voir la section 2.7.1.3). Plusieurs travaux ont été développés et proposés afin de rendre autant que possible efficaces les approches du handover. Pour l'approche TOPSIS, nous citons [10], [150], [30] et [21]. Quant à l'approche GRA, nous mentionnons [11] et [52].

Les auteurs Bari et al. [10], ont fourni une approche efficace pour résoudre le problème de l'anomalie du classement. Cette approche consiste à appliquer la méthode TOPSIS d'une manière itérative jusqu'à avoir un seul réseau candidat. Ce réseau représente l'interface optimale qu'il faut utiliser pour le terminal mobile. Le principe de cette solution est illustré par la figure 3.1. Cependant, l'inconvénient de cette solution réside dans le temps d'exécution requis pour choisir le meilleur réseau. Par exemple, si nous avons  $n$  réseaux d'accès disponibles, nous devons répéter l'approche "Iterative TOPSIS"  $n-1$  fois jusqu'à ce que la meilleure interface réseau soit obtenue.

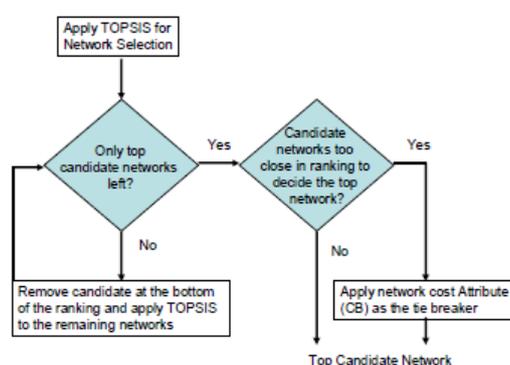


FIG. 3.1 – Décision du handover basée sur l'approche itérative de méthode TOPSIS [10]

De plus, les auteurs Tran et al. [150] ont présenté un algorithme de handover vertical appelé DIA. Cet algorithme est une variante de la méthode TOPSIS. Il permet de choisir l'alternative réseau qui a la plus courte distance euclidienne par rapport à une alternative idéale positive (PIA). En termes de performance, l'algorithme permet de réduire l'anomalie de classement par rapport à la méthode TOPSIS. Nous nous devons de signaler que cet algorithme ne permet pas d'éliminer définitivement cette anomalie.

Un autre algorithme de classement pour résoudre le problème d'anomalie du classement a été proposé dans [30]. L'algorithme proposé représente une proximité de la méthode TOPSIS. L'idée de cet algorithme consiste d'abord à calculer la médiane de chaque colonne de la matrice de décision pondérée. Ensuite, les alternatives réseaux sont classées selon l'ordre décroissant

### CHAPITRE 3. UNE NOUVELLE ARCHITECTURE POUR LA SELECTION DE RESEAU

de la valeur de médiane. La solution proposée comporte trois désavantages : le premier est l'absence d'une comparaison de la performance de cette solution avec d'autres algorithmes de la sélection basés sur l'approche MADM. Le deuxième est que cette solution ne permet pas de supprimer l'anomalie de classement.

Finalement, les auteurs Ionnis et al. [30] ont présenté une nouvelle méthode appelée FSR-TOPSIS pour la sélection du réseau. La méthode FSR-TOPSIS représente une extension de l'approche TOPSIS de telle sorte qu'elle prend en compte l'incertitude des critères de sélection. Cette nouvelle approche combine la logique floue et la fonction d'utilité dans le but de réduire l'anomalie de classement et d'éviter l'effet de ping-pong. Pour l'évaluation de performance de la méthode FSR-TOPSIS, les auteurs ont proposé des exemples numériques pour la sélection du réseau. L'environnement hétérogène de la simulation contient trois réseaux : UMTS, WIFI et WIMAX. Bien que cette nouvelle approche fournisse de meilleurs résultats par rapport à la méthode TOPSIS, elle ne parvient pas à remédier définitivement à l'anomalie de classement. Dans le même contexte, deux travaux basés sur l'approche GRA ont été proposés dans la littérature [11] et [52] pour remédier au même problème de l'anomalie du classement. Les auteurs Farooq et al. [11] ont proposé une nouvelle méthode appelée GRA floue (Fuzzy GRA). Cette nouvelle méthode combine la logique floue et l'approche GRA. Elle permet de réduire l'anomalie de classement issue de l'approche GRA.

La deuxième solution pour éliminer l'anomalie de classement produite par l'approche GRA est présentée dans [52]. Dans cette solution les auteurs ont montré que l'origine de cette anomalie réside dans la normalisation max-min utilisée par la méthode GRA. Pour cette raison, ils ont proposé trois variantes de cette normalisation (voir le tableau 3.1). Bien que la nouvelle normalisation proposée permette d'éliminer l'anomalie du classement, elle implique toutefois l'imprécision dans l'identification du classement.

TAB. 3.1 – Techniques de normalisation pour la sélection du réseau basée sur GRA

	original	norm-1	norm-3	norm-3
smaller the better	$\frac{u_j - s_i(j)}{u_j - l_j}$	$\frac{E_{maxj} - s_i(j)}{E_{maxj} - E_{minj}}$	$\frac{E_{maxj} - s_i(j)}{E_{maxj} - l_j}$	$\frac{l_j}{s_i(j)}$
larger the better	$\frac{s_i(j) - l_j}{u_j - l_j}$	$\frac{s_i(j) - E_{minj}}{E_{maxj} - E_{minj}}$	$\frac{s_i(j) - E_{minj}}{u_j - E_{minj}}$	$\frac{s_i(j)}{u_j}$

Malgré la diversité des solutions proposées pour lutter contre l'anomalie du classement, cette dernière représente toujours l'inconvénient majeur pour les méthodes MADM. La question qu'il faut poser est : pourquoi ces solutions ne permettent elles pas de résoudre définitivement ce problème? Après avoir bien étudié les algorithmes de handover basés sur MADM, nous avons déterminé les facteurs susceptibles de produire cette anomalie. Nous avons relevé quatre facteurs principaux qui peuvent provoquer ce problème :

1. Le type de normalisation : la technique de normalisation est un élément important qui influence directement l'anomalie de classement. Après l'insertion ou la suppression d'une alternative ou d'un critère, la nouvelle valeur normalisée de chaque critère dans la matrice de décision sera changée automatiquement. Ce changement représente le facteur qui produit l'anomalie de classement. Par conséquent, pour éviter ce problème, il suffit de choisir une technique de normalisation capable de garder la même valeur normalisée après l'insertion ou la suppression d'une alternative ou d'un critère. A titre d'exemple, la nouvelle technique de normalisation proposée dans [52].
2. L'algorithme de pondération : la procédure de pondération utilisée, pour l'affectation de poids pour chaque attribut, est la cause du problème d'anomalie de classement [149].

### 3.3.3 Une technique améliorée basée sur la méthode TOPSIS pour la sélection du réseau (E-TOPSIS)

3. L'incertitude des critères de sélection : généralement, lors du processus de mesure de chaque critère, on peut avoir des informations non précises. L'incertitude des critères de la sélection peut produire aussi l'anomalie de classement [11].
4. La distance euclidienne : les techniques de classement basées sur la distance euclidienne comme TOPSIS présente davantage cette anomalie vu que cette distance ne prend pas en considération la corrélation entre les attributs. Dans la distance euclidienne, toutes les composantes des vecteurs sont traitées de la même façon. Elle accorde le même poids pour toutes les composantes [150].

D'autre part, comme nous l'avons déjà mentionné dans le chapitre II, le nombre de handover élevé représente un autre inconvénient pour les algorithmes de handover basés sur l'approche MADM. De plus, la majorité des stratégies proposées dans la littérature reposent sur la méthode AHP pour pondérer les critères. Cependant, la méthode AHP présente aussi des limitations (voir chapitre 2) qui ne sont pas encore traitées. D'ailleurs, nous avons montré que l'amélioration de la méthode AHP implique la réduction de l'anomalie du classement, ainsi que le nombre de handover.

Afin d'améliorer les algorithmes de handover basés sur l'approche MADM, nous proposons dans ce chapitre trois contributions. Nous montrons à travers des simulations que ces trois solutions permettent de réduire l'anomalie de classement ainsi que le nombre de handover par rapport aux algorithmes classiques de handover.

## 3.3 Une technique améliorée basée sur la méthode TOPSIS pour la sélection du réseau (E-TOPSIS)

### 3.3.1 Le principe de la méthode E-TOPSIS

La méthode TOPSIS est basée sur le coefficient de préférence  $C_i^*$  (Eq. (2.39)) pour déterminer la meilleure interface réseau. Cependant, ce coefficient présente deux inconvénients qui causent l'anomalie de classement. Le premier inconvénient réside dans l'utilisation de la distance euclidienne [159] pour calculer la valeur de  $C_i^*$ . Le deuxième inconvénient, c'est que le calcul de ce coefficient ne prend pas en considération le degré d'importance entre  $S_i^+$  (Eq. (2.37)) et  $S_i^-$  (Eq. (2.38)) [93]. En effet, la figure 3.2 illustre ce deuxième inconvénient, les deux distances de similarité  $S_4^+$  et  $S_4^-$  possèdent le même degré d'importance par rapport à la solution idéale.

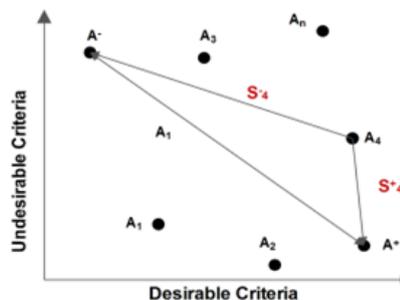


FIG. 3.2 – Problème de la méthode TOPSIS

Afin de remédier à ce deuxième inconvénient qui est un biais pour réduire l'effet de l'anomalie de classement, nous proposons une technique améliorée basée sur la méthode TOPSIS [82] [81]. Cette technique est appelée E-TOPSIS (Enhanced TOPSIS). Elle introduit deux poids  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  qui désignent respectivement le degré d'importance relatif à la solution idéale et à la pire solution. L'ancienne valeur de coefficient de préférence  $C_i^*$  (Eq. (2.39)) est remplacée par une nouvelle valeur appelée  $C_i^{*New}$ . Le nouveau coefficient de préférence  $C_i^{*New}$  est défini par l'équation suivante :

$$C_i^{*New} = 1 - \frac{\lambda_1 * S_i^+ + \lambda_2 * S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}, i = 1, \dots, n. \quad (3.1)$$

En outre, la méthode de pondération AHP est appliquée pour calculer le degré d'importance de chaque coefficient  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  en fonction du type de trafic.

### 3.3.2 Pondération AHP

Avant de classer les alternatives réseaux en utilisant notre technique E-TOPSIS [82] [81], il est important de connaître le degré d'importance de chaque critère. Pour accomplir cette tâche, nous avons besoin d'introduire une technique de pondération comme AHP, AHP floue, ANP, etc. Bien que la méthode AHP présente plusieurs limites (voir chapitre 2), elle fait partie des techniques les plus répandues dans la littérature pour l'affectation de poids (60% des travaux utilisent cette méthode). La méthode AHP vise à expliciter les préférences du décideur à travers un modèle hiérarchique qui représente les critères et les alternatives.

Dans notre contexte de la sélection réseau, nous utilisons six critères : la bande passante disponible (AB), la sécurité (S), le coût de service (CB), la gigue (J), le délai (D) et le taux de perte (L). De plus, l'environnement réseau contient trois technologies hétérogènes : UMTS, WLAN et WIMAX. Le modèle hiérarchique défini par la méthode AHP est illustré par la figure 3.3.

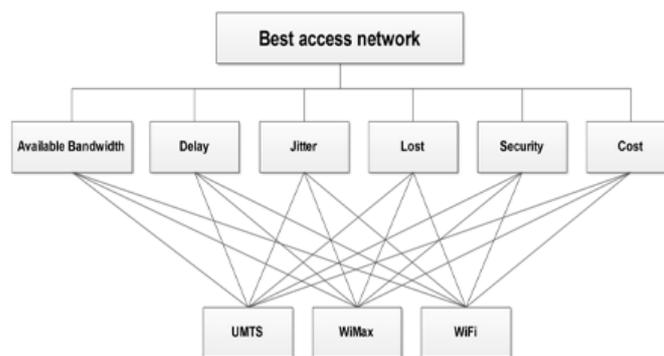


FIG. 3.3 – Hiérarchie de la méthode AHP pour la sélection du réseau

Comme nous l'avons déjà abordé dans le chapitre 1, les trois technologies réseaux permettent de supporter quatre classes de services définies par 3GPP [1] :

- Services en arrière-plan (Background class) ;
- Services conversationnels (Conversational class) ;
- Services interactifs (Interactive class) ;
- Services streaming (Streaming class).

### 3.3.3 Une technique améliorée basée sur la méthode TOPSIS pour la sélection du réseau (E-TOPSIS)

La méthode AHP permet d'accorder un degré d'importance pour chaque critère, en tenant compte des caractéristiques techniques de chaque type de service. Dans ce qui suit, nous présentons la méthodologie de calcul de poids pour les quatre types de services : services en arrière-plan, services conversationnels, services interactifs et services streaming. Pour chaque service, nous donnons le degré d'importance associé à chaque critère et le poids relatif aux coefficients  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$ .

#### 3.3.2.1 Elicitation de poids : service en arrière-plan

Le tableau 3.2 montre le poids accordé aux différents critères en fonction du service en arrière plan, tandis que le tableau 3.3 représente le degré d'importance associé par la méthode AHP aux coefficients  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$ .

TAB. 3.2 – Poids accordé à chaque critère pour le flux arrière-plan

Critères	CB	S	AB	D	J	L	Poids
CB	1	1/3	1/7	1/7	1/7	1/7	0.085
S	3	1	1/4	1/4	1/4	1/4	0.213
AB	7	4	1	9	9	3	0.430
D	7	4	1/9	1	1	1/5	0.042
J	7	4	1/9	1	1	1/5	0.042
L	7	4	1/3	5	5	1	0.187

TAB. 3.3 – Degré d'importance de  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  pour le flux arrière-plan

Critères	$\lambda_1$	$\lambda_2$	Poids
$\lambda_1$	1	2	0.677
$\lambda_2$	1/2	1	0.333

#### 3.3.2.2 Elicitation de poids : service conversationnel

Le tableau 3.4 montre le poids attribué aux différents critères en fonction du service conversationnel, tandis que le tableau 3.5 représente le degré d'importance associé par la méthode AHP aux coefficients  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$ .

TAB. 3.4 – Poids accordé à chaque critère pour le flux conversationnel

Critères	CB	S	AB	D	J	L	Poids
CB	1	1/3	1/7	1/7	1/7	1/7	0.085
S	3	1	1/4	1/4	1/4	1/4	0.213
AB	7	4	1	1/7	1/7	1/6	0.033
D	7	4	7	1	1	2	0.259
J	7	4	7	1	1	2	0.259
L	7	4	6	1/2	1/2	1	0.150

TAB. 3.5 – Degré d'importance de  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  pour le flux conversationnel

Critères	$\lambda_1$	$\lambda_2$	Poids
$\lambda_1$	1	4	0.800
$\lambda_2$	1/4	1	0.200

### 3.3.2.3 Elicitation de poids : service interactif

Le tableau 3.6 montre le poids accordé aux différents critères en fonction du service interactif, tandis que le tableau 3.7 représente le degré d'importance associé par la méthode AHP aux coefficients  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$ .

TAB. 3.6 – Poids accordé à chaque critère pour le flux interactif

Critères	CB	S	AB	D	J	L	Poids
CB	1	1/3	1/7	1/7	1/7	1/7	0.085
S	3	1	1/4	1/4	1/4	1/4	0.213
AB	7	4	1	1/3	2	1/3	0.089
D	7	4	3	1	8	1	0.287
J	7	4	1/2	1/8	1	1/8	0.039
L	7	4	3	1	8	1	0.287

TAB. 3.7 – Degré d'importance de  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  pour le flux interactif

Critères	$\lambda_1$	$\lambda_2$	Poids
$\lambda_1$	1	6	0.857
$\lambda_2$	1/6	1	0.143

### 3.3.2.4 Elicitation de poids : service streaming

Le tableau 3.8 illustre le poids accordé aux différents critères en fonction du flux streaming, tandis que le tableau 3.9 représente le degré d'importance associé par la méthode AHP aux coefficients  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$ .

TAB. 3.8 – Poids accordé à chaque critère pour le flux streaming

Critères	CB	S	AB	D	J	L	Poids
CB	1	1/3	1/7	1/7	1/7	1/7	0.085
S	3	1	1/4	1/4	1/4	1/4	0.213
AB	7	4	1	7	2	2	0.300
D	7	4	1/7	1	1/4	1/5	0.041
J	7	4	1/2	4	1	2	0.151
L	7	4	1/2	5	1/2	1	0.210

### 3.3.3 Une technique améliorée basée sur la méthode TOPSIS pour la sélection du réseau (E-TOPSIS)

TAB. 3.9 – Degré d'importance de  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  pour le flux streaming

Critères	$\lambda_1$	$\lambda_2$	Poids
$\lambda_1$	1	8	0.889
$\lambda_2$	1/8	1	0.111

### 3.3.3 L'algorithme de la sélection réseau basé sur E-TOPSIS et AHP

Notre technique améliorée pour la sélection du réseau E-TOPSIS combine deux méthodes MADM : AHP et E-TOPSIS. D'une part, la première méthode est appliquée pour pondérer les différents critères. D'autre part, la deuxième méthode qui est une extension améliorée de la méthode classique TOPSIS utilisée pour ranger les alternatives réseaux accessibles pour le terminal mobile. La technique E-TOPSIS fonctionne comme suit :

1. Construire le modèle hiérarchique en utilisant la méthode AHP (voir la figure 3.3).
2. Attribuer un poids pour chaque critère du modèle hiérarchique.
3. Appliquer la méthode E-TOPSIS pour calculer le score  $C_i^{*New}$  pour chaque technologie réseau (dans notre cas  $i=1..3$ ).
4. Choisir le réseau qui correspond à la plus grande valeur de ce score en le qualifiant comme le meilleur réseau.

### 3.3.4 Simulations et résultats

#### 3.3.4.1 Scénario de simulation

Afin de valider notre technique améliorée E-TOPSIS proposée pour la sélection du réseau, nous comparons la performance de notre solution E-TOPSIS par rapport à la performance de l'algorithme TOPSIS. La comparaison de performance se fait au niveau de deux aspects : l'anomalie de classement et le nombre de handover. Le scénario de simulation utilisé pour l'évaluation de performance de ces deux algorithmes est illustré par la figure 3.4. Les différents attributs utilisés dans chaque réseau sont présentés dans le tableau 3.10. Les valeurs de ces attributs sont générées d'une façon aléatoire selon l'intervalle indiqué pour chaque attribut.

TAB. 3.10 – Performances des attributs pour les réseaux candidats

criteria network	CB (%)	S (%)	AB (mbps)	D (ms)	J (ms)	L ( $per10^6$ )
UMTS	60	50	0.1-2	20-50	5-15	20-80
WLAN	15	60	1-10	100-140	10-20	20-80
WIMAX	50	60	1-60	60-100	3-10	20-80

Quatre expériences ont été effectuées pour simuler respectivement quatre types de flux qui sont : services en arrière-plan, services conversationnels, services interactifs et services streaming. Pour chaque simulation, les deux algorithmes E-TOPSIS et TOPSIS ont été exécutés

dans 50 points de la sélection du réseau à l'aide du simulateur MATLAB. Nous présentons dans ce qui suit les résultats de ces quatre simulations.

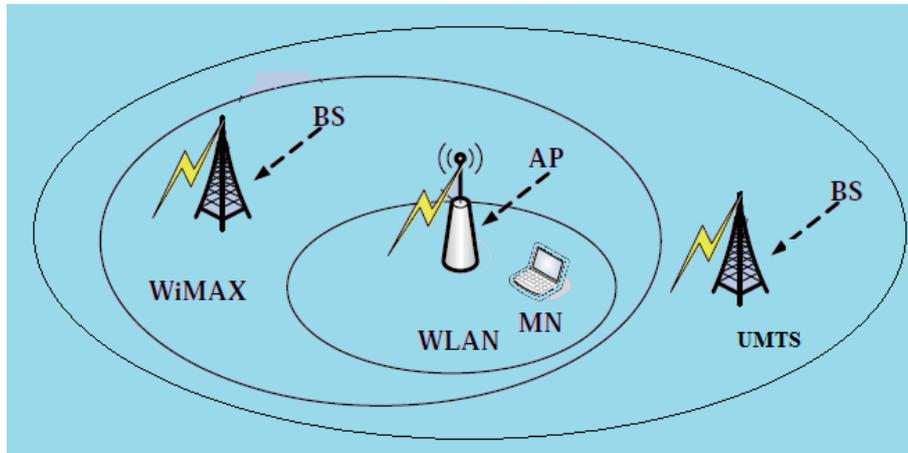


FIG. 3.4 – Scénario de simulation

### 3.3.4.2 La simulation 1

Dans cette simulation, nous analysons le flux arrière-plan, afin de comparer la performance de notre technique E-TOPSIS par rapport à l'algorithme TOPSIS.

- **L'anomalie de classement** : la figure 3.5 montre le taux moyen de l'anomalie de classement provoquée par les algorithmes TOPSIS et E-TOPSIS. Nous pouvons observer que la meilleure performance de l'anomalie de classement est donnée par notre solution E-TOPSIS. Avec cette dernière, nous pouvons réduire cette anomalie à 42%. De plus, l'algorithme TOPSIS permet d'obtenir une valeur de 45%.

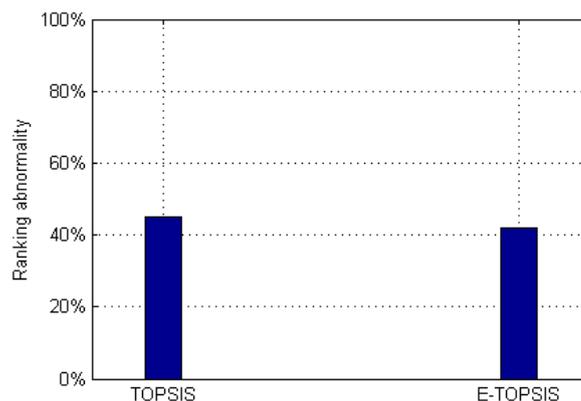


FIG. 3.5 – Taux moyen de l'anomalie de classement basé sur E-TOPSIS pour arrière-plan

- **Le nombre de handoffs** : la figure 3.6 montre le taux moyen qui correspond au nombre de handoffs effectué par les deux algorithmes TOPSIS et E-TOPSIS. Nous observons que notre technique permet de réduire ce problème à 36%. En revanche, l'algorithme TOPSIS fournit une valeur de 45%. En somme, nous constatons que

### 3.3.3 Une technique améliorée basée sur la méthode TOPSIS pour la sélection du réseau (E-TOPSIS)

notre solution E-TOPSIS fournit une meilleure performance du nombre du handoffs par rapport à l'algorithme TOPSIS.

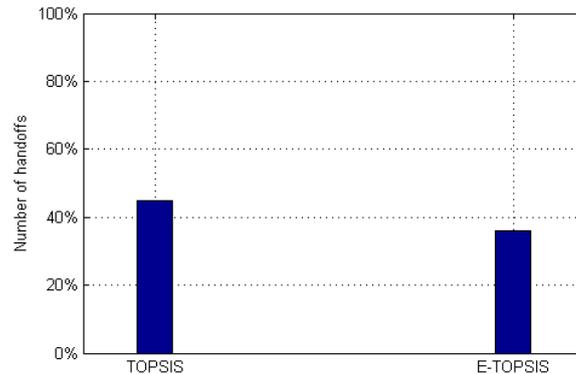


FIG. 3.6 – Taux moyen du nombre de handoffs basé sur E-TOPSIS pour arrière-plan

#### 3.3.4.3 La simulation 2

Afin de comparer la performance de notre solution E-TOPSIS par rapport à l'algorithme classique TOPSIS, nous analysons le flux conversationnel dans cette simulation.

- **L'anomalie de classement** : la figure 3.7 représente le taux moyen de l'anomalie de classement pour les deux algorithmes TOPSIS et E-TOPSIS dans 50 points de décision. Nous pouvons observer que notre solution E-TOPSIS permet de réduire ce problème de 20%. Par contre l'algorithme TOPSIS fournit une valeur de 27%. Nous pouvons déduire que notre technique fournit une meilleure performance concernant l'anomalie du classement par rapport à l'algorithme TOPSIS pour le flux conversationnel.

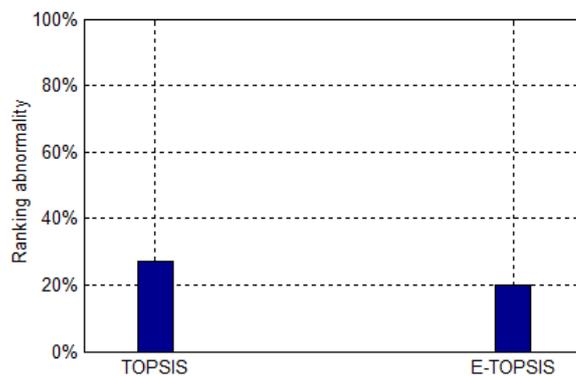


FIG. 3.7 – Variation de l'anomalie de classement basé sur E-TOPSIS pour conversationnel

- **Le nombre de handoffs** : la figure 3.8 montre le taux moyen qui correspond au nombre de handoffs effectué par les deux algorithmes TOPSIS et E-TOPSIS dans 50 points de décision. Nous pouvons observer que la meilleure performance du nombre de handoff est donnée par notre solution E-TOPSIS. Avec cette dernière, nous pouvons minimiser le risque d'avoir ce problème jusqu'à 50% pour le flux conversationnel.

Tandis que l'algorithme TOPSIS permet de réduire le nombre de handoffs d'une valeur de 55%.

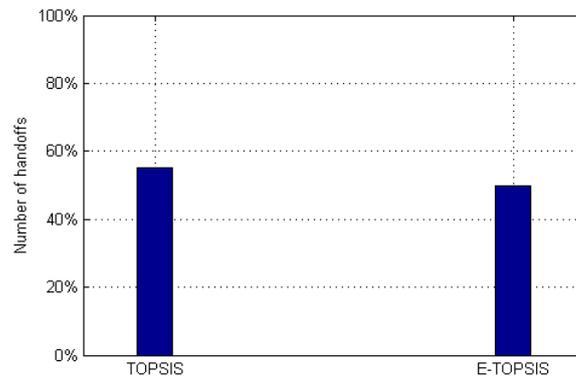


FIG. 3.8 – Taux moyen du nombre de handoffs basé sur E-TOPSIS pour conversationnel

### 3.3.4.4 La simulation 3

La troisième simulation a pour but d'analyser le flux interactif pour évaluer la performance de notre technique E-TOPSIS par rapport à l'algorithme TOPSIS.

- **L'anomalie de classement** : la figure 3.9 montre le taux moyen de l'anomalie de classement effectué par les deux algorithmes TOPSIS et E-TOPSIS dans 50 points de décision. Nous remarquons que la meilleure performance de l'anomalie de classement est fournie par notre technique E-TOPSIS. Avec cette dernière, nous observons que le risque d'avoir cette anomalie se limite à 36% pour le flux interactif. Or, la solution classique TOPSIS permet de réduire cette anomalie à 45%.

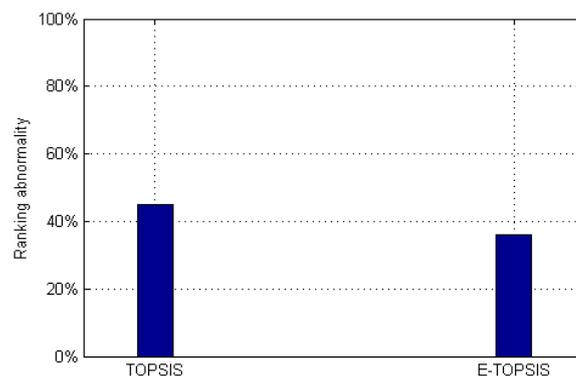


FIG. 3.9 – Taux moyen de l'anomalie de classement basé sur E-TOPSIS pour interactif

- **Le nombre de handoffs** : la figure 3.10 montre le taux moyen qui correspond au nombre de handoffs concernant les deux algorithmes TOPSIS et E-TOPSIS dans 50 points de décision. D'après cette figure, notre technique permet de réduire le nombre de handoffs à 30%. Par contre, l'algorithme TOPSIS minimise le risque d'avoir ce problème avec une valeur de 36%. Ce qui nous mène à constater que notre solution fournit une meilleure performance du nombre de handoffs par rapport à l'algorithme classique TOPSIS.

### 3.3.3 Une technique améliorée basée sur la méthode TOPSIS pour la sélection du réseau (E-TOPSIS)

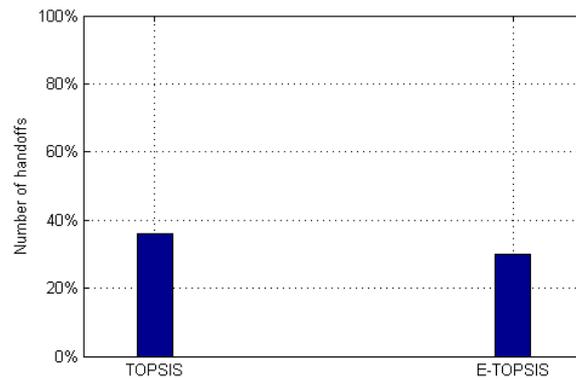


FIG. 3.10 – Taux moyen du nombre de handoffs basé sur E-TOPSIS pour interactif

### 3.3.4.5 La simulation 4

La dernière simulation consiste à évaluer la performance de notre technique E-TOPSIS par rapport à la solution classique TOPSIS pour le flux streaming.

- **L'anomalie de classement** : la figure 3.11 montre le taux moyen de l'anomalie de classement effectué par les deux algorithmes TOPSIS et E-TOPSIS dans 50 points de décision. D'après cette figure, nous observons que la meilleure performance en termes de l'anomalie de classement est assurée par notre solution E-TOPSIS car elle minimise le risque d'avoir cette anomalie à 35%. Quant à l'algorithme classique TOPSIS peut aller jusqu'à 45%.

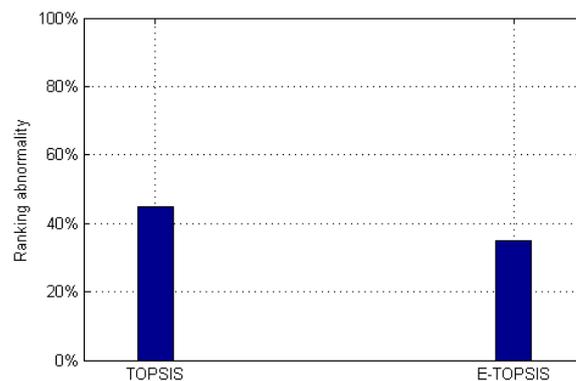


FIG. 3.11 – Taux moyen de l'anomalie de classement basé sur E-TOPSIS pour streaming

- **Le nombre de handoffs** : la figure 3.12 représente le taux moyen du nombre de handoffs effectué par les deux algorithmes TOPSIS et E-TOPSIS dans 50 points de décision. Nous observons que la technique E-TOPSIS minimise ce problème à 52%. Par contre, l'algorithme TOPSIS réduit le nombre de handoffs avec une valeur de 55%. Nous pouvons déduire que notre solution E-TOPSIS permet d'obtenir une meilleure performance concernant le nombre de handoffs par rapport à TOPSIS.

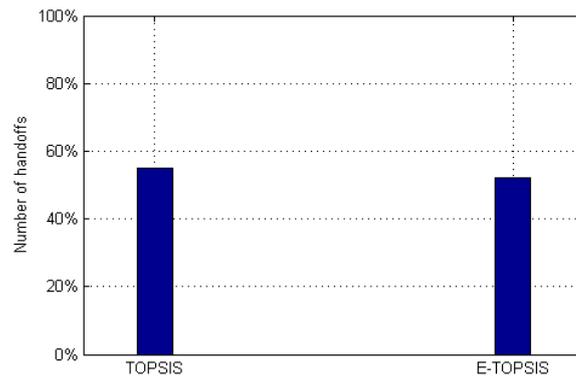


FIG. 3.12 – Taux moyen du nombre de handoffs basé sur E-TOPSIS pour streaming

### 3.3.5 Discussion

Dans cette contribution, nous avons proposé une technique améliorée appelée E-TOPSIS, pour la sélection du réseau. Notre technique repose sur l'idée d'introduire deux poids  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  qui désignent respectivement le degré d'importance relatif à la solution idéale et à la pire des solutions. D'autre part, la méthode de pondération AHP a été couplée avec E-TOPSIS pour l'affectation de poids pour chaque critère.

Les résultats des simulations en fonction de chaque type de service montrent que notre technique E-TOPSIS permet de fournir la meilleure performance concernant l'anomalie de classement et le nombre de handoffs par rapport à l'algorithme TOPSIS. De plus, nous pouvons déduire que le nombre de handoffs reste plus élevé parce que le terminal mobile bascule toujours vers la technologie réseau qui assure une meilleure qualité de service. Enfin, comme une perspective de ce travail, nous nous intéressons à réduire davantage le nombre de handoffs ainsi que l'anomalie de classement, dans la deuxième contribution.

## 3.4 Un algorithme hybride pour la sélection du réseau basé sur l'historique de la performance

### 3.4.1 Le principe de l'algorithme de la sélection basé sur AHP floue et TOPSIS

Nous introduisons dans cette section un algorithme hybride pour la sélection du réseau [75], qui tente de s'affranchir des mêmes inconvénients de la méthode TOPSIS, à savoir l'anomalie de classement et le nombre élevé de handoffs. Nous signalons que l'algorithme proposé ne s'appuie pas sur notre technique E-TOPSIS, mais il repose sur le même principe que celui de l'approche classique TOPSIS.

Notre proposition est basée sur deux idées principales. La première consiste à combiner la méthode TOPSIS et AHP floue au lieu de la méthode AHP. En effet, comme nous l'avons signalé dans le chapitre précédent, la méthode conventionnelle AHP possède plusieurs inconvénients. Ces derniers peuvent produire l'anomalie du classement ainsi qu'un nombre de handoffs élevé. Pour y remédier, nous utilisons l'approche AHP floue. La deuxième idée consiste à introduire un nouveau paramètre dans l'ensemble des critères de sélection. Ce paramètre est appelé historique de la performance (handover history). Son rôle est de mémoriser la performance

### 3.3.4 Un algorithme hybride pour la sélection du réseau basé sur l'historique de la performance

de l'interface réseau afin de l'utiliser dans la prochaine décision. L'avantage de ce nouveau paramètre est de permettre au réseau qui a été choisi pour la première fois d'être toujours choisi par le terminal, à condition qu'il puisse satisfaire les exigences de QoS, ce qui permet d'éviter des handovers successifs et de minimiser l'anomalie de classement. La valeur initiale de l'attribut historique de la performance est égale à 1. Ensuite, après la première décision de handover, la valeur du coefficient de rapprochement  $C_i^*$  est affectée à cet attribut. Le modèle hiérarchique défini par la méthode AHP floue est illustré dans la figure 3.13.

Notre algorithme hybride proposé pour la sélection du réseau se base sur le même environnement réseau de la première contribution en ajoutant l'attribut historique de la performance. Afin de déterminer la meilleure technologie réseau qu'il faut choisir par le terminal mobile, notre algorithme hybride basé sur AHP floue et TOPSIS fonctionne comme suit :

1. Construire le modèle hiérarchique en utilisant la méthode AHP (voir la figure 3.13).
2. Si le terminal exécute le processus du handover pour la première fois (itération  $i=0$ ) alors initialiser l'attribut historique de la performance (H) avec une valeur égale à 1.
3. Sinon, la valeur de l'attribut historique de la performance devient  $H_{i+1} = C_i^*$  avec  $C_i^*$  représente la valeur du coefficient de rapprochement relatif à l'itération  $i$  ; Finsi.
4. Attribuer un poids pour chaque critère du modèle hiérarchique.
5. Appliquer la méthode TOPSIS pour calculer le score  $C_i^*$  pour chaque technologie réseau (dans notre cas  $i=1..3$ ).
6. Choisir le réseau qui correspond à la plus grande valeur de ce score comme étant le meilleur réseau.

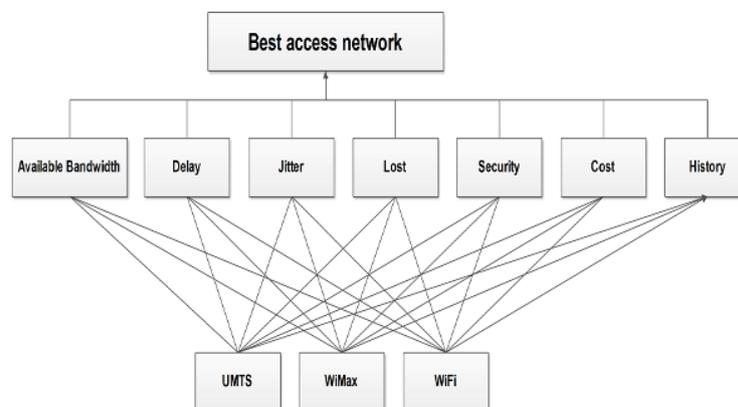


FIG. 3.13 – Hiérarchie de la méthode AHP floue pour la sélection du réseau

### 3.4.2 Pondération AHP floue

Afin de surmonter les limites de la méthode classique AHP, nous introduisons la méthode AHP floue dans notre algorithme hybride. La méthode AHP floue est utilisée pour pondérer les différents critères dans le contexte de quatre types de flux qui sont services en arrière-plan, services conversationnels, services interactifs et services streaming.

Pour chaque type de flux, nous calculons le degré d'importance pour chaque critère du premier ensemble qui contient six critères : la bande passante disponible (AB), la sécurité (S), le coût de service (CB), la gigue (J), le délai (D) et le taux de perte (L). Puis, nous calculons le

## CHAPITRE 3. UNE NOUVELLE ARCHITECTURE POUR LA SELECTION DE RESEAU

degré d'importance pour chaque critère du deuxième ensemble qui contient sept critères qui sont : les critères du premier ensemble en ajoutant notre critère historique de performance (H). Nous présentons dans ce qui suit, la démarche de pondération de chaque critère en utilisant la méthode AHP floue.

### 3.4.2.1 Elicitation de poids : service en arrière-plan

Le tableau 3.11 montre le poids accordés aux différents critères sans tenir compte du critère historique de performance (H), tandis que le tableau 3.12 représente le degré d'importance associé aux différents critères en tenant compte du critère H.

TAB. 3.11 – Poids basés sur AHP floue pour six critères en fonction de flux arrière-plan

Critères	CB	S	AB	D	J	L	Poids
CB	(1,1,1)	(2/3,1,3/2)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	0.131
S	(2/3,1,1/2)	(1,1,1)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)	0.310
AB	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(1,1,1)	(7/2,4,9/2)	(7/2,4,9/2)	(2/3,1,1/2)	0.306
D	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(2/9,1/4,2/7)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2/5,1/2,2/3)	0.025
J	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(2/9,1/4,2/7)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2/5,1/2,2/3)	0.025
L	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(2/3,1,1/2)	(3/2,2,5/2)	(1,1,1)	(1,1,1)	0.204

TAB. 3.12 – Poids basés sur AHP floue pour sept critères en fonction de flux arrière-plan

	CB	S	AB	D	J	L	H	Poids
CB	(1,1,1)	(2/3,1,3/2)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/3,1,3/2)	0.118
S	(2/3,1,1/2)	(1,1,1)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)	(2,5/2,3)	0.281
AB	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(1,1,1)	(7/2,4,9/2)	(7/2,4,9/2)	(2/3,1,1/2)	(5/2,3,7/2)	0.278
D	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(2/9,1/4,2/7)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2/5,1/2,2/3)	(5/2,3,7/2)	0.022
J	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(2/9,1/4,2/7)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2/5,1/2,2/3)	5/2,3,7/2)	0.022
L	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(2/3,1,1/2)	(3/2,2,5/2)	(1,1,1)	(1,1,1)	(5/2,3,7/2)	0.185
H	(2/3,1,3/2)	(1/3,2/5,1/2)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(1,1,1)	0.094

### 3.4.2.2 Elicitation de poids : service conversationnel

Le tableau 3.13 montre les poids accordés aux différents critères sans prendre en considération le critère historique de performance (H), tandis que le tableau 3.14 représente le degré d'importance associé aux différents critères en tenant compte du critère H.

### 3.4.2.3 Elicitation de poids : service interactif

Le tableau 3.15 montre les poids accordés aux différents critères sans tenir compte du critère historique de performance (H), tandis que le tableau 3.16 représente le degré d'importance associé aux différents critères en tenant compte du critère H.

### 3.3.4 Un algorithme hybride pour la sélection du réseau basé sur l'historique de la performance

TAB. 3.13 – Poids basés sur AHP floue pour six critères en fonction de flux conversationnel

Critères	CB	S	AB	D	J	L	Poids
CB	(1,1,1)	(2/3,1,3/2)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	0.131
S	(2/3,1,1/2)	(1,1,1)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)	0.310
AB	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(1,1,1)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(1/3,2/5,1/2)	0.034
D	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(5/2,3,7/2)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2/3,1,3/2)	0.187
J	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(5/2,3,7/2)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2/3,1,3/2)	0.187
L	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(2,5/2,3)	(1,4/3,2)	(1,4/3,2)	(1,1,1)	0.151

TAB. 3.14 – Poids basés sur AHP floue pour sept critères pour le flux conversationnel

	CB	S	AB	D	J	L	H	Poids
CB	(1,1,1)	(2/3,1,3/2)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/3,1,3/2)	0.118
S	(2/3,1,1/2)	(1,1,1)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)	(2,5/2,3)	0.281
AB	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(1,1,1)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(1/3,2/5,1/2)	(2/3,1,3/2)	0.031
D	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(5/2,3,7/2)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2/3,1,3/2)	(5/2,3,7/2)	0.170
J	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(5/2,3,7/2)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2/3,1,3/2)	(5/2,3,7/2)	0.170
L	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(2,5/2,3)	(1,4/3,2)	(1,4/3,2)	(1,1,1)	(5/2,3,7/2)	0.137
H	(2/3,1,3/2)	(1/3,2/5,1/2)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(1,1,1)	0.094

TAB. 3.15 – Poids basés sur AHP floue pour six critères en fonction de flux interactif

Critères	CB	S	AB	D	J	L	Poids
CB	(1,1,1)	(2/3,1,3/2)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	0.131
S	(2/3,1,3/2)	(1,1,1)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)	0.310
AB	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(1,1,1)	(2/3,1,3/2)	(2/3,3/4,1)	(2/3,1,3/2)	0.101
D	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(2/3,1,3/2)	(1,1,1)	(3,7/2,4)	(1,1,1)	0.201
J	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(1,4/3,2)	(1,4,2/7,1/3)	(1,1,1)	(1/4,2/7,1/3)	0.055
L	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(2/3,1,3/2)	(1,1,1)	(3,7/2,4)	(1,1,1)	0.201

TAB. 3.16 – Poids basés sur AHP floue pour sept critères en fonction de flux interactif

	CB	S	AB	D	J	L	H	Poids
CB	(1,1,1)	(2/3,1,3/2)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/3,1,3/2)	0.118
S	(2/3,1,3/2)	(1,1,1)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)	(2,5/2,3)	0.281
AB	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(1,1,1)	(2/3,1,3/2)	(2/3,3/4,1)	(2/3,1,3/2)	(5/2,3,7/2)	0.092
D	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(2/3,1,3/2)	(1,1,1)	(3,7/2,4)	(1,1,1)	(5/2,3,7/2)	0.183
J	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(1,4/3,2)	(1,4,2/7,1/3)	(1,1,1)	(1/4,2/7,1/3)	(5/2,3,7/2)	0.050
L	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(2/3,1,3/2)	(1,1,1)	(3,7/2,4)	(1,1,1)	(5/2,3,7/2)	0.183
H	(2/3,1,3/2)	(1/3,2/5,1/2)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(1,1,1)	0.094

### 3.4.2.4 Elicitation de poids : services streaming

Le tableau 3.17 montre les poids accordés aux différents critères sans prendre en considération le critère historique de performance (H). Le tableau 3.18 représente le degré d'importance associé aux différents critères en prenant en considération le critère H.

TAB. 3.17 – Poids basés sur AHP floue pour six critères en fonction de flux streaming

Critères	CB	S	AB	D	J	L	Poids
CB	(1,1,1)	(2/3,1,3/2)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	0.131
S	(2/3,1,3/2)	(1,1,1)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)	0.310
AB	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(1,1,1)	(5/2,3,7/2)	(2/3,3/4,1)	(2/3,3/4,1)	0.195
D	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(2/7,1/3,2/5)	(1,1,1)	(1/2,2/3,1)	(2/5,1/2,2/3)	0.047
J	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(1,4/3,2)	(1,3/2,2)	(1,1,1)	(2/3,3/4,1)	0.149
L	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(1,4/3,2)	(3/2,2,5/2)	(1,4/3,2)	(1,1,1)	0.168

TAB. 3.18 – Poids basés sur AHP floue pour sept critères en fonction de flux streaming

	CB	S	AB	D	J	L	H	Poids
CB	(1,1,1)	(2/3,1,3/2)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/3,1,3/2)	0.118
S	(2/3,1,3/2)	(1,1,1)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)	(2,5/2,3)	0.281
AB	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(1,1,1)	(5/2,3,7/2)	(2/3,3/4,1)	(2/3,3/4,1)	(5/2,3,7/2)	0.177
D	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(2/7,1/3,2/5)	(1,1,1)	(1/2,2/3,1)	(2/5,1/2,2/3)	(5/2,3,7/2)	0.043
J	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(1,4/3,2)	(1,3/2,2)	(1,1,1)	(2/3,3/4,1)	(5/2,3,7/2)	0.135
L	(5/2,3,7/2)	(1,3/2,2)	(1,4/3,2)	(3/2,2,5/2)	(1,4/3,2)	(1,1,1)	(5/2,3,7/2)	0.153
H	(2/3,1,3/2)	(1/3,2/5,1/2)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(1,1,1)	0.094

## 3.4.3 Simulations et résultats

### 3.4.3.1 Scénario de simulation

Dans le but de mettre en évidence l'efficacité de notre algorithme hybride [75] proposé pour la sélection du réseau, nous comparons les performances des deux algorithmes suivants :

- TOPSIS : il représente l'algorithme classique pour la sélection du réseau basé sur la méthode AHP floue et TOPSIS. En plus, cet algorithme ne prend pas en considération le critère de l'historique (son degré d'importance est nul).
- H-TOPSIS : il représente notre algorithme hybride pour la sélection du réseau. Cet algorithme combine aussi la méthode AHP floue et TOPSIS, et il prend en considération le critère de l'historique pour mémoriser la performance de l'interface réseau.

Nous utilisons le même scénario de simulation proposé dans la section 3.3.4.1. Nous envisageons quatre simulations afin d'évaluer et comparer ces deux algorithmes pour les quatre types de services. Pour chaque type de service, l'évaluation de performance se focalise sur les deux paramètres l'anomalie de classement et le nombre de handoffs.

#### 3.4.3.2 La simulation 1

Afin de comparer la performance de notre algorithme hybride H-TOPSIS par rapport à l'algorithme TOPSIS, nous analysons le service en arrière-plan dans cette simulation.

- **L'anomalie de classement** : la figure 3.14 montre le taux moyen de l'anomalie de classement effectué par les deux algorithmes TOPSIS et H-TOPSIS dans 50 points de décisions. Nous constatons que la meilleure performance de l'anomalie de classement est donnée par notre solution H-TOPSIS. Avec cette dernière, nous pouvons minimiser le risque d'avoir cette anomalie à 45% pour le flux arrière-plan. Tandis que la solution classique TOPSIS permet d'obtenir une valeur de 60%.

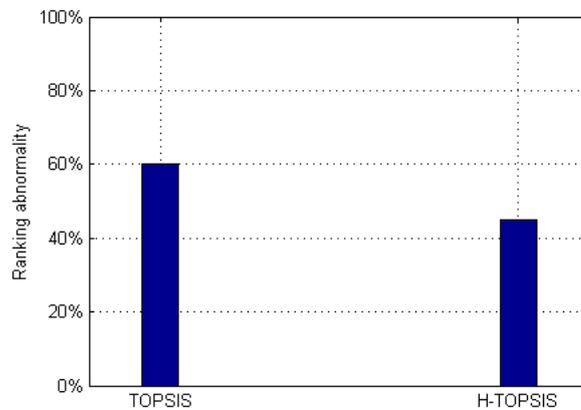


FIG. 3.14 – Taux moyen de l'anomalie de classement basé sur H-TOPSIS pour arrière-plan

- **Le nombre de handoffs** : la figure 3.15 représente le taux moyen qui correspond au nombre de handoffs effectué par les deux algorithmes TOPSIS et H-TOPSIS dans 50 points de décision. Nous pouvons observer que notre technique permet de réduire ce problème à 30%. Par contre l'algorithme TOPSIS fournit une valeur de 50%. En conclusion, notre solution H-TOPSIS fournit une meilleure performance du nombre de handoffs par rapport à l'algorithme TOPSIS.

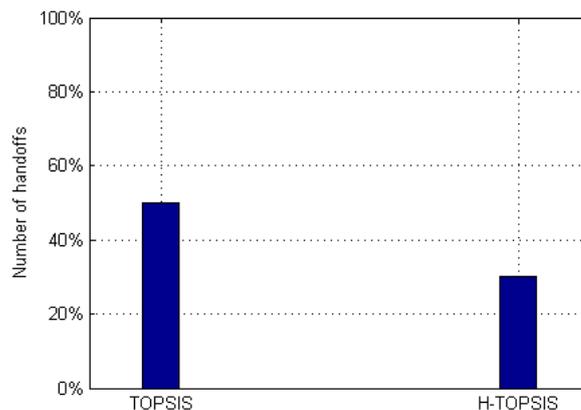


FIG. 3.15 – Taux moyen du nombre de handoffs basé sur H-TOPSIS pour arrière-plan

### 3.4.3.3 La simulation 2

En vue de comparer la performance de notre solution H-TOPSIS par rapport à l'algorithme classique TOPSIS, nous analysons le flux conversationnel dans cette simulation.

- **L'anomalie de classement** : la figure 3.16 représente le taux moyen de l'anomalie de classement pour les deux algorithmes TOPSIS et H-TOPSIS dans 50 points de décision. Nous pouvons observer que notre solution H-TOPSIS permet de réduire ce problème à 12%. Par contre, l'algorithme TOPSIS fournit une valeur de 15%. Nous pouvons déduire que notre technique donne une meilleure performance concernant l'anomalie du classement par rapport à l'algorithme TOPSIS pour le flux conversationnel.

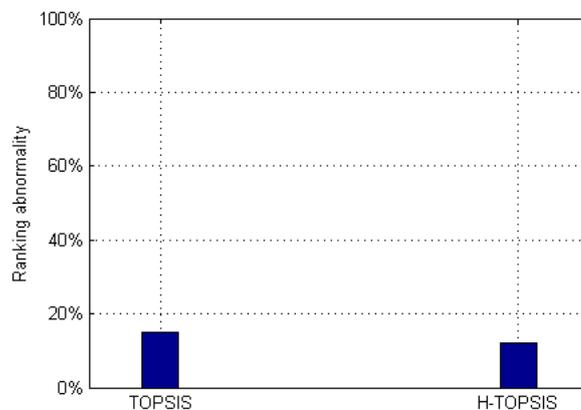


FIG. 3.16 – Taux de l'anomalie de classement basé sur H-TOPSIS pour le conversationnel

- **Le nombre de handoffs** : la figure 3.17 montre le taux moyen qui correspond au nombre de handoffs effectué par les deux algorithmes TOPSIS et H-TOPSIS dans 50 points de décision. Nous pouvons observer que la meilleure performance du nombre de handoffs est donnée par notre solution H-TOPSIS. Avec cette dernière, nous pouvons minimiser le risque d'avoir ce problème à 40% pour le flux conversationnel. Tandis que l'algorithme TOPSIS réduit le nombre de handoffs d'une valeur de 60%.

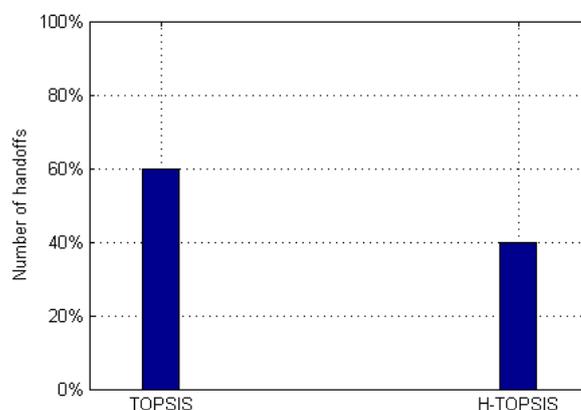


FIG. 3.17 – Nombre de handoffs basé sur H-TOPSIS pour le flux conversationnel

### 3.4.3.4 La simulation 3

La troisième simulation vise à analyser le service interactif pour évaluer la performance de notre technique H-TOPSIS par rapport à l'algorithme TOPSIS.

- **L'anomalie de classement** : la figure 3.18 montre le taux moyen de l'anomalie de classement effectué par les deux algorithmes TOPSIS et E-TOPSIS dans 50 points de décision. Nous pouvons observer que la meilleure performance de l'anomalie de classement est fournie par notre technique H-TOPSIS. Celle-ci nous permet de réduire le risque d'avoir cette anomalie à 25%. Par contre, l'algorithme TOPSIS fournit une valeur de 30%.

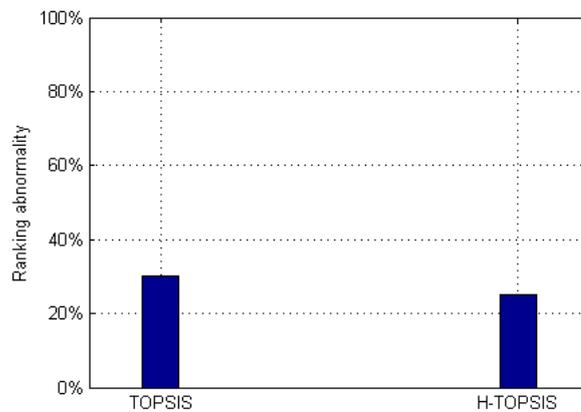


FIG. 3.18 – Taux moyen de l'anomalie de classement basé sur H-TOPSIS pour interactif

- **Le nombre de handoffs** : la figure 3.19 montre le taux moyen qui correspond au nombre de handoffs concernant les deux algorithmes TOPSIS et H-TOPSIS dans 50 points de décision. D'après cette figure, notre technique permet de réduire le nombre de handoffs à 40%. Par contre, l'algorithme TOPSIS minimise le risque d'avoir ce problème d'une valeur de 70%. Nous pouvons déduire que notre solution fournit une meilleure performance du nombre de handoffs par rapport à l'algorithme TOPSIS.

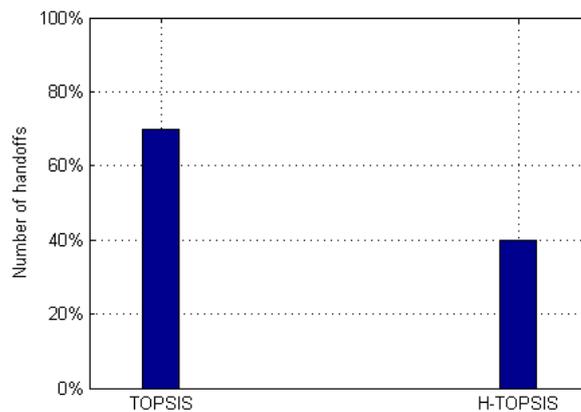


FIG. 3.19 – Taux moyen du nombre de handoffs basé sur H-TOPSIS pour le flux interactif

### 3.4.3.5 La simulation 4

La dernière simulation consiste à évaluer la performance de notre technique H-TOPSIS par rapport à la solution classique TOPSIS pour le flux streaming.

- **L'anomalie de classement** : la figure 3.20 montre le taux moyen de l'anomalie de classement effectué par les deux algorithmes TOPSIS et H-TOPSIS dans 50 points de décision. Nous pouvons observer que la meilleure performance de l'anomalie de classement est donnée par notre solution H-TOPSIS pour le flux streaming. La technique proposée H-TOPSIS minimise le risque d'avoir cette anomalie à 20%. Par contre, l'algorithme classique TOPSIS permet d'obtenir une valeur de 25%.

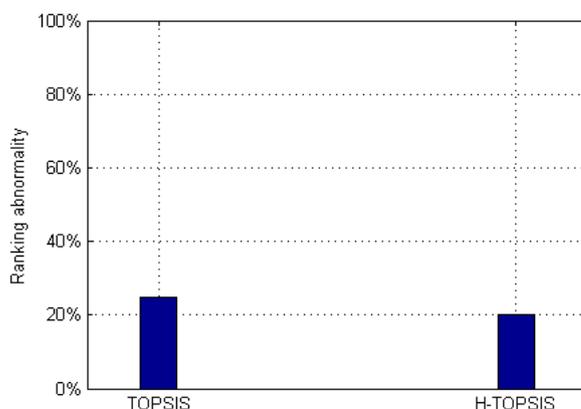


FIG. 3.20 – Taux moyen de l'anomalie de classement basé sur H-TOPSIS pour streaming

- **Le nombre de handoffs** : la figure 3.21 représente le taux moyen du nombre de handoffs effectué par les deux algorithmes TOPSIS et H-TOPSIS dans 50 points de décision. Nous pouvons observer que notre technique E-TOPSIS minimise ce problème à 20%. Par contre, l'algorithme TOPSIS réduit le le nombre de handoffs d'une valeur de 40%. Nous pouvons déduire que notre solution H-TOPSIS permet d'obtenir une meilleure performance concernant le nombre de handoffs par rapport à l'algorithme TOPSIS.

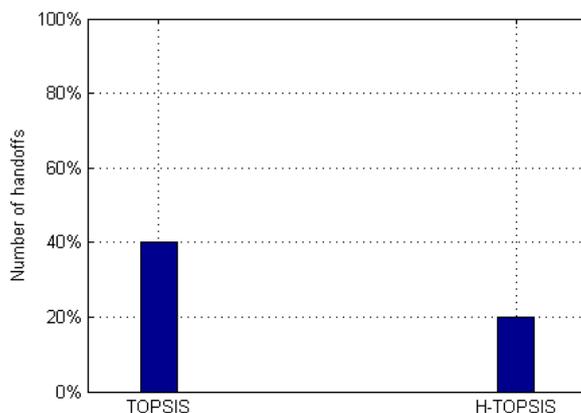


FIG. 3.21 – Taux moyen du nombre de handoffs basé sur H-TOPSIS pour streaming

## 3.4.4 Discussion

Nous avons fourni un algorithme hybride appelé H-TOPSIS, pour la sélection de réseau. Cet algorithme proposé repose sur deux méthodes MADM qui sont : AHP floue et TOPSIS. Dans un premier temps, la méthode AHP floue est utilisée pour l'affectation de poids pour chaque critère. Dans un deuxième temps, la méthode TOPSIS est appliquée pour classer les alternatives réseaux. De plus, notre algorithme H-TOPSIS a introduit un nouveau critère appelé historique de performance. Ce dernier permet de mémoriser la performance de chaque interface réseau accessible pour le terminal mobile.

L'analyse des résultats fournis par les quatre simulations que nous avons effectuées nous a permis de constater que le taux moyen de l'anomalie du classement fourni par notre algorithme H-TOPSIS est réduit par rapport à celui donné par l'algorithme classique TOPSIS. De même, le taux moyen concernant le nombre de handoffs donné par l'algorithme H-TOPSIS est réduit par rapport à la valeur fournie par l'algorithme TOPSIS. Cette réduction est due au fait que l'algorithme proposé H-TOPSIS prend en considération la performance de l'interface réseau à travers le critère historique de performance.

Par conséquent, notre algorithme hybride H-TOPSIS permet au terminal mobile d'avoir une meilleure performance en termes d'anomalie de classement et du nombre de handoffs par rapport à l'algorithme classique TOPSIS.

Comme perspective de ce travail, nous envisageons d'introduire le critère historique de performance dans la méthode E-TOPSIS afin de réduire l'anomalie de classement et le nombre de handoffs.

## 3.5 Une nouvelle architecture pour la sélection du réseau

### 3.5.1 Introduction

Après avoir proposé deux contributions E-TOPSIS [82] et H-TOPSIS [75] pour l'optimisation de la sélection du réseau qui peuvent fournir une meilleure performance par rapport à l'algorithme classique TOPSIS, la question qu'on peut poser est la suivante : est-ce que ces deux solutions représentent les stratégies idéales qui répondent aux exigences de l'utilisateur mobile en terme de qualité de service ? Malheureusement, la réponse est négative, vu que le taux moyen relatif au nombre de handoffs ainsi que l'anomalie du classement reste encore élevé, ce qui peut conduire à la dégradation de la qualité du service lors de l'exécution du processus du handover vertical. A titre d'exemple, l'autonomie de la batterie du terminal mobile peut être épuisée rapidement suite à l'exécution du handover d'une façon successive.

Les deux contributions proposées se basent sur la distance euclidienne. Cette dernière représente le facteur majeur qui peut impliquer l'anomalie du classement et le nombre élevé du handover. De plus, nous avons utilisé les deux méthodes de pondération AHP et AHP floue respectivement dans la première et la deuxième contribution. Cependant, ces méthodes ne prennent pas en compte l'hétérogénéité des critères de la sélection. Ce qui, alors, influence les valeurs accordées aux différents critères.

Notre objectif dans cette troisième contribution est d'assurer une meilleure qualité de service pour le terminal mobile lors de l'exécution du handover vertical. Pour ce faire, notre proposition apporte une solution au problème de la distance euclidienne en développant une nouvelle méthode à l'aide de la décision multi-attributs qui n'utilise pas cette distance. De plus, notre solution proposée permet d'améliorer les méthodes de pondération AHP, et AHP floue, en utilisant un nouveau système de pondération qui regroupe les critères en classes homogènes.

### 3.5.2 Un nouveau schéma pour la sélection du réseau

La figure 3.22 montre le schéma qui représente le noyau de notre nouvelle architecture [73] [88] consacrée à la sélection du réseau. Le premier avantage de cette stratégie réside dans sa capacité de pallier aux inconvénients des algorithmes de handover qui sont basés sur l'approche MADM. Son autre avantage est le fait qu'elle représente une solution simple à intégrer dans le protocole IEEE 802.21. Nous signalons que notre schéma a été conçu et développé en nous basant sur le prototype de la norme IEEE 802.21.

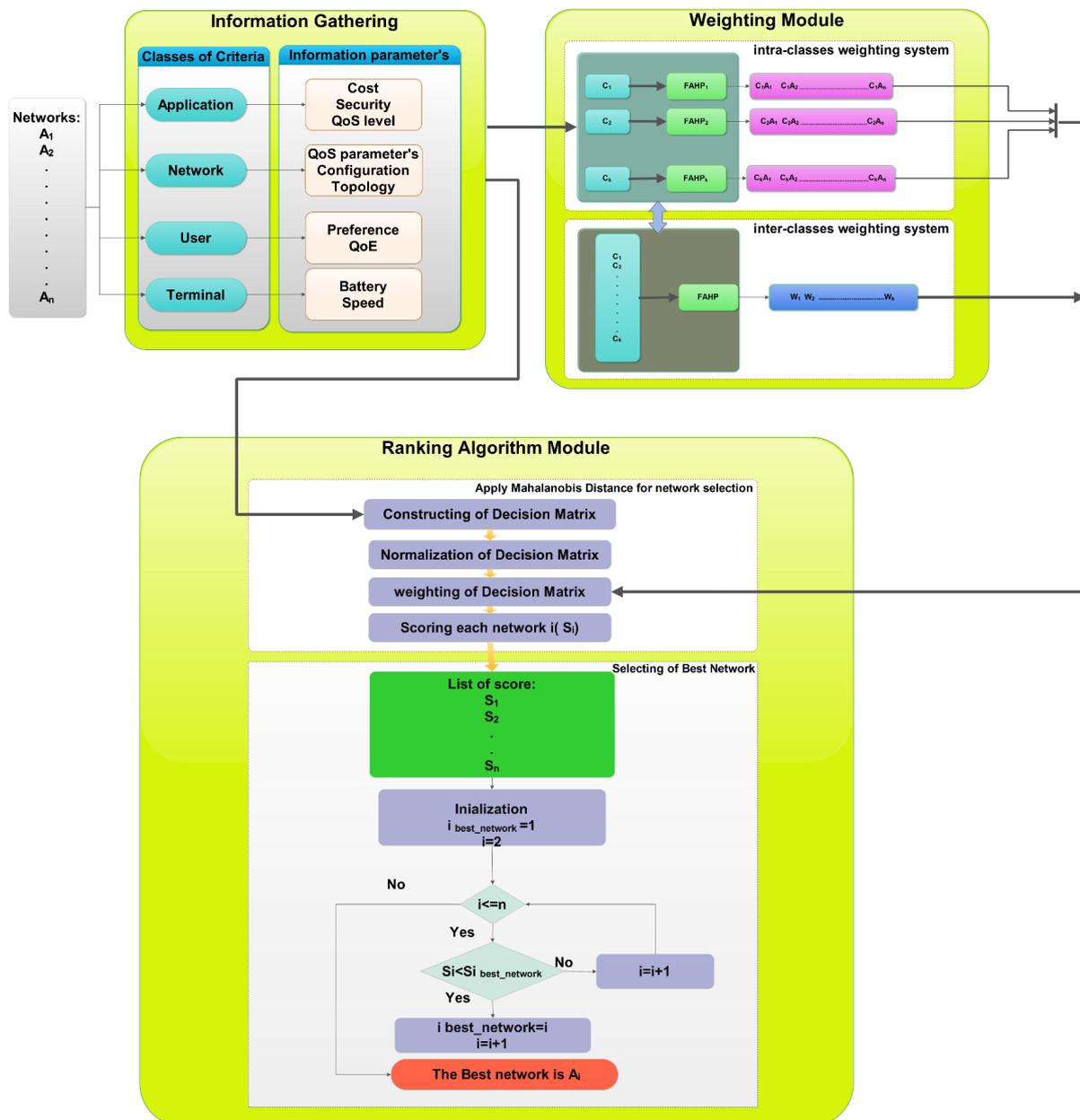


FIG. 3.22 – Schéma du principe du modèle proposé pour la sélection de réseau

### 3.3.5 Une nouvelle architecture pour la sélection du réseau

En effet, notre architecture [88] proposée pour la sélection du réseau est constituée de deux modules. Le premier module est un système de pondération efficace, capable d'améliorer les méthodes AHP et AHP floue. Ce module a pour rôle de regrouper les critères en classes homogènes. Autrement dit, les critères qui ont la même unité de mesure, ou qui sont corrélés entre eux, seront regroupés dans la même classe. Ensuite, la méthode AHP floue (ou AHP) sera appliquée pour accorder des poids pour chaque critère de chaque classe. Le deuxième module représente une nouvelle méthode MADM que nous avons développée afin de classer les alternatives réseaux. L'idée de base de cette nouvelle méthode de classement consiste à remplacer la distance euclidienne par la distance de Mahalanobis. Ainsi, à la différence de la distance euclidienne où tous les attributs des alternatives sont traités de la même façon, la distance de Mahalanobis accorde un poids aux différents attributs. L'utilisation de cette distance porte un troisième avantage, vu qu'elle prend en compte la corrélation entre les attributs. Le principe de fonctionnement de notre schéma est simple. Après avoir collecté les informations des critères de la sélection, lors de la première étape, le premier module est utilisé pour la pondération de critères d'une manière subjective. Ensuite, le deuxième module sera utilisé pour calculer la performance de chaque interface réseau accessible pour le terminal mobile. Puis, ce score sera utilisé pour déterminer la meilleure technologie réseau qu'il faut utiliser par le terminal mobile. Dans ce qui suit, nous détaillons le principe de fonctionnement de chaque module de notre architecture.

#### 3.5.2.1 Module de pondération basé sur la classification de critères

Étant donné que  $A$  est un ensemble d'ordre  $N$  des alternatives correspondant aux réseaux accessibles pour un terminal mobile.

$$A = \{A_i \text{ avec } i = 1, 2, \dots, N\}. \quad (3.2)$$

Ensuite, on considère  $P$  un ensemble fini d'ordre  $M$  des paramètres utilisés dans la phase de la sélection réseau.

$$P = \{P_j \text{ avec } j = 1, 2, \dots, M\}. \quad (3.3)$$

On construit  $k$  classes homogènes  $C_k$  à partir de l'ensemble  $P$  telles que :

$$P = \bigcup_{i=1}^k C_i \text{ et } C_i \cap C_j = \emptyset \text{ si } i \neq j \quad (3.4)$$

Où  $C_i = \{P_k, P_k \in P \text{ et } k = 1 \dots M\}$

L'homogénéité est assurée par les deux caractéristiques suivantes :

- La même unité de mesure.
- La corrélation entre les critères.

Le module de pondération contient un système de pondération intra-classes et un autre inter-classes. La sortie du module de pondération est un vecteur de poids qui correspond au degré d'importance de chaque critère pour chaque alternative réseau. Ce vecteur de sortie est calculé en combinant les deux systèmes intra-classes et inter-classes. Le principe de fonctionnement de ces deux systèmes est le suivant :

1. **Le système de pondération intra-classes** : pour chaque classe  $C_i$ , la méthode AHP floue est appliquée pour générer un vecteur de poids  $WC_i$  pour chaque alternative  $A_i$ . Le vecteur de poids  $WC_i$  contient le degré d'importance associé à chaque critère appartenant à cette classe. L'expression de ce vecteur est définie de la façon suivante :

$$WC_i = [C_iA_1, C_iA_2, \dots, C_iA_n], i = 1, \dots, k. \quad (3.5)$$

2. **Le système de pondération inter-classes** : ce système permet de fournir le degré d'importance relatif à chaque classe en utilisant la méthode AHP floue. Pour chaque classe homogène  $C_i$  on obtient un poids  $W_i$ . Le vecteur de poids de toutes les classes est défini par :

$$W = [W_1, W_2, \dots, W_k] \text{ avec } \sum_{i=1}^k W_i = 1 \quad (3.6)$$

La combinaison de différents vecteurs de chaque classe permet de construire la matrice de décision NW. Cette combinaison repose sur la multiplication de chaque vecteur  $WC_i$  par le vecteur  $W$ . La matrice de décision NW est donnée sous la forme suivante :

$$NW = \begin{pmatrix} W_1 * C_1A_1 & W_2 * C_2A_1 & \dots & W_k * C_kA_1 \\ W_1 * C_1A_2 & W_2 * C_2A_2 & \dots & W_k * C_kA_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_1 * C_1A_n & W_2 * C_2A_n & \dots & W_k * C_kA_n \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

Nous signalons que chaque ligne de cette matrice correspond à un vecteur de poids de différents critères pour un réseau donné.

### 3.5.2.2 Module de classement basé sur la distance de Mahalanobis

La distance de Mahalanobis est une métrique pour mesurer la distance, proposée par P.C. Mahalanobis en 1936 [27]. Cette métrique joue un rôle primordial dans plusieurs domaines [95] tels que : la statistique, l'analyse de données, le traitement d'image, etc. Contrairement à la distance euclidienne où toutes les composantes des vecteurs sont traitées de la même façon, la distance de Mahalanobis accorde un poids relatif à chaque composant. Donc, toutes les composantes des vecteurs ne sont pas traitées de la même façon. L'autre avantage apporté par cette métrique par rapport à la distance classique euclidienne est le fait qu'elle tient en compte la corrélation entre toutes les composantes des vecteurs. Pour cette raison, elle est largement utilisée pour déterminer la cohérence ou la similarité des données fournies.

Soit  $S$  une matrice de covariance pour un vecteur à plusieurs variables  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ . La distance de Mahalanobis d'une série de valeurs de moyenne  $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)^T$  est définie comme suit :

$$D_M(x) = (x - \mu)^T * S^{-1} * (x - \mu) \quad (3.8)$$

Avec  $S^{-1}$  représente la matrice de covariance inverse.

En revanche, dans le contexte de la sélection du réseau, vu les avantages fournis par la distance de Mahalanobis, ainsi que notre motivation de surmonter les inconvénients des algorithmes classiques, nous avons développé une nouvelle méthode de classement MADM qui repose sur cette métrique. Nous l'avons appelé l'algorithme de Mahalanobis. Ce dernier permet au terminal mobile de sélectionner dynamiquement la meilleure interface. De plus, il améliore les

### 3.3.5 Une nouvelle architecture pour la sélection du réseau

limitations de MADM en terme d'anomalie de classement, de nombre de handoffs et de précision dans l'identification de classement.

L'algorithme de Mahalanobis repose sur le principe de l'algorithme classique TOPSIS. En effet, si la méthode TOPSIS utilise la distance euclidienne à  $m$  dimensions, notre algorithme Mahalanobis utilise la distance de Mahalanobis pour calculer la distance entre chaque alternative  $A_i$  et la matrice de décision normalisée. La meilleure solution correspond au réseau qui a la plus courte distance fournie par notre algorithme. La procédure pour utiliser notre algorithme Mahalanobis contient les six étapes suivantes :

1. Construire la matrice de décision : dans cette étape, la construction de la matrice de décision se fait de la même façon que l'équation 2.1.
2. Normaliser la matrice de décision : chaque élément  $r_{ij}$  est calculé via la normalisation euclidienne ou Max-Min.
3. Pondérer la matrice de décision normalisée : le calcul de la matrice pondérée se base sur l'équation 2.4.
4. Calculer la distance de Mahalanobis pour chaque alternative  $A_i$  : cette valeur peut être calculée en utilisant l'équation 3.8. Elle est exprimée sous la forme suivante :

$$D_M(A_i) = [D_{i1}, \dots, D_{im}] \quad (3.9)$$

5. Calculer le score global pour chaque alternative  $A_i$  : la valeur de score est donnée par la moyenne arithmétique du vecteur obtenu dans l'étape précédente ((Eq. (3.9)) :

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^m D_{ij}}{m} \quad (3.10)$$

6. Ranger les alternatives : les alternatives réseaux sont ordonnées en fonction des valeurs croissantes de  $C_i$

### 3.5.3 L'algorithme de sélection du réseau basé sur notre schéma (FADM)

Après avoir exploré le principe de fonctionnement de chaque module qui intervient dans notre schéma proposé pour la sélection du réseau, nous présentons dans cette section, notre nouvel algorithme du handover appelé FADM (Fuzzy AHP Combined with Distance of Mahalanobis) [88] qui combine les deux modules. Afin de choisir une meilleure solution pour la sélection du réseau qui peut contourner les limites des algorithmes classiques, notre algorithme FADM se déroule comme suit :

1. Construire le modèle hiérarchique en appliquant notre module de pondération : en effet, avec l'utilisation de notre système de pondération, la hiérarchie classique définie par la méthode AHP dans la figure 3.3 est transformée sous la forme d'une autre hiérarchie illustrée par la figure 3.23. Cette nouvelle hiérarchie contient deux niveaux. Le premier représente trois classes homogènes : classe 1, classe 2 et classe 3. Le deuxième niveau de la hiérarchie contient les critères qui représentent les éléments de chaque classe. La bande passante disponible, la gigue, le délai et le taux de perte constituent les quatre critères de la classe 1, tandis que la sécurité et le coût de service appartiennent respectivement à la classe 2 et la classe 3.
2. Assigner un vecteur du poids pour le premier niveau de la hiérarchie : la méthode floue AHP est utilisée pour calculer le degré d'importance pour chaque classe (pondération inter-classe).

3. Assigner un vecteur du poids pour le deuxième niveau de la hiérarchie : la méthode AHP floue est utilisée pour associer un poids pour chaque critère appartenant à la même classe (pondération intra-classe).
4. Attribuer un poids définitif à chaque critère : le poids accordé à chaque critère est calculé en multipliant le poids obtenu à travers la pondération intra-classe par le degré d'importance qui correspond à la classe à laquelle appartient le critère.
5. Appliquer l'algorithme de Mahalanobis : cet algorithme de classement (deuxième module) est utilisé pour calculer le score de performance  $C_i$  (Eq. (3.10)) pour chaque alternative réseau.
6. Choisir la meilleure alternative réseau qui correspond à la plus petite valeur du score  $C_i$ .

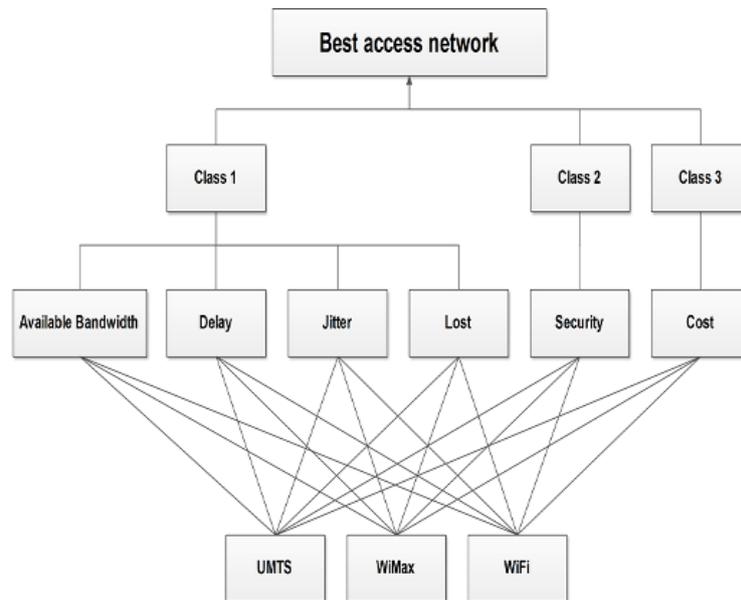


FIG. 3.23 – Hiérarchie de la méthode AHP floue basée sur la classification de critères

## 3.5.4 Simulations et résultats

### 3.5.4.1 Scénario de simulation

Pour montrer l'efficacité de ce nouvel algorithme de décision FADM [88] dans le cadre d'optimisation de la sélection du réseau, nous présentons dans cette section les résultats obtenus en comparant les performances de quatre algorithmes qui sont FADM, TOPSIS, GRA et DIA. L'environnement de simulation contient six réseaux : deux technologies cellulaires : UMTS1 et UMTS2, deux technologies WLANS : WLAN1 et WLAN2 et deux technologies WMANS : WIMAX1 et WIMAX2. Nous considérons également six attributs associés à cet environnement hétérogène : la bande passante disponible (AB), la sécurité (S), le coût de service (CB), la gigue (J), le délai (D) et le taux de perte (L). Les valeurs de ces critères sont générées selon l'intervalle indiquée pour chaque critère dans le tableau 3.19.

Pour prouver l'utilité d'introduire notre système de pondération basé sur la classification de critères, ainsi que l'importance du nouvel algorithme de classement qui repose sur la distance de Mahalanobis, nous effectuons trois simulations. Dans la première simulation, la méthode

### 3.3.5 Une nouvelle architecture pour la sélection du réseau

AHP est utilisée pour accorder un poids aux différents critères pour les quatre algorithmes de décision FADM, TOPSIS, GRA et DIA. La deuxième simulation consiste à introduire notre système de pondération en remplaçant la méthode AHP. Ce système de pondération utilise la méthode AHP dans le but d'affecter un degré d'importance aux différents critères. Finalement, dans la troisième simulation, le module de pondération basé sur la méthode AHP floue est appliqué pour calculer le poids relatif à chaque critère.

TAB. 3.19 – Performances des attributs pour les réseaux candidats

criteria network	CB (%)	S (%)	AB (mbps)	D (ms)	J (ms)	L (per10 <sup>6</sup> )
UMTS1	60	70	0.1-2	25-50	5-10	20-80
UMTS2	80	90	0.1-2	25-50	5-10	20-80
WLAN1	10	50	1-11	100-150	10-20	20-80
WLAN2	5	50	1-11	100-150	10-20	20-80
WIMAX1	50	60	1-60	60-100	3-10	20-80
WIMAX2	40	60	1-60	60-100	3-10	20-80

L'objectif de ces simulations est de calculer le taux moyen de l'anomalie de classement et le nombre de handoffs fournis par ces quatre algorithmes afin de comparer leurs performances. Pour ce faire, dans chaque simulation, nous avons exécuté chaque algorithme de décision dans 100 points de décision pour les quatre classes de services que nous avons déjà citées. Les résultats de ces quatre simulations sont présentés dans ce qui suit :

#### 3.5.4.2 La simulation 1

Dans cette simulation, nous analysons les quatre types de flux arrière-plan, conversationnel, interactif et streaming afin d'effectuer une comparaison des performances entre les algorithmes FADM, TOPSIS, GRA, et DIA. Les caractéristiques de chaque type de service sont prises en considération lorsqu'on calcule le poids de chaque critère en appliquant la méthode classique AHP. Les différentes valeurs de poids accordées à chaque critère selon la nature de service délivré à l'utilisateur sont illustrées par la figure 3.24.

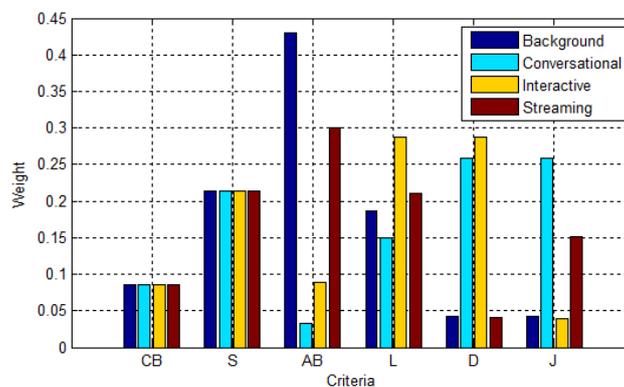


FIG. 3.24 – Degré d'importance en utilisant la méthode classique AHP

- L'anomalie de classement** : la figure 3.25 montre que notre algorithme FADM réduit le risque d'avoir le problème d'anomalie de classement à une valeur de 18%, 15%, 20% et 27% respectivement pour les quatre types de flux arrière-plan, conversationnel, interactif et streaming. D'une part, nous observons que la méthode GRA permet d'obtenir les valeurs de l'ordre de 20%, 18%, 25% et 30% respectivement aussi pour les quatre types de flux arrière-plan, conversationnel, interactif et streaming.

D'autre part, la méthode DIA permet de minimiser cette anomalie de 30% pour le flux arrière-plan, 27% pour le flux conversationnel, 33% pour le flux interactif et 30% pour le flux streaming. Finalement, la méthode TOPSIS fournit la plus grande valeur par rapport aux trois algorithmes FADM, GRA et DIA.

En somme, nous constatons que la meilleure performance de l'anomalie de classement est donnée par notre algorithme FADM, tandis que la mauvaise performance est fournie par la méthode TOPSIS.

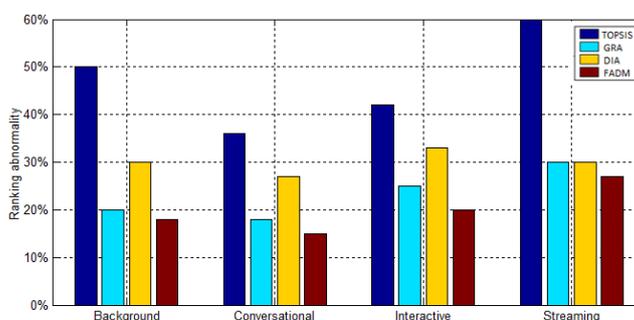


FIG. 3.25 – Variation de l'anomalie de classement des algorithmes basés sur AHP

- Le nombre de handoffs** : la figure 3.26 montre que les deux algorithmes FADM et DIA diminuent le problème du nombre de handover avec les mêmes valeurs de 33% et 41.67% respectivement pour les deux types de services arrière-plan et streaming. Pour les deux autres types de flux conversationnel et interactif, avec l'algorithme FADM, le risque d'avoir ce problème se limite à une valeur de 50% pour le premier et avec une valeur 60% pour le deuxième flux.

D'autre part, la méthode DIA réduit le risque à une valeur de 60% pour le flux conversationnel et à une valeur de 80% pour le flux interactif. En outre la méthode GRA réduit ce problème à une valeur de 80%, 60%, 60% et 70% respectivement pour les quatre types de flux : arrière-plan, conversationnel, interactif et streaming. Enfin, la méthode TOPSIS permet de réduire le risque d'une valeur de 70% pour le flux arrière-plan, de 80% pour le flux conversationnel, de 70% pour le flux interactif et de 60% pour le flux streaming.

Nous pouvons déduire que pour tous les types de services, notre algorithme de décision FADM fournit la meilleure performance concernant le nombre de handoffs par rapport aux autres algorithmes GRA, DIA et TOPSIS. Ces résultats sont dus à l'efficacité de la distance de Mahalanobis.

### 3.3.5 Une nouvelle architecture pour la sélection du réseau

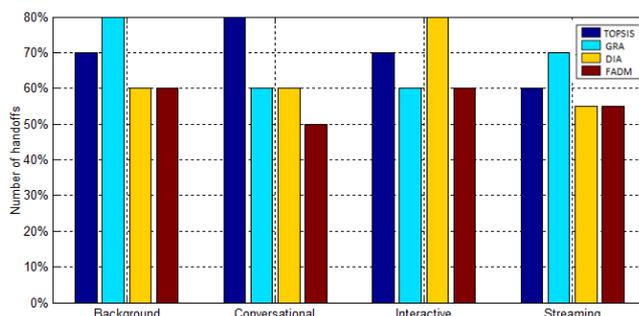


FIG. 3.26 – Variation de nombre de handoffs des algorithmes basés sur AHP

#### 3.5.4.3 La simulation 2

Dans cette simulation, nous proposons une amélioration des résultats obtenus dans la première simulation en ciblant l'inconvénient de l'hétérogénéité des critères qui n'est pas résolu par la méthode AHP. Pour y aboutir, nous appliquons notre schéma fondé sur deux systèmes de pondération inter-classes et intra-classes. Ces deux systèmes reposent sur la méthode AHP pour attribuer un poids à chaque critère.

Pour chaque type de service, les différentes valeurs de poids accordées à la classe1, la classe2 et la classe3 en utilisant le système de pondération inter-classes sont explorées dans le tableau 3.20. En plus, pour chaque classe, on applique le système de pondération intra-classes afin de calculer le degré d'importance de chaque critère de cette classe. Nous signalons qu'il y a un seul critère dans la classe 2 et la classe 3. Par conséquent, le poids affecté à ce critère dans les deux classes est égal à 1. La classe 1 contient quatre critères. Les valeurs de poids obtenues pour ces critères en fonction de type de flux sont illustrées dans le tableau 3.21. Enfin, les valeurs de poids affectées à chaque critère pour chaque type de service en combinant les deux systèmes de pondération sont représentées dans la figure 3.27.

TAB. 3.20 – Pondération inter-classes en utilisant la méthode AHP

La classe de trafic	Class1	Class2	Class3
Arrière-plan	0.582	0.303	0.115
Conversational	0.582	0.303	0.115
Interactif	0.582	0.303	0.115
Streaming	0.582	0.303	0.115

TAB. 3.21 – Pondération intra-classes pour la classe 1 en utilisant la méthode AHP

La classe de trafic	AB	D	J	L
Arrière-plan	0.230	0.059	0.059	0.652
Conversational	0.050	0.450	0.450	0.050
Interactif	0.165	0.165	0.045	0.625
Streaming	0.422	0.118	0.422	0.039

## CHAPITRE 3. UNE NOUVELLE ARCHITECTURE POUR LA SELECTION DE RESEAU

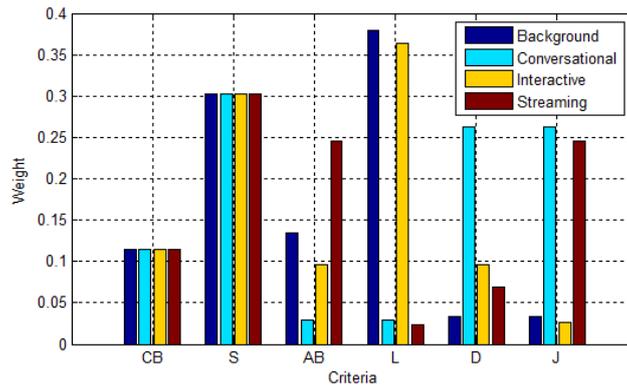


FIG. 3.27 – Degré d'importance en utilisant le module de pondération basé sur AHP

- L'anomalie de classement** : le taux moyen de l'anomalie de classement effectué par les quatre algorithmes pour chaque type de service est représenté dans la figure 3.28. On remarque que notre algorithme FADM permet de fournir les valeurs 15%, 12%, 18% et 25% respectivement pour les quatre types de flux : arrière-plan, conversationnel, interactif et streaming, tandis que la méthode GRA réduit cette anomalie à 20%, 15%, 20% et 35% respectivement aussi pour les services arrière-plan, conversationnel, interactif et streaming. Nous observons également que la méthode DIA fournit une valeur de 23% pour le flux arrière-plan, de 20% pour le flux conversationnel, de 30% pour le flux interactif et de 28% pour le flux streaming. La dernière remarque en ce qui concerne cette simulation est que la méthode TOPSIS fournit la plus grande valeur en fait de cette anomalie.

Nous pouvons déduire que la meilleure performance de l'anomalie de classement pour tous les types de flux est donnée par notre algorithme FADM. De plus, La mauvaise performance de l'anomalie de classement est donnée par la méthode TOPSIS.

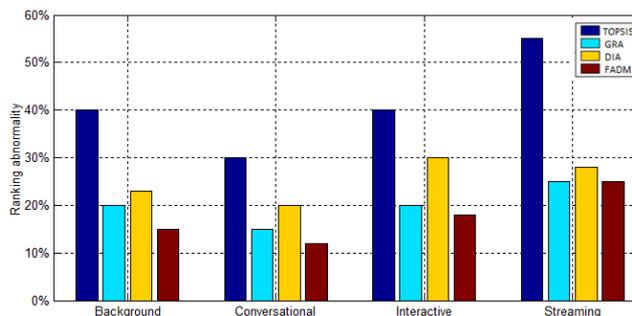


FIG. 3.28 – Anomalie de classement des algorithmes basés sur le module de pondération

- Le nombre de handoffs** : la figure 3.29 illustre le taux moyen du nombre de handoffs obtenus avec les différents algorithmes pour les quatre types de services. Nous observons que notre algorithme FADM diminue le risque d'avoir ce problème à une valeur de 50%, 45% , 60% et 50 % respectivement pour les quatre types de flux arrière-plan, conversationnel, interactif et streaming. Nous remarquons également que d'une part, la méthode DIA réduit ce risque d'une valeur à 55% pour le flux arrière-plan, à 50% pour le flux conversationnel, à 70% pour le flux interactif et à 52% pour le flux streaming. D'autre part, la méthode GRA réduit ce problème à une valeur de 70%, 55%, 60% et 65% respectivement pour les quatre types de

### 3.3.5 Une nouvelle architecture pour la sélection du réseau

flux arrière-plan, conversationnel, interactif et streaming. Enfin, la méthode TOPSIS fournit la valeur de 40% pour les deux types de services arrière-plan et interactif. Pour le flux conversationnel, elle fournit la valeur de 30% et pour le flux streaming elle donne la valeur 55%.

Du moment que toutes les valeurs fournies par notre algorithme FADM pour chaque type de service sont plus faibles que les valeurs issues des autres méthodes, nous pouvons déduire que notre algorithme fournit la meilleure performance par rapport aux autres algorithmes.

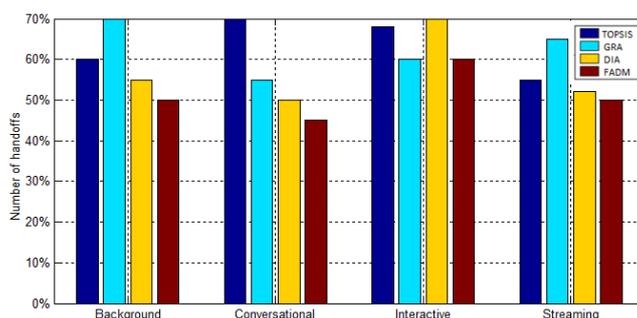


FIG. 3.29 – Nombre de handoffs des algorithmes basés sur le module de pondération

#### 3.5.4.4 La simulation 3

Cette simulation consiste à analyser la performance de notre algorithme de décision FADM dans le contexte où le schéma de pondération basé sur la méthode AHP floue est utilisé. Le fait d'introduire la méthode AHP floue au lieu de la méthode AHP dans les deux systèmes inter-classes et intra-classes rend notre schéma plus efficace. L'efficacité se traduit par les résultats obtenus dans les simulations.

En appliquant le système de pondération inter-classes pour les trois classes 1, 2 et 3, les valeurs de poids obtenues selon le type de service sont données dans le tableau 3.22. Le calcul de poids qui correspond à chaque critère de chaque classe se fait en utilisant le système de pondération intra-classes. Les différentes valeurs calculées pour la classe 1 en fonction du type de flux sont présentées dans le tableau 3.23, tandis que l'utilisation du système de pondération intra-classes pour la classe 1 et la classe 2 permet de fournir la valeur 1 pour le seul critère de chaque classe. En utilisant le module de pondération, le degré d'importance associé à chaque critère en respectant le type de service est représenté dans la figure 3.30.

TAB. 3.22 – Pondération inter-classes en utilisant la méthode AHP floue

Traffic class	Class1	Class2	Class3
Arrière-plan	0.559	0.310	0.131
Conversationnel	0.559	0.310	0.131
Interactif	0.559	0.310	0.131
Streaming	0.559	0.310	0.131

## CHAPITRE 3. UNE NOUVELLE ARCHITECTURE POUR LA SELECTION DE RESEAU

TAB. 3.23 – Pondération intra-classes pour la classe 1 en utilisant la méthode AHP floue

Traffic class	AB	D	J	L
Arrière-plan	0.717	0.052	0.074	0.158
Conversationnel	0.211	0.317	0.346	0.127
Interactif	0.278	0.350	0.131	0.241
Streaming	0.581	0.050	0.192	0.177

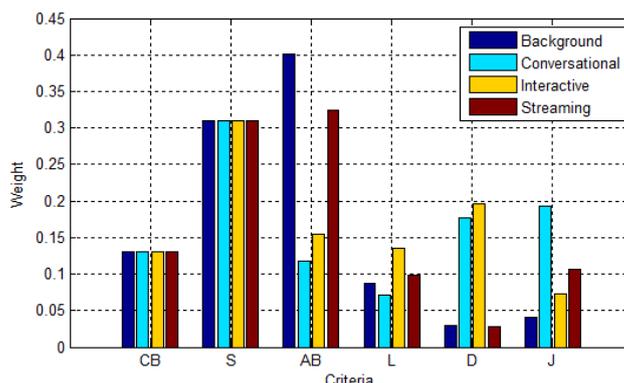


FIG. 3.30 – Degré d'importance en utilisant le module de pondération basé sur AHP floue

- L'anomalie de classement** : la figure 3.31 présente les résultats obtenus avec ces quatre algorithmes en simulant les quatre types de flux. Nous constatons que pour le flux arrière-plan les algorithmes TOPSIS, GRA, DIA et FADM permettent de réduire cette anomalie respectivement avec des valeurs de 17%, 12.50%, 20% et 10%. Nous pouvons constater également que pour le flux conversationnel ces quatre algorithmes fournissent respectivement les valeurs 25%, 12%, 18% et 9%. Pour le flux interactif, les quatre algorithmes que nous avons déjà cités, réduisent le risque, respectivement avec les valeurs de 36%, 25%, 28% et 17%. Enfin, pour le flux streaming, les algorithmes TOPSIS, GRA, DIA et FADM permettent d'obtenir respectivement les valeurs de 45%, 18%, 25% et 20%.

Vu que toutes les valeurs fournies par l'algorithme FADM sont plus faibles que les valeurs provenant des autres méthodes, nous pouvons déduire que notre algorithme fournit la meilleure performance par rapport aux autres algorithmes.

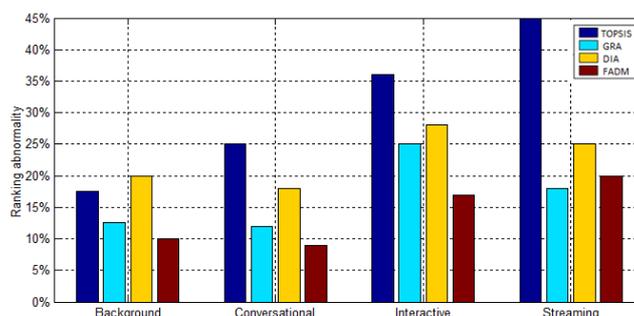


FIG. 3.31 – Anomalie de classement obtenus en utilisant le module de pondération floue

- Le nombre de handoffs** : la figure 3.32 présente une comparaison de la variation du nombre de handoffs effectués par le terminal mobile en fonction des quatre

### 3.3.5 Une nouvelle architecture pour la sélection du réseau

algorithmes. Nous pouvons remarquer que pour le flux arrière-plan les algorithmes TOPSIS, GRA, DIA et FADM permettent de minimiser le nombre de handoffs respectivement avec les valeurs de 55%, 60%, 50% et 45%. Nous constatons également que pour le flux conversationnel, ces quatre algorithmes donnent respectivement les valeurs de 46%, 42%, 46% et 40%. Pour le flux interactif, les quatre algorithmes réduisent le risque d'avoir ce problème respectivement avec les valeurs de 66%, 55%, 66% et 55%. Enfin, pour le flux streaming les algorithmes TOPSIS, GRA, DIA et FADM permettent de fournir respectivement les valeurs 50%, 60%, 50% et 47%.

Après une analyse de ces valeurs fournies par ces algorithmes, nous tirons la conclusion que les valeurs de l'algorithme FADM sont plus faibles pour tous les types de flux par rapport aux autres méthodes. Nous pouvons déduire que notre algorithme fournit la meilleure performance par rapport aux autres algorithmes.

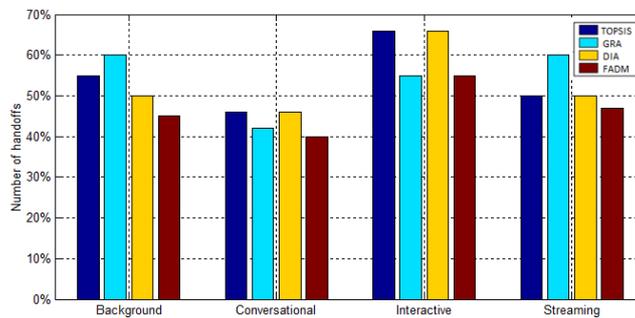


FIG. 3.32 – Nombre de handoffs obtenus en utilisant le module de pondération floue

### 3.5.5 Discussion

La troisième contribution présentée dans ce chapitre est une nouvelle architecture pour la sélection du réseau qui nous a permis de remédier aux limites des algorithmes classiques basés sur l'approche MADM. Notre stratégie repose sur deux modules : le premier module est un système de pondération appliqué pour calculer le poids pour chaque critère. Le deuxième module est un nouvel algorithme de classement introduit pour ranger les alternatives réseaux. Nous signalons que nous avons choisi d'une part, de remplacer la distance euclidienne avec la distance de Mahalanobis. D'autre part, nous avons proposé une amélioration des deux méthodes de pondération AHP et AHP floue en introduisant le concept d'hétérogénéité des critères lors de l'affectation de poids. Nous avons construit des classes qui contiennent des critères homogènes. L'homogénéité des critères est assurée par deux propriétés qui sont : la même unité de mesure pour les critères et la corrélation entre eux. Ensuite, nous avons utilisé la méthode AHP floue pour accorder les poids inter-classes et intra-classes. Finalement, nous avons présenté le principe de notre nouvel algorithme FADM.

Afin de mettre en évidence l'efficacité de notre nouvel algorithme FADM et la nécessité de l'intégrer dans le protocole IEEE 802.21, nous analysons les résultats obtenus dans les quatre simulations. Pour ce faire, dans cette analyse nous mettons l'accent sur les deux points suivants :

1. Le premier point consiste à comparer et à analyser la performance de notre algorithme FADM par rapport aux trois algorithmes TOPSIS, GRA et DIA dans chaque simulation en tenant compte des classes de services. En plus, nous donnons des explications des résultats auxquels nous avons obtenus dans chaque simulation.

2. Le deuxième point consiste à comparer les résultats fournis par notre algorithme FADM dans les quatre simulations que nous avons effectuées selon le type de service. Nous signalons qu'il existe une relation entre les trois simulations, pour cela, nous pouvons les comparer.

Ainsi, concernant le premier point, à partir des résultats de la simulation 1, la simulation 2 et la simulation 3, nous pouvons déduire que pour tous les types de services, notre algorithme de décision FADM fournit la meilleure performance pour l'anomalie de classement et le nombre de handoffs par rapport aux autres algorithmes GRA, DIA et TOPSIS. En revanche, la mauvaise performance est donnée par la méthode TOPSIS. Ceci explique largement l'utilité d'utiliser la distance de Mahalanobis au lieu de la distance euclidienne dans l'algorithme de classement.

Maintenant, pour le deuxième point en comparant la performance de l'algorithme FADM dans la simulation 1 et celle fournie dans la simulation 2, nous pouvons déduire que les résultats auxquels nous avons abouti dans la simulation 2 sont meilleurs par rapport à la simulation 1. Cette amélioration des résultats est due à l'efficacité de notre système de pondération qui prend en considération l'hétérogénéité de critères. De plus, les résultats obtenus dans la simulation 3 où notre algorithme a été utilisé sont meilleurs par rapport aux résultats de la simulation 2. Nous pouvons déduire que notre système de pondération basé sur la méthode AHP floue permet d'offrir une meilleure performance par rapport au système de pondération basé sur AHP. Il faut noter aussi que les performances des algorithmes TOPSIS, GRA et DIA obtenues dans la simulation 2 ont été améliorées progressivement par rapport aux résultats de la simulation 1. Enfin, la simulation 3 permet d'améliorer les performances de ces algorithmes par rapport à la simulation 2.

Par conséquent, l'algorithme FADM que nous avons proposé dans cette contribution permet de surmonter les limites des algorithmes classiques tels que l'anomalie de classement et le nombre de handoffs. En plus, il se caractérise par sa simplicité grâce à sa conception modulaire. Le dernier avantage de cet algorithme est la possibilité de l'implémenter facilement dans le protocole IEEE 802.21. Comme perspective de cette contribution, nous pouvons améliorer le module de pondération en examinant d'autres algorithmes de pondération comme ANP et ANP floue.

### 3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fourni trois contributions pour l'optimisation de la sélection du réseau. Les avantages de ces trois solutions proposées sont la réduction de l'anomalie de classement ainsi que le nombre de handoffs. La première technique présentée dans ce chapitre est une amélioration de l'algorithme standard TOPSIS qui s'appelle E-TOPSIS. Elle s'appuie sur la modification de la méthode TOPSIS en tenant en compte deux poids  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$ . Ces deux valeurs désignent respectivement le degré d'importance relatif à la solution idéale et à la pire des solutions. Dans cette contribution, la méthode classique AHP est appliquée pour calculer le poids de chaque critère. Les résultats de simulation ont montré que notre technique E-TOPSIS permet d'obtenir une meilleure performance concernant l'anomalie de classement et le nombre de handoffs par rapport à l'algorithme TOPSIS. Cependant, la performance fournie par cette technique n'est pas favorable vu que le taux moyen de l'anomalie de classement ainsi que le nombre de handover sont toujours élevés.

Afin de pallier aux inconvénients de notre technique E-TOPSIS, nous avons développé un autre algorithme hybride appelé H-TOPSIS. Le premier avantage de cet algorithme est le fait d'utiliser la méthode AHP floue au lieu de AHP pour l'élicitation de poids. Le deuxième avan-

tage réside dans l'exploitation du critère historique de performance qui permet de mémoriser la performance de chaque interface réseau. Les résultats des simulations effectuées sur les quatre types de services pour comparer l'algorithme H-TOPSIS et TOPSIS, ont montré que la meilleure performance en fonction de deux paramètres d'évaluation l'anomalie de classement et le nombre de handoffs, a été donnée par notre algorithme hybride. Similaire à la technique E-TOPSIS, la performance fournie par la méthode H-TOPSIS n'est pas favorable pour satisfaire les exigences de l'utilisateur en terme de QoS. D'où l'idée de proposer et développer une nouvelle stratégie pour la sélection réseau qui permet de remédier aux limites des deux solutions E-TOPSIS et H-TOPSIS.

En effet, nous avons proposé un nouvel algorithme pour la sélection de réseau appelé FADM. Il s'agit d'un nouveau schéma qui contient deux modules. Un module pour la pondération de poids et un autre pour le classement de différents réseaux. Chacun de ces deux modules présente des avantages. Le module de pondération a l'avantage de tenir en compte l'hétérogénéité des critères. Il est constitué de deux systèmes de pondération : le premier système est désigné pour la pondération inter-classes et le second système sert pour la pondération intra-classes. D'autre part, le module de classement est basé sur un nouvel algorithme MADM que nous avons développé. En plus, son avantage majeur est le fait de remplacer la distance euclidienne par la distance de Mahalanobis. Les résultats des simulations que nous avons effectuées, nous ont permis de mettre en évidence l'efficacité de notre algorithme FADM par rapport aux trois algorithmes les plus répandus tels que TOPSIS, GRA et DIA. Cette efficacité se manifeste à travers les résultats de simulations, l'algorithme FADM a réduit davantage l'anomalie du classement et le nombre du handoffs que les autres algorithmes. Nous signalons que cette réduction a une influence significative sur la maximisation de l'autonomie de la batterie et de la bande passante.

Avant de conclure ce chapitre, il convient de signaler que le module de pondération proposé pour accorder les poids aux différents critères peut être optimisé afin de fournir une meilleure performance. En effet, notre idée de classer les critères en classes homogènes a été testée uniquement pour les deux méthodes AHP et FAHP. Il existe d'autres algorithmes MADM proposés dans la littérature pour pondérer les attributs comme ANP et ANP floue. Notre objectif dans le chapitre suivant sera consacré à l'optimisation du module de la pondération.

---

---

## CHAPITRE 4

---

# UNE NOUVELLE APPROCHE DE LA SELECTION RESEAU AVEC DIFFERENCIATION DE POIDS

### 4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté une architecture modulaire pour la sélection du réseau. Cette architecture contient deux modules, le premier est consacré à la pondération des critères et le deuxième à classer les alternatives réseaux. Le module de pondération est basé essentiellement sur la méthode AHP floue pour pondérer chaque critère. Cependant, il existe d'autres méthodes de pondération que nous avons déjà citées dans le deuxième chapitre et que nous n'avons pas encore testées sur notre module de pondération. L'objectif essentiel de ce chapitre est d'améliorer le module de pondération. Pour ce faire, nous allons proposer deux contributions dans ce chapitre.

Le reste de ce chapitre est organisé de la façon suivante. La section suivante est consacrée aux limitations des algorithmes de pondération existants dans le contexte de la sélection du réseau ainsi que les solutions proposées pour surmonter ces limitations. Ensuite, nous proposons notre première contribution dans la troisième partie de ce chapitre. Il s'agit d'une nouvelle approche de la validation pour le handover. Cette approche est basée sur la théorie de la prise de la décision collective. D'un côté, cette nouvelle approche permet de déterminer la méthode de pondération la plus appropriée qui doit être introduite dans notre module de pondération. D'un autre côté, nous pouvons exploiter cette solution afin de comparer la performance des algorithmes du handover vertical.

Notre deuxième contribution sera développée dans la troisième partie de ce chapitre. L'idée de base de cette contribution consiste à introduire une nouvelle entité pour la différenciation de poids. Cette unité sera intégrée dans le module de pondération afin de produire un vecteur de poids en fonction de chaque interface réseau.

Enfin, pour chaque contribution, nous réalisons un ensemble de simulations afin d'illustrer les améliorations obtenues au niveau de notre architecture FADM.

## 4.2 Limitations des algorithmes de pondération existants dans le contexte de la sélection du réseau

Dans le cadre de l'optimisation de l'architecture FADM, nous proposons dans cette section les éléments clés afin d'améliorer le module de pondération. Pour ce faire, nous nous intéressons à l'étude de l'impact des algorithmes de pondération sur la performance de l'algorithme FADM. En fait, les poids calculés en utilisant un algorithme de pondération permettent très souvent d'influencer la performance de n'importe quel algorithme de la sélection de réseau. Comme nous l'avons déjà signalé dans le chapitre 2, le choix d'un algorithme efficace pour le calcul du poids est un facteur crucial qu'il faut tenir en compte afin de réduire l'anomalie de classement et le nombre de handoffs.

Malgré cet enjeu, les algorithmes de pondération basés sur l'approche MADM restent moins étudiés dans le contexte de handover vertical. Cela se traduit par le fait que la majorité des stratégies de handover proposées dans la littérature reposent sur la méthode de pondération AHP, presque 90% des travaux publiés l'utilisent. Cependant, ces méthodes de pondération présentent plusieurs inconvénients qui peuvent dégrader la qualité de service lors du handover vertical. Ces inconvénients peuvent être regroupés en deux catégories. La première catégorie contient des inconvénients d'ordre général que nous pouvons trouver si nous appliquons l'une de ces méthodes de pondération dans n'importe quel domaine. L'ensemble de ces inconvénients a été déjà mentionné dans le chapitre 2. La deuxième catégorie représente un ensemble de limites spécifiques à chaque méthode de pondération dans le contexte du handover vertical. Parmi ces inconvénients, nous citons :

1. Absence d'une technique d'évaluation des performances de différentes méthodes de pondération. En effet, d'après notre aperçu sur la littérature, il n'y a aucune stratégie d'évaluation centrée sur les algorithmes de pondération. Par conséquent, il n'y a aucune indication concernant l'algorithme de pondération approprié à être utilisé en fonction du type de service. De plus, les comparaisons faites entre les différentes stratégies de handover ne prennent pas en considération l'effet des algorithmes de pondération sur les résultats de performances.
2. Les méthodes de pondération se basent sur l'expérience d'un seul expert : en général le fait d'utiliser un seul expert pour pondérer les différents attributs ne reflète pas réellement les besoins de l'utilisateur en termes de QoS. Par conséquent, cet algorithme de pondération influence la performance de l'algorithme de la sélection du réseau.
3. Les méthodes de pondération permettent d'associer un vecteur de poids aux différents critères indépendamment de l'interface réseau. Autrement dit, toutes les méthodes de pondération utilisées dans le contexte du handover vertical attribuent le même vecteur de poids pour toutes les interfaces réseaux. Cependant, les critères n'ont pas le même degré d'importance dans toutes technologies réseaux. A titre d'exemple, les deux valeurs associées respectivement au critère coût de service dans les deux réseaux WIFI et WIMAX sont largement différentes. Dans un réseau WIMAX, le coût est élevé tandis que dans un réseau WIFI le coût est faible. Pour cela, ce critère ne doit pas avoir le même poids dans les deux réseaux. Ce troisième inconvénient peut impliquer le phénomène d'imprécision dans l'identification de classement lorsque les différents critères ayant les mêmes performances dans chaque réseau. Un exemple illustrant ce phénomène est présenté dans le tableau 4.1.

**Exemple du phénomène d'imprécision :** pour illustrer ce phénomène, nous considérons le contexte de la sélection de réseau. Le scénario utilisé contient trois réseaux : #1, #2 et #3

## CHAPITRE 4. UNE NOUVELLE APPROCHE DE LA SELECTION RESEAU AVEC DIFFERENCIATION DE POIDS

ainsi que trois critères : le débit, la perte et le délai. Nous supposons que les trois réseaux fournissent la même performance pour les trois critères. La méthode TOPSIS est utilisée pour classer les alternatives réseaux. Les attributs et ses valeurs normalisées utilisées sont présentés dans le tableau 4.1. Finalement, quelles que soient les valeurs de poids attribuées à chaque critère, le score calculé par la méthode est le même pour les trois réseaux. Dans notre cas, nous attribuons les trois valeurs 0.5, 0.3 et 0.2 respectivement au débit, à la perte et au délai. Par conséquent, nous ne pouvons pas décider quel est le réseau qu'il faut choisir.

TAB. 4.1 – La décision de sélection du réseau basée sur TOPSIS

Réseau	Débit			Perte		Délai	
	$C_j^*$	<i>Mbps</i>	<i>norm</i>	<i>Dh/MB</i>	<i>norm</i>	<i>per10<sup>6</sup></i>	<i>norm</i>
#1	<b>0.12</b>	<b>10</b>	<b>0.76</b>	<b>1</b>	<b>0.7</b>	<b>12</b>	<b>0.12</b>
#2	<b>0.12</b>	<b>80</b>	<b>0.76</b>	<b>10</b>	<b>0.7</b>	<b>20</b>	<b>0.12</b>
#3	<b>0.12</b>	<b>90</b>	<b>0.76</b>	<b>0.8</b>	<b>0.7</b>	<b>30</b>	<b>0.12</b>

Après avoir présenté les inconvénients de chaque catégorie relatifs aux algorithmes de pondération, nous mettons l'accent maintenant, sur les solutions proposées pour les surmonter. D'une part, afin de pallier aux inconvénients relatifs à la première catégorie, il n'existe qu'une seule solution dans la littérature. Cette solution est celle que nous avons présentée dans le chapitre 3. Il s'agit de notre module de pondération qui permet de tenir compte de l'hétérogénéité des critères en utilisant la méthode AHP floue. D'autre part, deux solutions [79] et [84] ont été proposées afin de surmonter respectivement le premier et le deuxième inconvénient de la deuxième catégorie. D'ailleurs ces deux solutions sont les seules proposées dans la littérature. Dans [79] nous avons présenté une étude comparative entre cinq algorithmes de pondération : AHP, FANP, ANP, FANP et RW (Random Weighting) afin de spécifier la méthode de pondération adéquate pour être couplée avec l'algorithme TOPSIS. Cette étude a été fondée sur l'évaluation des performances de cinq algorithmes de décision reposant sur les cinq algorithmes de pondération. Quatre types de flux arrière-plan, conversationnel, interactif et streaming sont simulés en fonction de deux paramètres d'évaluation le nombre de handovers échoués et l'anomalie de classement. Les résultats fournis par les cinq algorithmes de décision ont montré que la méthode de pondération ANP est la plus appropriée pour être combinée avec la méthode TOPSIS pour les trois types de flux : arrière-plan, conversationnel et interactif. Pour le flux streaming, la méthode de pondération AHP est la plus adéquate pour être couplée avec la méthode TOPSIS. Or, cette solution ne permet pas de valider le choix de l'algorithme de pondération parce qu'il faut tenir compte d'autres paramètres d'évaluation.

De plus, pour pallier au deuxième problème des méthodes de pondération qui utilisent un seul expert, nous avons proposé une nouvelle solution qui permet de tenir compte plusieurs experts [84]. Nous détaillons cette solution dans la section suivante. Enfin, nous signalons que le troisième inconvénient n'est pas encore traité dans la littérature.

En résumé, nous pouvons dire que les lacunes spécifiques aux algorithmes de pondération ne sont pas encore comblées par des solutions efficaces jusqu'à maintenant.

Afin de pouvoir pallier aux inconvénients spécifiques aux algorithmes de pondération, nous proposons dans ce chapitre deux contributions. Nous montrons à travers des simulations que l'ensemble de ces contributions permettent de remédier définitivement à tous les inconvénients de la deuxième catégorie.

### 4.3 Une nouvelle approche pour la validation de la sélection du réseau basée sur le groupe MADM

#### 4.3.1 La théorie de la prise de décision collective

Jusqu'à maintenant, les méthodes MADM que nous avons exploité, soit pour pondérer, ou soit pour classer, reposent sur la théorie de la prise de décision individuelle. Avec cette dernière, un seul décideur (expert) est désigné à chaque moment pour prendre une décision. Par exemple, dans le cas d'une méthode MADM de pondération, cette décision consiste à calculer les poids de chaque critère. La contrainte majeure de cette théorie est le fait qu'un seul décideur reste incapable d'exprimer parfaitement les préférences subjectives qui correspondent à chaque critère. Par conséquent, le calcul de poids est imprécis.

D'ailleurs, il paraît très raisonnable de prendre en compte les préférences de plusieurs experts au lieu d'un seul. D'où la nécessité d'introduire la théorie de la prise de décision collective [54]. Cette théorie se fonde sur le fait que plusieurs décideurs interviennent dans la phase de décision. Ce qui implique de trouver la meilleure alternative qui reflète le mieux les préférences du groupe de décideurs dans son ensemble [71]. Pour ce faire, la prise de décision 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 le groupe de décideurs peuvent atteindre des résultats supérieurs à ceux qu'ils auraient pu réaliser individuellement. La question qui se pose : comment les individus parviennent-ils à prendre une décision en commun ? La réponse à cette question repose sur les deux étapes suivantes : dans la première étape, chaque expert fournit des préférences sur les critères, représentant son propre point de vue personnel. La deuxième étapes consiste à construire les préférences collectives en utilisant l'agrégation des préférences individuelles. Pour cela, plusieurs méthodes sont proposées dans la littérature pour calculer l'agrégation des préférences [33] et [37].

D'un côté, la théorie de la prise de décision collective est largement appliquée dans plusieurs domaines tels que l'industrie, la médecine, la philosophie, l'économie, ou plus récemment dans le domaine de l'informatique et de l'intelligence artificielle. D'un autre côté, peu de travaux se sont intéressés à l'utilisation de la théorie de la prise de décision collective dans le contexte du handover [129] et [36]. Les auteurs Shi Zhang et Zhu Qi [129], ont proposé un algorithme pour la sélection du réseau qui repose sur l'approche MADM et la prise de décision collective (GDM). Dans cette solution proposée, d'un côté la méthode de classement utilisée pour choisir la meilleure technologie réseau est une fonction objective exprimée comme suit :

$$P_n = f(r_{n1}, r_{n1}, \dots, r_{nm}) = \sum_{j=1}^m r_{nj} * w_j \text{ avec } \sum_{j=1}^m w_j = 1 \quad (4.1)$$

où,  $r_{nj}$  représente la valeur normalisée du critère  $j$  dans le réseau  $n$  et  $w_j$  correspond au poids associé à ce critère.

D'un autre côté, le groupe de la décision collective est appliqué pour pondérer les différents critères d'une manière efficace. Les préférences de deux décideurs interviennent dans ce groupe. Le premier décideur utilise la méthode entropie qui permet de pondérer les critères d'une façon objective. Tandis que le deuxième décideur introduit la méthode AHP pour pondérer les critères d'une façon subjective. Par conséquent, le groupe de décision permet de prendre en compte les types de pondération à savoir la pondération objective et la pondération subjective. Pour l'évaluation de performance, les auteurs ont comparé la performance de l'algorithme proposé par rapport aux deux méthodes GRA [134] et EM [158] en fonction de deux types

## CHAPITRE 4. UNE NOUVELLE APPROCHE DE LA SELECTION RESEAU AVEC DIFFERENCIATION DE POIDS

de services : conversationnel et interactif. Les résultats de simulations ont montré que cet algorithme proposé permet de minimiser le nombre de handover, le délai, la gigue et le coût de service mieux que les méthodes GRA et EM.

Dans [36], les auteurs ont développé une solution pour la sélection de réseau qui prend en considération plusieurs communications simultanément. Afin de déterminer la meilleure technologie qui peut supporter en même temps ces différentes communications. Les auteurs ont introduit le concept de la prise de décision collective basée sur l'approche MADM. L'idée de cette solution, est chaque décideur accorde un poids à chaque critère en fonction du type de la communication. Le calcul du vecteur de poids collectif est basé sur l'agrégation de différentes valeurs de poids de chaque critère calculées par chaque décideur. De plus, la solution repose sur la logique floue pour la pondération de critère et la méthode TOPSIS pour classer les différentes alternatives réseaux. Finalement, les résultats de simulations montrent que chaque groupe des communications qui s'exécutent simultanément est influencé par les priorités relatives qui correspondent à chaque type de communication. Les résultats montrent également que la fréquence d'avoir le processus de handover diminue si les préférences d'utilisateur sont augmentées. En outre, les résultats montrent que la probabilité d'avoir le handover vertical dû à l'initiation d'une nouvelle communication à partir d'un terminal diminue lorsque le nombre des communications supportées simultanément par le terminal augmente.

Dans [84], les auteurs M. Lahby et al, ont proposé un nouveau mécanisme pour la sélection du réseau qui repose sur l'approche MADM collective. L'objectif essentiel de ce mécanisme est de surmonter l'inconvénient spécifique à la méthode AHP qui réside dans l'utilisation de l'expérience d'un seul expert pour pondérer les différents attributs. Pour ce faire, dans le mécanisme proposé, les auteurs ont introduit une extension de la méthode AHP appelé multiple AHP (M-AHP). Cette dernière, prend en considération les expériences de plusieurs experts pour pondérer les critères. De plus, la méthode GRA est appliquée pour classer les alternatives réseaux. Le calcul du vecteur de poids du groupe se fait avec la méthode de pondération M-AHP en se basant sur l'agrégation des vecteurs de poids individuels de chaque décideur. L'agrégation est calculée en appliquant la moyenne arithmétique.

Pour l'évaluation des performances de ce mécanisme proposé, les auteurs ont comparé la performance des deux algorithmes GRA-1 et GRA-2. Le premier algorithme GRA-1 combine la méthode AHP et la méthode GRA. Le deuxième algorithme GRA-2 utilise la méthode M-AHP au lieu de AHP pour pondérer les critères et la méthode GRA pour classer les alternatives réseaux. Les résultats fournis par les deux algorithmes en fonction de quatre types de services déjà cités, montrent que la méthode GRA-2 permet de fournir une meilleure performance par rapport à l'algorithme GRA-1 pour chaque type de service. Cela est dû à l'utilisation de la méthode M-AHP dans la phase de pondération de critères. La deuxième remarque est que le taux moyen du nombre du handoffs fourni par le mécanisme GRA-2 est similaire à celui fourni par l'algorithme GRA-1. Nous pouvons déduire que notre méthode de pondération M-AHP proposée n'a aucun effet sur le paramètre du nombre des handoffs.

Dans notre deuxième contribution, nous allons introduire la théorie de la prise de décision collective afin de valider notre algorithme de la sélection du réseau qui combine la méthode ANP pour pondérer les critères et l'algorithme de mahalanobis distance pour classer les alternatives réseaux. Nous rappelons que la validation de n'importe quel algorithme de handover vertical consiste à valider l'algorithme de pondération et l'algorithme de classement. Nous nous focalisons sur la validation de l'algorithme de pondération parce que nous avons déjà conclu à travers les différentes simulations que notre algorithme de classement mahalanobis permet de fournir la meilleure performance par rapport aux algorithmes MADM.

### 4.3.2 L'approche proposée basée sur la prise de décision en groupe

Bien qu'il existe plusieurs algorithmes de la sélection du réseau qui reposent sur l'approche MADM dans la littérature, il n'y a aucun algorithme de pondération qui soit considéré approprié par rapport aux autres algorithmes. De plus, la totalité des méthodologies d'évaluation proposées dans la littérature pour évaluer les performances des algorithmes sont centrées sur les algorithmes de classement. Autrement dit, la finalité de ces solutions est d'identifier le meilleur algorithme de classement qu'il faut implémenter indépendamment de l'algorithme de pondération.

Le processus de validation de l'algorithme de la sélection du réseau est devenu nécessaire afin d'identifier la meilleure solution qu'il faut implémenter au niveau de terminal mobile. Or, il n'y a aucune étude proposée dans la littérature concernant la validation de n'importe quel algorithme de handover vertical. Dans le but de surmonter cette limitation, nous proposons une nouvelle approche de validation [87] qui repose sur le groupe MADM. L'idée de base de cette approche proposée a été inspirée du modèle de validation développé dans [25]. Ce modèle proposé est basé sur le groupe de décision MADM afin de déterminer le meilleur algorithme de classement. Ce modèle consiste à calculer le classement des alternatives en utilisant chaque algorithme individuel MADM ainsi qu'avec l'introduction du groupe MADM. Ensuite, le modèle calcule le degré de consistance pour chaque algorithme de classement MADM. Ce degré représente la similarité entre la solution trouvée avec l'algorithme de classement individuel et la solution calculée en utilisant le groupe MADM. La méthode de corrélation [3] de Pearson (ou Spearman) est appliquée pour calculer le degré de consistance. Finalement, le modèle de validation choisit l'algorithme de classement qui fournit la plus grande valeur qui correspond au degré de consistance comme le meilleur algorithme. Cependant, la faiblesse de ce modèle réside dans le fait qu'il ne tient pas en compte l'algorithme de pondération lors du classement des alternatives. Le modèle de validation proposé suppose que tous les attributs sont pondérés de façon équitable par les différents décideurs.

L'objectif de notre nouvelle approche de validation [87] est similaire au modèle [25]. Il consiste à déterminer le meilleur algorithme de décision, ce qui implique à déterminer automatiquement le meilleur algorithme de pondération. La différence majeure entre notre approche et le modèle proposé [25] réside dans le fait que notre solution de validation prend en considération les quatre algorithmes de pondération : AHP (W1), FAHP (W2), ANP (W3) et FANP (W4). Nous examinons quatre algorithmes de la sélection du réseau afin de valider le meilleur algorithme de pondération qui doit être en fonction du type de service. Nous notons Mahalabis-W1, Mahalabis-W2, Mahalabis-W3 et Mahalabis-W4 les quatre algorithmes de la sélection qui utilisent respectivement les quatre algorithmes de pondération W1, W2, W3 et W4. Tous ces quatre algorithmes se basent sur l'algorithme de Mahalanobis pour classer les alternatives. Nous allons utiliser le groupe MADM qui repose sur les algorithmes de pondération déjà cités. Dans la section suivante, nous présentons les éléments clés de notre nouvelle approche de validation.

### 4.3.2.1 Formulation du problème basé sur le groupe de la décision MADM

En général, dans le contexte de la sélection du réseau, le groupe de la décision MADM implique les points suivants :

- Étant donné A, un ensemble fini d'ordre  $n$  qui représente les alternatives réseaux accessibles au terminal mobile :

$$A = \{A_i, \text{ pour } i = 1, 2, \dots, n\}. \quad (4.2)$$

- Étant donné C, un ensemble fini d'ordre  $m$  des critères utilisés dans la sélection du réseau :

$$C = \{c_j \text{ avec } j = 1, 2, \dots, m\}. \quad (4.3)$$

- Étant donné DM, un ensemble fini d'ordre  $p$  qui représente le groupe de décideurs :

$$DM = \{DM_k, \text{ pour } k = 1, 2, \dots, p\} \quad (4.4)$$

### 4.3.2.2 Notre algorithme de validation proposé basé sur le groupe MADM

Afin de valider la méthode de pondération la plus appropriée à être combinée avec n'importe quel algorithme de classement, nous présentons notre nouvelle approche de validation [87] [89]. Nous signalons aussi que notre approche est capable de valider aussi les algorithmes de classement et non pas uniquement les algorithmes de pondération. Les étapes de cette approche sont définies comme suit :

- **Étape 1** : construire la matrice de décision individuelle : chaque décideur  $DM_k$  évalue la performance  $x_{ij}^k$  qui correspond à l'attribut  $C_j$  en fonction de l'alternative  $A_i$  afin de construire la matrice  $X^k$ . Cette évaluation est quantitative ou qualitative. L'expression de la matrice de décision  $X^k$  est donnée dans l'équation suivante :

$$X^k = \begin{pmatrix} x_{11}^k & x_{12}^k & \dots & \dots & x_{1m}^k \\ x_{21}^k & x_{22}^k & \dots & \dots & x_{2m}^k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1}^k & x_{n2}^k & \dots & \dots & x_{nm}^k \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

- **Étape 2** : calculer le vecteur de poids  $W^k$  : chaque décideur  $DM_k$  applique les quatre algorithmes AHP, FAHP, ANP et FANP afin de calculer respectivement les quatre vecteurs de poids  $T_1^k, T_2^k, T_3^k, T_4^k$ . Chacun de ces vecteurs contient les poids attribués par le décideur  $DM_k$  pour chaque critère  $C_j$ . Le vecteur de poids  $W^k$  combine les quatre vecteurs  $T_1^k, T_2^k, T_3^k$  et  $T_4^k$  en utilisant la moyenne arithmétique. Le vecteur de poids  $W^k$ , obtenu est défini par :

$$W^k = [w_1^k, w_2^k, \dots, w_m^k], \text{ avec } w_i^k = \frac{\sum_{j=1}^4 T_j^k}{4} \quad (4.6)$$

- **Étape 3** : calculer la matrice de décision de groupe X : le calcul de la matrice de décision de groupe est basé sur la moyenne arithmétique de toutes les matrices de décision individuelle  $X^k$  donnée par chaque décideur. La matrice de décision du groupe est calculée par l'équation suivante :

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & \dots & x_{nm} \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

### 4.4.3 Une nouvelle approche pour la validation de la sélection du réseau basée sur le groupe MADM

avec  $x_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^p x_{ij}^k}{p}$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, m$

- **Étape 4** : calculer le vecteur de poids de groupe  $W$  : le calcul de poids du vecteur  $W$  prend en considération tous les vecteurs de poids calculés par le groupe de décideurs. L'expression du vecteur  $W$  est la suivante :

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_m] \text{ avec } w_j = \frac{\sum_{k=1}^p w_j^k}{p}, \quad j = 1, \dots, m \quad (4.8)$$

- **Étape 5** : appliquer l'algorithme de la sélection du réseau basé sur le groupe MADM : le score de classement obtenu en appliquant la distance de mahalanobis sur la matrice de groupe  $X$  en tenant compte du vecteur de poids  $W$ , est exprimé par le vecteur  $V^i$  :

$$V^i = [a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}] \quad (4.9)$$

- **Étape 6** : appliquer l'algorithme de la sélection du réseau basé sur un seul décideur : chaque décideur combine une seule méthode de pondération et la distance de mahalanobis afin de fournir le vecteur  $V_i^k$ . Ce dernier contient les valeurs de performance de chaque alternative réseau. Ce vecteur est défini par l'équation suivante :

$$V_i^k = [b_{i1}^k, b_{i2}^k, \dots, b_{in}^k] \text{ avec } i = 1, 2, \dots, n \text{ et } k = 1, 2, \dots, p. \quad (4.10)$$

- **Étape 7** : calculer le degré de consistance : ce degré permet de mesurer la corrélation entre les différents algorithmes de la sélection de réseau individuels et l'algorithme de la sélection de réseau basé sur le groupe MADM. Cette corrélation est calculée en introduisant le coefficient de corrélation de Pearson. Le degré de consistance  $CD_i$  entre les deux vecteurs  $V_i$  et  $V_i^k$  est défini par l'équation suivante :

$$CD_i = \frac{\sum_{k=1}^p C_i^k}{p} \quad (4.11)$$

Où  $C_i^k$  représente le coefficient de corrélation de Pearson entre  $V^i$  et  $V_i^k$ . L'expression de ce coefficient est donnée dans l'équation suivante :

$$C_i^k = \frac{n(\sum_{j=1}^n a_{ij} b_{ij}^k) - (\sum_{j=1}^n a_{ij})(\sum_{j=1}^n b_{ij}^k)}{\sqrt{[n(\sum a_{ij}^2) - (\sum a_{ij})^2][n(\sum b_{ij}^k)^2 - (\sum b_{ij}^k)^2]}} \quad (4.12)$$

- **Étape 8** : classer les algorithmes de la sélection du réseau par ordre décroissant en fonction du degré de consistance  $CD_i$  qui correspond à l'algorithme  $i$ .

## 4.3.3 Simulations et résultats

### 4.3.3.1 Scénario de simulation

Comme nous l'avons déjà évoqué, la méthode de Mahalanobis peut être combinée avec quatre algorithmes de pondération à savoir AHP (W1), FAHP (W2), ANP (W3) et FANP (W4). Notre objectif à travers ces simulations est d'identifier la méthode de pondération la plus appropriée à être utilisée avec la distance de Mahalanobis, en fonction du type de service. Pour ce faire, nous présentons les résultats obtenus en appliquant notre nouvelle approche de validation. Nous effectuons quatre simulations qui prennent en considération respectivement les quatre types de flux : arrière-plan, conversationnel, interactif et streaming.

Le scénario de simulation utilisé pour modéliser le groupe de la décision MADM est le suivant :

- L'environnement réseaux contient trois technologies :  $A = \{UMTS, WIFI, WIMAX\}$ .
- Six attributs associés à cet environnement :  $C = \{AB, S, CB, D, J, L\}$ .
- Le groupe de décideurs contient trois experts  $DM = \{DM_1, DM_2, DM_3\}$ .

Les valeurs des critères relatifs à la qualité de service tels que AB, D, J, et L sont générées à travers le protocole IEEE 802.21. Leurs mesures sont illustrées dans le tableau 4.2 en fonction

## CHAPITRE 4. UNE NOUVELLE APPROCHE DE LA SELECTION RESEAU AVEC DIFFERENCIATION DE POIDS

de chaque type de réseau. Les mesures des deux paramètres, le coût de service et la sécurité sont accordées par les trois décideurs selon les valeurs mentionnées dans le tableau 4.3.

TAB. 4.2 – Les métriques de QoS relatives à chaque réseau candidat

Réseaux	AB (mbps)	D (ms)	J (ms)	L(per10 <sup>6</sup> )
UMTS	1.2	35	12	50
WIFI	6	110	15	60
WIMAX	8	100	20	80

TAB. 4.3 – Les performances du coût et de sécurité relatives à chaque réseau candidat

Réseaux	DM <sub>1</sub>		DM <sub>2</sub>		DM <sub>3</sub>	
	CB(%)	S(%)	CB(%)	S(%)	CB(%)	S(%)
UMTS	60	70	65	60	70	80
WIFI	12	25	15	30	10	20
WIMAX	70	75	55	50	65	70

La matrice de décision X qui correspond au groupe de décision est générée à partir de deux tableaux 4.2 et 4.3 en utilisant l'équation 4.7. De plus, chaque décideur utilise les quatre algorithmes de pondération W1, W2, W3 et W4 afin de calculer le poids de chaque critère. Le vecteur de groupe W est généré à partir des préférences données par les trois décideurs dont chacun applique en même temps les quatre algorithmes de pondération. Ce qui implique de produire un vecteur de groupe W qui tient en compte les quatre algorithmes de pondération ainsi que les trois décideurs. De plus, en fonction de chaque type de trafic, le calcul de W est basé sur les deux équations 4.6 et 4.8.

En tenant compte des quatre algorithmes de pondération W1, W2, W3 et W4 ainsi que l'algorithme de Mahalanobis, nous pouvons construire quatre algorithmes de la sélection de réseau qui sont notés respectivement Mahalanobis-W1, Mahalanobis-W2, Mahalanobis-W3 et Mahalanobis-W4. Le fait d'appliquer ces quatre algorithmes de la décision en tenant compte de la matrice du groupe X ainsi que le vecteur du groupe W, permet de produire respectivement quatre groupes de décision G1, G2, G3 et G4. Vu que les groupes de décision utilisent la même matrice de décision X et appliquent le même vecteur de groupe W, les résultats de classement fournis par G1, G2, G3 et G4 seront les mêmes. Par conséquent, nous aurons un seul groupe de décision noté G.

Dans chaque simulation, nous calculons le degré de consistance entre le groupe de décision G et les quatre algorithmes de la sélection du réseau à savoir Mahalanobis-W1, Mahalanobis-W2, Mahalanobis-W3 et Mahalanobis-W4. Puis, nous choisissons l'algorithme de la sélection du réseau qui fournit la plus grande valeur de ce degré. Les résultats numériques de ces quatre simulations sont présentés dans ce qui suit :

### 4.3.3.2 La simulation 1

Dans cette simulation, nous analysons le flux en arrière-plan, en vue de déterminer la méthode de pondération adéquate pour être couplée avec la distance de Mahalanobis. Les vecteurs de poids accordés à chaque critère par les décideurs DM<sub>1</sub>, DM<sub>2</sub>, et DM<sub>3</sub> sont illustrés

#### 4.4.3 Une nouvelle approche pour la validation de la sélection du réseau basée sur le groupe MADM

dans le tableau 4.4. Le vecteur poids  $W$  correspondant au groupe de décideurs est également présenté dans le même tableau.

TAB. 4.4 – Pondération de critères par les décideurs en fonction de flux arrière-plan

	$DM_1$				$DM_2$				$DM_3$				Group
	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4	
<b>CB</b>	0.085	0.131	0.085	0.131	0.092	0.161	0.092	0.161	0.069	0.087	0.069	0.087	0.104
<b>S</b>	0.213	0.310	0.213	0.310	0.201	0.208	0.201	0.208	0.181	0.136	0.181	0.136	0.208
<b>AB</b>	0.430	0.306	0.503	0.397	0.433	0.346	0.507	0.449	0.460	0.042	0.538	0.552	0.445
<b>D</b>	0.042	0.025	0.036	0.020	0.043	0.028	0.037	0.022	0.045	0.034	0.039	0.027	0.033
<b>J</b>	0.042	0.025	0.052	0.040	0.043	0.028	0.052	0.045	0.045	0.034	0.056	0.055	0.043
<b>L</b>	0.187	0.204	0.110	0.103	0.189	0.230	0.111	0.116	0.200	0.283	0.118	0.143	0.166

Le tableau 4.5 présente les résultats fournis par trois algorithmes individuels de la décision  $DM_1 - W1$ ,  $DM_2 - W1$  et  $DM_3 - W1$ . Ces algorithmes utilisent la même méthode de pondération AHP ainsi que le même algorithme de classement Mahalanobis. En outre, le tableau montre les résultats de l'algorithme de la décision du groupe G1 qui repose sur le vecteur  $W$  et la distance de Mahalanobis. Nous remarquons que les quatre algorithmes de la décision permettent de fournir le même classement pour toutes les technologies réseaux. Par contre leurs performances sont différentes vu qu'ils n'utilisent pas le même vecteur de poids.

TAB. 4.5 – Comparaison de classement en utilisant G1 pour le flux arrière-plan

Networks	G1		$DM_1 - W1$		$DM_2 - W1$		$DM_3 - W1$	
	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank
<b>UMTS</b>	0.0834	3	0.0759	3	0.0777	3	0.0917	3
<b>WIFI</b>	0.0115	2	0.0126	2	0.0099	2	0.0110	2
<b>WIMAX</b>	0.0057	1	0.0062	1	0.0073	1	0.0067	1

De plus, le tableau 4.6 contient l'ordre de classement et le score calculé en utilisant les quatre algorithmes de la sélection du réseau qui sont  $DM_1 - W1$ ,  $DM_2 - W1$ ,  $DM_3 - W1$  et G2. Les trois premiers algorithmes individuels se basent sur la même méthode de pondération floue AHP et le même algorithme de classement Mahalanobis. L'algorithme de la décision du groupe G2 est identique à l'algorithme G1. Par conséquent, les deux algorithmes fournissent les mêmes résultats. Nous observons également que les quatre algorithmes de la décision permettent de fournir le même classement pour toutes les technologies réseaux.

TAB. 4.6 – Comparaison de classement en utilisant G2 pour le flux arrière-plan

Networks	G2		$DM_1 - W2$		$DM_2 - W2$		$DM_3 - W2$	
	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank
<b>UMTS</b>	0.0834	3	0.0324	3	0.0444	3	0.0758	3
<b>WIFI</b>	0.0115	2	0.0276	2	0.0107	1	0.0115	2
<b>WIMAX</b>	0.0057	1	0.0089	1	0.0108	2	0.0137	1

## CHAPITRE 4. UNE NOUVELLE APPROCHE DE LA SELECTION RESEAU AVEC DIFFERENCIATION DE POIDS

De plus, le tableau 4.7 présente les résultats de classement en utilisant les quatre algorithmes de la décision  $DM_1 - W1$ ,  $DM_2 - W1$ ,  $DM_3 - W1$  et G3. Dans ce cas, les trois algorithmes individuels reposent sur la même méthode de pondération ANP et le même algorithme de classement Mahalanobis. Le groupe de la décision G3 est identique aussi au G1. Les quatre algorithmes permettent de fournir le même classement pour toutes les technologies réseaux.

TAB. 4.7 – Comparaison de classement en utilisant G3 pour le flux arrière-plan

Networks	G3		$DM_1 - W3$		$DM_2 - W3$		$DM_3 - W3$	
	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank
<b>UMTS</b>	0.0834	3	0.1181	3	0.1211	3	0.1432	3
<b>WIFI</b>	0.0115	2	0.0127	2	0.0100	2	0.0111	2
<b>WIMAX</b>	0.0057	1	0.0044	1	0.0054	1	0.0045	1

Enfin, le tableau 4.7 illustre les résultats de classement fournis par les quatre algorithmes de la décision qui sont  $DM_1 - W1$ ,  $DM_2 - W1$ ,  $DM_3 - W1$  et G4. Dans ce cas, les trois algorithmes individuels reposent sur la même méthode de pondération floue ANP et le même algorithme de classement Mahalanobis. L'algorithme de la décision du groupe G4 est identique à l'algorithme G1. Nous remarquons également que les quatre algorithmes permettent de fournir le même classement pour toutes les technologies réseaux.

TAB. 4.8 – Comparaison de classement en utilisant G4 pour le flux arrière-plan

Networks	G4		$DM_1 - W4$		$DM_2 - W4$		$DM_3 - W4$	
	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank
<b>UMTS</b>	0.0834	3	0.0620	3	0.0869	3	0.1544	3
<b>WIFI</b>	0.0115	2	0.0267	2	0.0093	2	0.0088	2
<b>WIMAX</b>	0.0057	1	0.0058	1	0.0062	1	0.0052	1

En appliquant le coefficient de corrélation de Pearson, les degrés de consistance obtenus pour les quatre groupes G1, G2, G3 et G4 sont illustrés dans le tableau 4.9. Nous remarquons que le groupe G3 possède le score le plus élevé en fonction du degré de consistance. Cela signifie que la méthode ANP est la plus appropriée pour pondérer les critères pour le flux en arrière-plan.

TAB. 4.9 – Degré de consistance relatif à chaque groupe MADM pour le flux arrière-plan

Groupe MADM	Degré de consistance
<b>G1</b>	0.99970
<b>G2</b>	0.89990
<b>G3</b>	0.99973
<b>G4</b>	0.98360

### 4.3.3.3 La simulation 2

Cette simulation consiste à analyser le flux conversationnel afin de déterminer la méthode de pondération adéquate pour être combinée avec la distance de Mahalanobis. Les

#### 4.4.3 Une nouvelle approche pour la validation de la sélection du réseau basée sur le groupe MADM

vecteurs de poids accordés à chaque critère par les décideur  $DM_1$ ,  $DM_2$ , et  $DM_3$  sont illustrés dans le tableau 4.10. Le vecteur poids  $W$  correspondant au groupe de décideurs est aussi présenté dans le même tableau.

TAB. 4.10 – Pondération de critères par les décideurs en fonction de flux conversationnel

	$DM_1$				$DM_2$				$DM_3$				Group
	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4	
<b>CB</b>	0.085	0.131	0.085	0.131	0.092	0.161	0.092	0.161	0.069	0.087	0.069	0.087	0.104
<b>S</b>	0.213	0.310	0.213	0.310	0.201	0.208	0.201	0.208	0.181	0.136	0.181	0.136	0.208
<b>AB</b>	0.033	0.034	0.148	0.178	0.033	0.039	0.149	0.201	0.035	0.048	0.158	0.247	0.109
<b>D</b>	0.259	0.187	0.222	0.149	0.261	0.211	0.224	0.169	0.277	0.259	0.238	0.208	0.222
<b>J</b>	0.259	0.187	0.243	0.156	0.261	0.211	0.245	0.176	0.277	0.259	0.260	0.216	0.229
<b>L</b>	0.150	0.151	0.089	0.076	0.152	0.171	0.090	0.086	0.161	0.210	0.095	0.106	0.128

Le tableau 4.11 présente les résultats fournis par les algorithmes individuels  $DM_1 - W1$ ,  $DM_2 - W1$  et  $DM_3 - W1$  qui utilisent la même méthode AHP. De plus, le tableau contient les résultats de l'algorithme de la décision du groupe G1. Nous observons que les quatre algorithmes ne permettent pas de fournir le même classement pour toutes les technologies réseaux.

TAB. 4.11 – Comparaison de classement en utilisant G1 pour le flux conversationnel

Networks	G1		$DM_1 - W1$		$DM_2 - W1$		$DM_3 - W1$	
	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank
<b>UMTS</b>	0.0059	1	0.0060	1	0.0066	1	0.0064	1
<b>WIFI</b>	0.0168	3	0.0226	3	0.0203	2	0.0233	2
<b>WIMAX</b>	0.0135	2	0.0192	2	0.0206	3	0.0266	3

En outre, le tableau 4.12 contient l'ordre de classement et le score calculé en utilisant les quatre algorithmes  $DM_1 - W1$ ,  $DM_2 - W1$ ,  $DM_3 - W1$  et G2. Les trois premiers algorithmes individuels reposent sur la même méthode de pondération floue AHP et le même algorithme de classement Mahalanobis. L'algorithme de la décision du groupe G2 est identique à l'algorithme G1. Par conséquent, les deux algorithmes fournissent les mêmes résultats. Nous observons également que les quatre algorithmes de la décision ne permettent pas d'avoir le même classement.

TAB. 4.12 – Comparaison de classement en utilisant G2 pour le flux conversationnel

Networks	G2		$DM_1 - W2$		$DM_2 - W2$		$DM_3 - W2$	
	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank
<b>UMTS</b>	0.0059	1	0.0062	1	0.0070	1	0.0065	1
<b>WIFI</b>	0.0168	3	0.0301	3	0.0147	2	0.0188	2
<b>WIMAX</b>	0.0135	2	0.0118	2	0.0151	3	0.0215	3

## CHAPITRE 4. UNE NOUVELLE APPROCHE DE LA SELECTION RESEAU AVEC DIFFERENCIATION DE POIDS

De plus, le tableau 4.13 présente les résultats de classement en utilisant les quatre algorithmes de la sélection du réseau qui sont  $DM_1 - W1$ ,  $DM_2 - W1$ ,  $DM_3 - W1$  et G3. Dans ce cas, les trois algorithmes individuels reposent sur la même méthode de pondération ANP et le même algorithme de classement Mahalanobis. L'algorithme de la décision du groupe G3 est identique à l'algorithme G1. Nous remarquons également que les quatre algorithmes permettent de fournir le même classement pour toutes les technologies réseaux.

TAB. 4.13 – Comparaison de classement en utilisant G3 pour le flux conversationnel

Networks	G3		$DM_1 - W3$		$DM_2 - W3$		$DM_3 - W3$	
	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank
<b>UMTS</b>	0.0059	1	0.0077	1	0.0083	1	0.0084	1
<b>WIFI</b>	0.0168	3	0.0179	3	0.0155	3	0.0176	3
<b>WIMAX</b>	0.0135	2	0.0137	2	0.0150	2	0.0160	2

Enfin, le tableau 4.14 illustre les résultats de classement fournis par les quatre algorithmes de la décision qui sont  $DM_1 - W1$ ,  $DM_2 - W1$ ,  $DM_3 - W1$  et G4. Dans ce cas les trois algorithmes individuels reposent sur la même méthode de pondération floue ANP et le même algorithme de classement Mahalanobis. L'algorithme de la décision du groupe G4 est identique à l'algorithme G1. Nous remarquons également que les quatre algorithmes permettent de fournir le même classement pour toutes les technologies réseaux.

TAB. 4.14 – Comparaison de classement en utilisant G4 pour le flux conversationnel

Networks	G4		$DM_1 - W4$		$DM_2 - W4$		$DM_3 - W4$	
	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank
<b>UMTS</b>	0.0059	1	0.0103	2	0.0128	2	0.0173	2
<b>WIFI</b>	0.0168	3	0.0271	3	0.0143	3	0.0198	3
<b>WIMAX</b>	0.0135	2	0.0077	1	0.0091	1	0.0105	1

Les degrés de consistance calculés pour chaque groupe de décision G1, G2, G3 et G4 sont donnés dans le tableau 4.15. Nous observons que le degré de consistance le plus élevé correspond au groupe G3. Cela signifie que, pour le flux conversationnel, la méthode ANP est la plus appropriée pour calculer le degré d'importance relative à chaque critère.

TAB. 4.15 – Degré de consistance relatif à chaque groupe MADM pour le conversationnel

Groupe MADM	Degré de consistance
<b>G1</b>	0.09478
<b>G2</b>	0.9001
<b>G3</b>	0.9850
<b>G4</b>	0.5439

### 4.3.3.4 La simulation 3

Dans cette troisième simulation, nous allons nous pencher sur l'identification de la méthode de pondération adéquate pour le flux interactif. Les vecteurs de poids calculés par

#### 4.4.3 Une nouvelle approche pour la validation de la sélection du réseau basée sur le groupe MADM

les décideurs  $DM_1$ ,  $DM_2$ , et  $DM_3$  sont illustrés dans le tableau 4.16. Le vecteur poids  $W$  correspondant au groupe de décideurs est également présenté dans le même tableau.

TAB. 4.16 – Pondération de critères par les décideurs en fonction de flux interactif

	$DM_1$				$DM_2$				$DM_3$				Group
	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4	
<b>CB</b>	0.085	0.131	0.085	0.131	0.092	0.161	0.092	0.161	0.069	0.087	0.069	0.087	0.104
<b>S</b>	0.213	0.310	0.213	0.310	0.201	0.208	0.201	0.208	0.181	0.136	0.181	0.136	0.208
<b>AB</b>	0.089	0.101	0.195	0.205	0.090	0.115	0.196	0.232	0.096	0.141	0.208	0.285	0.163
<b>D</b>	0.287	0.201	0.246	0.161	0.289	0.227	0.248	0.182	0.307	0.280	0.263	0.224	0.243
<b>J</b>	0.039	0.055	0.092	0.091	0.039	0.062	0.092	0.103	0.041	0.076	0.098	0.127	0.076
<b>L</b>	0.287	0.201	0.169	0.101	0.289	0.227	0.171	0.114	0.307	0.280	0.181	0.141	0.206

Le tableau 4.17 illustre les résultats fournis par trois algorithmes individuels  $DM_1 - W1$ ,  $DM_2 - W1$  et  $DM_3 - W1$ . Ces algorithmes utilisent la même méthode de pondération AHP ainsi que le même algorithme de classement Mahalanobis. De plus, le tableau montre les résultats de l'algorithme de la décision du groupe G1 qui repose sur le vecteur  $W$  et la distance de Mahalanobis. Nous remarquons que les quatre algorithmes de la décision ne permettent pas de fournir le même classement pour toutes les technologies réseaux.

TAB. 4.17 – Comparaison de classement en utilisant G1 pour le flux interactif

Networks	G1		$DM_1 - W1$		$DM_2 - W1$		$DM_3 - W1$	
	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank
<b>UMTS</b>	0.0081	1	0.0078	1	0.0084	1	0.0086	1
<b>WIFI</b>	0.0173	3	0.0267	3	0.0244	2	0.0283	3
<b>WIMAX</b>	0.0125	2	0.0233	2	0.0247	3	0.0276	2

En outre, le tableau 4.18 contient l'ordre de classement et le score calculé en utilisant les quatre algorithmes de la sélection du réseau qui sont  $DM_1 - W1$ ,  $DM_2 - W1$ ,  $DM_3 - W1$  et G2. Les trois premiers algorithmes individuels reposent sur la même méthode de pondération floue AHP et le même algorithme de classement Mahalanobis. Nous constatons que les quatre algorithmes de la décision ne permettent pas de fournir le même classement pour toutes les technologies réseaux.

TAB. 4.18 – Comparaison de classement en utilisant G2 pour le flux interactif

Networks	G2		$DM_1 - W2$		$DM_2 - W2$		$DM_3 - W2$	
	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank
<b>UMTS</b>	0.0081	1	0.0070	1	0.0082	1	0.0087	1
<b>WIFI</b>	0.0173	3	0.0305	3	0.0152	3	0.0200	2
<b>WIMAX</b>	0.0125	2	0.0116	2	0.0148	2	0.0213	3

De plus, le tableau 4.19 présente les résultats de classement en utilisant les quatre algorithmes de la sélection du réseau qui sont  $DM_1 - W1$ ,  $DM_2 - W1$ ,  $DM_3 - W1$  et G3. Dans

## CHAPITRE 4. UNE NOUVELLE APPROCHE DE LA SELECTION RESEAU AVEC DIFFERENCIATION DE POIDS

ce cas, les trois algorithmes individuels reposent sur la même méthode de pondération ANP et le même algorithme de classement Mahalanobis. Nous observons, que les quatre algorithmes permettent de fournir le même classement.

TAB. 4.19 – Comparaison de classement en utilisant G3 pour le flux interactif

Networks	G3		$DM_1 - W3$		$DM_2 - W3$		$DM_3 - W3$	
	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank
<b>UMTS</b>	0.0081	1	0.0101	1	0.0107	1	0.0113	1
<b>WIFI</b>	0.0173	3	0.0174	3	0.0149	3	0.0169	3
<b>WIMAX</b>	0.0125	2	0.0106	2	0.0118	2	0.0121	2

D'autre part, le tableau 4.20 fournit les résultats de classement des quatre algorithmes de la décision  $DM_1 - W1$ ,  $DM_2 - W1$ ,  $DM_3 - W1$  et G4. Dans ce cas, les trois algorithmes individuels reposent sur la même méthode de pondération floue ANP et le même algorithme de classement Mahalanobis. Nous remarquons que les résultats de classement obtenus par ces algorithmes sont différents pour toutes les technologies réseaux.

TAB. 4.20 – Comparaison de classement en utilisant G4 pour le flux interactif

Networks	G4		$DM_1 - W4$		$DM_2 - W4$		$DM_3 - W4$	
	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank
<b>UMTS</b>	0.0081	1	0.0127	2	0.0093	2	0.0117	2
<b>WIFI</b>	0.0173	3	0.0270	3	0.0101	3	0.0143	3
<b>WIMAX</b>	0.0125	2	0.0068	1	0.0079	1	0.0083	1

Enfin, le tableau 4.21 contient les valeurs des degrés de consistance obtenus pour les quatre groupes G1, G2, G3 et G4. La meilleure performance est donnée par le groupe G3 qui offre le score le plus élevé. Par conséquent, nous déduisons que la méthode ANP est la plus adéquate pour attribuer les poids pour le flux interactif.

TAB. 4.21 – Degré de consistance relatif à chaque groupe MADM pour le flux interactif

Groupe MADM	Degré de consistance
<b>G1</b>	0.8809
<b>G2</b>	0.8768
<b>G3</b>	0.9367
<b>G4</b>	0.5144

### 4.3.3.5 La simulation 4

Dans la dernière simulation, nous analysons le flux streaming afin de déterminer la méthode de pondération appropriée pour être utilisée avec la distance de Mahalanobis. Les vecteurs de poids accordés à chaque critère par les décideur  $DM_1$ ,  $DM_2$ , et  $DM_3$  sont illustrés dans le tableau 4.22. Le vecteur poids W correspondant au groupe de décideurs est présenté également dans le même tableau.

#### 4.4.3 Une nouvelle approche pour la validation de la sélection du réseau basée sur le groupe MADM

TAB. 4.22 – Pondération de critères par les décideurs en fonction de flux streaming

	$DM_1$				$DM_2$				$DM_3$				Group
	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4	W
<b>CB</b>	0.085	0.131	0.085	0.131	0.092	0.161	0.092	0.161	0.069	0.087	0.069	0.087	0.104
<b>S</b>	0.213	0.310	0.213	0.310	0.201	0.208	0.201	0.208	0.181	0.136	0.181	0.136	0.208
<b>AB</b>	0.300	0.195	0.408	0.328	0.303	0.221	0.411	0.371	0.321	0.271	0.437	0.456	0.335
<b>D</b>	0.041	0.047	0.035	0.037	0.041	0.053	0.035	0.042	0.044	0.065	0.037	0.052	0.044
<b>J</b>	0.151	0.149	0.135	0.109	0.152	0.168	0.136	0.123	0.161	0.207	0.144	0.151	0.149
<b>L</b>	0.210	0.168	0.124	0.085	0.211	0.190	0.125	0.096	0.224	0.233	0.133	0.118	0.160

Le tableau 4.23 présente les résultats fournis par trois algorithmes individuels  $DM_1 - W1$ ,  $DM_2 - W1$  et  $DM_3 - W1$ . Ces algorithmes utilisent la même méthode de pondération AHP ainsi que le même algorithme de classement Mahalanobis. De plus, le tableau montre les résultats de l'algorithme de la décision du groupe G1 qui repose sur le vecteur W et la distance de Mahalanobis. Nous remarquons que les quatre algorithmes de la décision permettent de fournir le même classement pour toutes les technologies réseaux. Par contre, leurs performances sont différentes vu qu'ils n'utilisent pas le même vecteur de poids.

TAB. 4.23 – Comparaison de classement en utilisant G1 pour le flux streaming

Networks	G1		$DM_1 - W1$		$DM_2 - W1$		$DM_3 - W1$	
	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank
<b>UMTS</b>	0.0378	3	0.0289	3	0.0301	3	0.0350	3
<b>WIFI</b>	0.0107	2	0.0125	2	0.0099	2	0.119	2
<b>WIMAX</b>	0.0062	1	0.0084	1	0.0094	1	0.0109	1

En outre, le tableau 4.24 contient l'ordre de classement et le score calculé en utilisant les quatre algorithmes de la sélection du réseau qui sont  $DM_1 - W1$ ,  $DM_2 - W1$ ,  $DM_3 - W1$  et G2. Les trois premiers algorithmes individuels se basent sur la même méthode de pondération floue AHP et le même algorithme de classement Mahalanobis. Nous constatons également que les quatre algorithmes de la décision fournissent le même classement pour toutes les technologies réseaux.

TAB. 4.24 – Comparaison de classement en utilisant G2 pour le flux streaming

Networks	G2		$DM_1 - W2$		$DM_2 - W2$		$DM_3 - W2$	
	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank
<b>UMTS</b>	0.0378	3	0.0225	2	0.0161	3	0.0233	3
<b>WIFI</b>	0.0107	2	0.0267	3	0.0096	2	0.0093	2
<b>WIMAX</b>	0.0062	1	0.0083	1	0.0100	1	0.0121	1

De plus, le tableau 4.25 présente les résultats de classement en utilisant les quatre algorithmes de la sélection du réseau qui sont  $DM_1 - W1$ ,  $DM_2 - W1$ ,  $DM_3 - W1$  et G3. Dans ce cas, les trois algorithmes individuels reposent sur la même méthode de pondération ANP et

## CHAPITRE 4. UNE NOUVELLE APPROCHE DE LA SELECTION RESEAU AVEC DIFFERENCIATION DE POIDS

le même algorithme de classement Mahalanobis. Nous remarquons que les quatre algorithmes permettent de fournir le même classement pour toutes les technologies réseaux.

TAB. 4.25 – Comparaison de classement en utilisant G3 pour le flux streaming

Networks	G3		$DM_1 - W3$		$DM_2 - W3$		$DM_3 - W3$	
	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank
<b>UMTS</b>	0.0378	3	0.0648	3	0.0665	3	0.0785	3
<b>WIFI</b>	0.0107	2	0.0115	2	0.0089	2	0.0097	2
<b>WIMAX</b>	0.0062	1	0.0049	1	0.0058	1	0.0050	1

Enfin, le tableau 4.26 illustre les résultats de classement fournis par les quatre algorithmes de la décision qui sont  $DM_1 - W1$ ,  $DM_2 - W1$ ,  $DM_3 - W1$  et G4. Dans ce cas les trois algorithmes individuels reposent sur la même méthode de pondération floue ANP et le même algorithme de classement Mahalanobis. L'algorithme de la décision du groupe G4 est identique à l'algorithme G1. Nous remarquons également que les quatre algorithmes permettent de fournir le même classement pour toutes les technologies réseaux.

TAB. 4.26 – Comparaison de classement en utilisant G4 pour le flux streaming

Networks	G4		$DM_1 - W4$		$DM_2 - W4$		$DM_3 - W4$	
	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank	$C_j^*$	Rank
<b>UMTS</b>	0.0378	3	0.0372	3	0.0513	3	0.0887	3
<b>WIFI</b>	0.0107	2	0.0260	2	0.0084	2	0.0071	2
<b>WIMAX</b>	0.0062	1	0.0057	1	0.0061	1	0.0050	1

En appliquant le coefficient de corrélation de Pearson, les degrés de consistance obtenus pour les quatre groupes G1, G2, G3 et G4 sont illustrés dans le tableau 4.27. Nous remarquons que le groupe G3 possède le score le plus élevé en fonction du degré de consistance. Cela signifie que la méthode ANP est la plus appropriée pour pondérer les critères pour le flux streaming.

TAB. 4.27 – Degré de consistance relatif à chaque groupe MADM pour le flux streaming

Groupe MADM	Degré de consistance
<b>G1</b>	0.99590
<b>G2</b>	0.78453
<b>G3</b>	0.99763
<b>G4</b>	0.94637

### 4.3.4 Discussion

Pour résumer, nous avons proposé une nouvelle approche pour la validation [87] [87] de la sélection du réseau. Cette approche repose sur la théorie de la prise de la décision collective. Elle s'agit d'une solution qui prend en considération l'expérience de trois décideurs. Chaque décideur a utilisé les quatre méthodes de pondération à savoir AHP, floue AHP, ANP, et floue ANP pour accorder un poids à chaque critère. Le vecteur de poids du groupe a été basé sur les vecteurs de poids individuels calculés par chaque décideur. L'avantage majeur de notre approche est sa capacité à identifier la méthode de pondération la plus adéquate qui doit être utilisée avec n'importe quel algorithme de classement. Plus particulièrement, nous avons exploité cette approche afin de déterminer la méthode de pondération que nous devons utiliser dans notre modèle de la sélection du réseau qui repose sur l'algorithme de Mahalanobis. D'ailleurs, un autre point fort de cette approche est le fait de valider n'importe quel algorithme de la sélection du réseau en fonction de type de service.

L'idée de base de cette approche de validation consiste à calculer le coefficient de corrélation de Pearson entre les algorithmes de la décision individuels et l'algorithme de la décision de groupe MADM. Ensuite, choisir l'algorithme individuel qui fournit la meilleure corrélation par rapport à l'algorithme de groupe.

D'après les résultats fournis par les quatre simulations, nous remarquons que pour les quatre types de services, la meilleure valeur de degré de consistance est donnée par le groupe de décision G3. Par conséquent, nous déduisons que la méthode ANP est la plus appropriée pour pondérer les critères. En guise de conclusion, nous affirmons la nécessité de remplacer la méthode de pondération floue AHP avec ANP dans notre modèle de la sélection du réseau.

## 4.4 Vers une technique efficace pour la sélection du réseau basée sur la différenciation de poids

### 4.4.1 L'amélioration du module de pondération de la stratégie FADM avec la différenciation de poids

Dans cette contribution nous proposons d'ajouter une nouvelle unité appelé **Différenciation de poids** au niveau du module de pondération [80], [76] et [83]. Le rôle de cette unité est de calculer le degré d'importance relative à chaque critère en fonction du type de service et du type de l'interface réseau. Autrement dit, l'unité de différenciation permet de tenir compte des différentes technologies accessibles au terminal mobile lors de la pondération de chaque critère.

En effet, comme nous l'avons déjà mentionné au début de ce chapitre, les méthodes classiques de pondération attribuent des poids aux différents critères indépendamment de la technologie réseau. Par conséquent, on trouve le même vecteur de poids valable pour toutes les technologies réseaux. Ce qui influence la performance de l'algorithme de la sélection du réseau.

En réalité, le degré d'importance accordé à un critère doit varier en fonction de la technologie réseau. A titre d'exemple, le poids affecté au critère de la sécurité dans le réseau WIFI ne doit pas être le même dans le réseau WIMAX. La même remarque est valable pour le critère du coût de service ainsi que pour les autres critères. Pour ce faire, nous introduisons cette unité pour générer un vecteur de poids pour chaque critère. Les éléments de ce vecteur représentent les valeurs de poids accordées pour ce critère dans les différentes technologies réseaux. Les trois unités à savoir le système inter-classes, le système intra-classes et l'unité de différenciation

## CHAPITRE 4. UNE NOUVELLE APPROCHE DE LA SELECTION RESEAU AVEC DIFFERENCIATION DE POIDS

sont combinés afin de produire un vecteur de poids pour chaque interface réseau dans lequel on trouve le degré d'importance de chaque critère. La figure 4.1 illustre la nouvelle architecture améliorée en introduisant l'unité de la différenciation de poids.

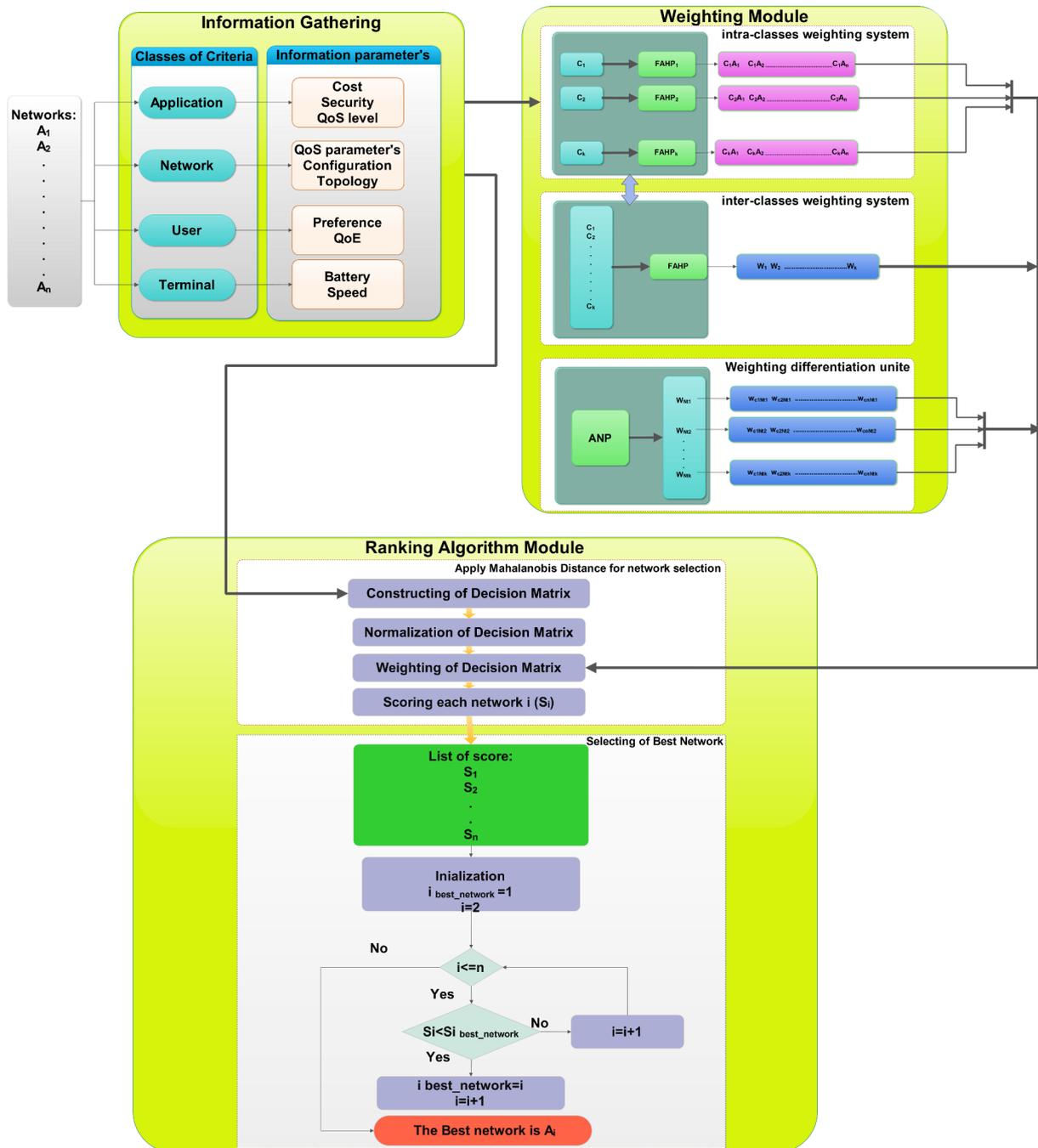


FIG. 4.1 – Amélioration de l'architecture FADM en utilisant la différenciation de poids

## 4.4.2 Le principe de fonctionnement de l'unité de la différenciation de poids

Les trois unités à savoir le système inter-classes, le système intra-classes et l'unité de différenciation collaborent entre elles de la manière suivante :

- **Étape 1** : d'abord les deux systèmes de pondération sont utilisés pour calculer le vecteur de poids  $W$ . Ce dernier est défini par l'équation suivante :

$$W = [w_{c1}, w_{c2}, \dots, w_{cn}] \quad (4.13)$$

Où  $w_{ci}$  est la valeur de poids accordée au critère  $C_i$ .

- **Étape 2** : ensuite, l'unité de la différenciation est appliquée pour calculer le vecteur de poids de chaque critère  $C_i$  en fonction de l'interface réseau. Étant donné  $N_{tw1}, N_{tw2}, \dots, N_{twK}$  l'ensemble de  $k$  réseaux accessibles pour un terminal mobile. L'expression du vecteur calculé est définie par

$$W_{C_i} = [w_{i_{N_{tw1}}}, w_{i_{N_{tw2}}}, \dots, w_{i_{N_{twK}}}] \quad (4.14)$$

- **Étape 3** : finalement, le vecteur de poids de chaque technologie réseau  $W_{N_{twi}}$  est obtenu en multipliant les éléments de deux vecteurs  $W$  et  $W_{C_i}$ . L'expression de ce vecteur est donnée par l'équation suivante :

$$W_{N_{twi}} = [W_1, W_2, \dots, W_n] \text{ avec } W_i = w_{ci} * w_{i_{N_{twi}}} \quad (4.15)$$

## 4.4.3 L'algorithme de sélection du réseau basé sur notre schéma (FADM) avec la différenciation de poids

Après avoir amélioré le module de pondération en introduisant une nouvelle unité de différenciation de poids, la mise à jour de l'algorithme de la sélection du réseau FADM se présente comme suit :

1. Construire le modèle hiérarchique en appliquant le module de pondération amélioré : ce modèle est identique au modèle de la figure 3.23. La seule différence est le fait que la méthode ANP permet de tenir en compte la dépendance entre les attributs.
2. Assigner un vecteur du poids au premier niveau de la hiérarchie : la méthode ANP est utilisée pour calculer le degré d'importance pour chaque classe (pondération inter-classe).
3. Assigner un vecteur du poids au deuxième niveau de la hiérarchie : la méthode ANP est utilisée pour associer un poids à chaque critère appartenant à la même classe (pondération intra-classe).
4. Calculer le poids de chaque critère en fonction de l'interface : l'unité de la différenciation de poids est appliquée pour calculer le degré d'importance relative à chaque critère en fonction de l'interface réseau. Le calcul de ce degré est basé sur la méthode ANP.
5. Assigner un vecteur du poids pour le troisième niveau de la hiérarchie : cette étape consiste à calculer le vecteur de poids à chaque interface réseau en utilisant l'équation 4.15.
6. Appliquer l'algorithme de mahalanobis : cet algorithme de classement (deuxième module) est utilisé pour calculer le score de performance  $C_i$  (Eq. (3.10)) pour chaque alternative réseau.
7. Choisir la meilleure alternative réseau qui correspond à la plus petite valeur du score  $C_i$ .

## 4.4.4 Simulations et résultats

### 4.4.4.1 Scénario de simulation

Pour illustrer l'efficacité de notre algorithme de la sélection du réseau avec la différenciation de poids, nous analysons les résultats fournis par les quatre algorithmes suivants :

- FADM-1 : cet algorithme de la sélection du réseau repose sur notre architecture proposée dans le chapitre 3. La seule amélioration qu'on a faite au niveau du module de pondération est d'utiliser méthode la ANP au lieu de la méthode AHP floue.
- FADM-2 : cet algorithme est similaire à l'algorithme FADM-1, la seule différence est que l'algorithme FADM-2 permet de tenir en compte le critère historique de performance.
- FADM-3 : cet algorithme est basé sur notre module de pondération amélioré qui utilise la méthode ANP au lieu de la méthode floue AHP et qui intègre l'unité de la différenciation.
- FADM-4 : cet algorithme est similaire à l'algorithme FADM-3. De plus, l'algorithme FADM-4 permet de tenir en compte le critère historique de performance contrairement à l'algorithme FADM-3.

Nous utilisons le même scénario de simulation proposé dans la section 3.3.4.1. Nous effectuons quatre simulations en fonction de quatre types de flux que nous avons déjà cités. Pour chaque simulation nous allons évaluer les performances de ces quatre algorithmes dans 100 points de décision, en utilisant MATLAB. La performance est mesurée en termes de l'anomalie de classement, le nombre de handoffs et le nombre de handover échoués. Nous présentons dans ce qui suit les résultats de ces quatre simulations.

### 4.4.4.2 La simulation 1

Dans cette simulation, nous analysons le flux en arrière-plan, dans le but de comparer la performance de notre algorithme FADM-4 par rapport aux trois algorithmes FADM-1, FADM-2 et FADM-3. Les poids calculés pour chaque critère en utilisant FADM-1 et FADM-2 sont présentés dans la figure 4.2. Tandis que le vecteur de poids accordé à chaque interface réseau en appliquant les deux algorithmes FADM-3 et FADM-4 sont illustrés respectivement dans la figure 4.3 et 4.4.

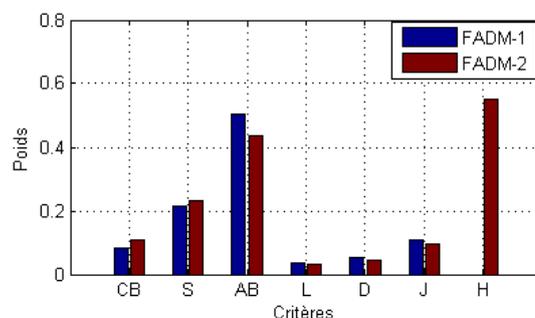


FIG. 4.2 – Pondération des critères basée sur FADM-1 et FADM-2 pour arrière-plan

#### 4.4.4 Vers une technique efficace pour la sélection du réseau basée sur la différenciation de poids

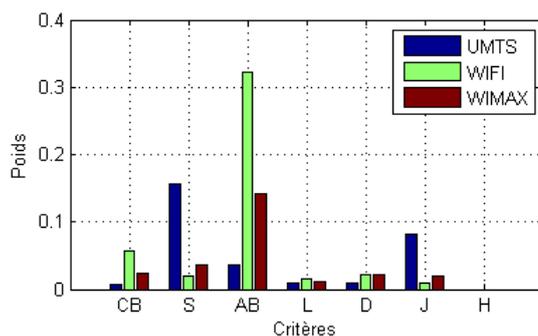


FIG. 4.3 – Différenciation de poids basée sur FADM-3 pour le flux arrière-plan

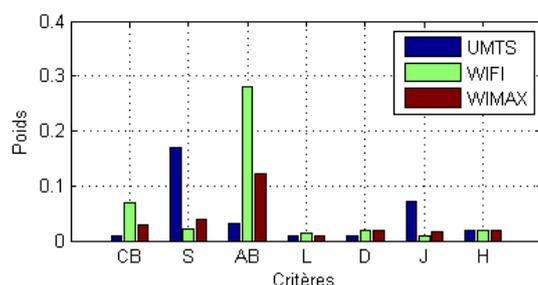


FIG. 4.4 – Différenciation de poids basée sur FADM-4 pour le flux arrière-plan

- L'anomalie de classement** : la figure 4.5 montre le taux moyen de l'anomalie de classement effectué par les quatre algorithmes FADM-1, FADM-2, FADM-3 et FADM-4 pour le flux en arrière-plan. Nous pouvons observer que la meilleure performance de l'anomalie de classement est donnée par l'algorithme FADM-4. Avec ce dernier, nous pouvons minimiser le risque d'avoir cette anomalie à 5%. Tandis que les trois algorithmes FADM-1, FADM-2 et FADM-3 permettent d'obtenir respectivement les valeurs 9.50%, 8% et 6.50%.

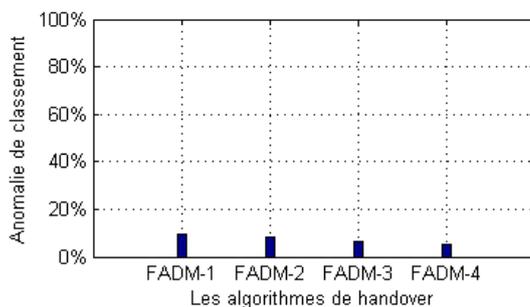


FIG. 4.5 – Variation de l'anomalie en fonction des algorithmes pour arrière-plan

- Le nombre de handoffs** : la figure 4.6 montre le taux moyen qui correspond au nombre de handoffs concernant les quatre algorithmes pour le flux en arrière-plan. D'après cette figure, nous constatons que les algorithmes FADM-1, FADM-2, FADM-3 et FADM-4 permettent de réduire cette anomalie respectivement avec les valeurs de 42%, 36%, 28% et 12%. Nous pouvons déduire que notre algorithme FADM-4

## CHAPITRE 4. UNE NOUVELLE APPROCHE DE LA SELECTION RESEAU AVEC DIFFERENCIATION DE POIDS

fournit la meilleure performance par rapport aux autres algorithmes.

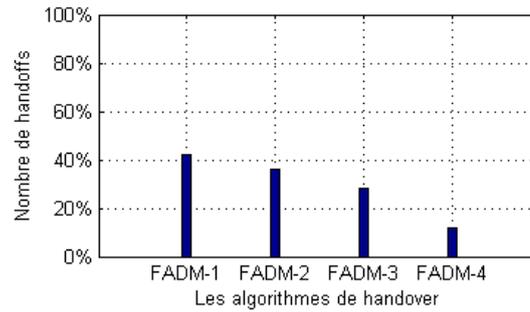


FIG. 4.6 – Variation du nombre de handoffs en fonction des algorithmes pour arrière-plan

- Le nombre de handovers échoués** : la figure 4.7 montre le pourcentage de chaque réseau préféré par un algorithme de la sélection du réseau. Nous remarquons que l'algorithme FADM-4 choisit dans la majorité de points de décisions la technologie WIMAX. Ce choix est traduit par une valeur de pourcentage de 80% du réseau préféré. En plus, la technologie WIMAX représente 20% du réseau préféré pour l'algorithme FADM-4. Vu que les deux réseaux WIFI et WIMAX peuvent satisfaire les exigences du flux en arrière-plan en terme de QoS nous pouvons affirmer que le pourcentage du handovers échoués est 0%. D'ailleurs, il n'y a aucun point de décision où l'algorithme FADM-4 choisisse le réseau UMTS. Enfin l'algorithme FADM-1 permet de prendre la meilleure décision puisqu'il favorise le réseau WIFI par rapport au réseau WIMAX. Par conséquent, le terminal mobile peut utiliser la technologie WIFI qui offre un meilleur coût de service par rapport la technologie WIMAX.

D'un autre côté, le nombre du handovers échoués provoqués par l'algorithme FADM-3 est 0%. De plus le réseau WIFI représente 48% du réseau préféré et la technologie WIMAX représente 52%. Nous pouvons déduire que l'algorithme FADM-3 permet de prendre une bonne décision malgré le choix du réseau WIMAX dans la moitié des points de décision. D'ailleurs, l'utilisateur favorise la technologie WIFI par rapport WIMAX pour transférer le flux en arrière-plan.

Finalement, le taux de handovers échoués provoqués respectivement par l'algorithme FADM-1 et FADM-2 est 32% et 20%. Par conséquent, ces deux algorithmes ne permettent pas d'assurer la bonne décision concernant la sélection du réseau.

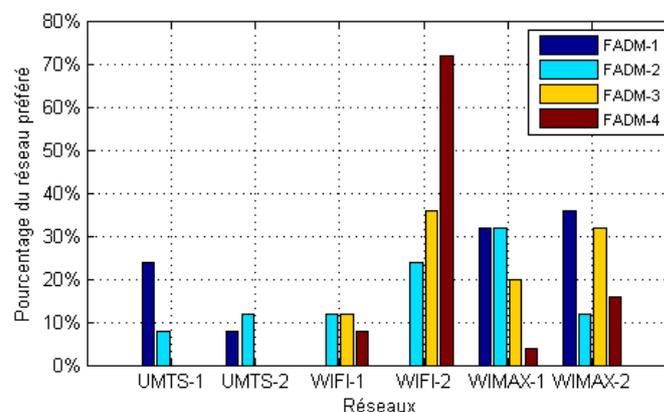


FIG. 4.7 – Variation de handovers échoués en fonction des algorithmes pour arrière-plan

### 4.4.4.3 La simulation 2

Cette simulation consiste à comparer la performance entre les quatre algorithmes FADM-1, FADM-2, FADM-3 et FADM-4 pour le flux conversationnel. Les poids calculés pour chaque critère en utilisant FADM-1 et FADM-2 sont présentés dans la figure 4.8. De plus, le vecteur de poids accordé à chaque interface réseau en utilisant les deux algorithmes FADM-3 et FADM-4 sont illustrés respectivement dans la figure 4.9 et 4.10.

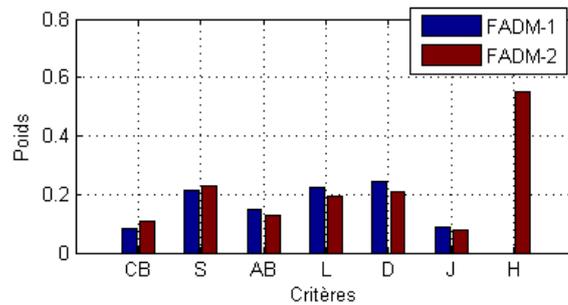


FIG. 4.8 – Pondération des critères basés sur FADM-1 et FADM-2 pour conversationnel

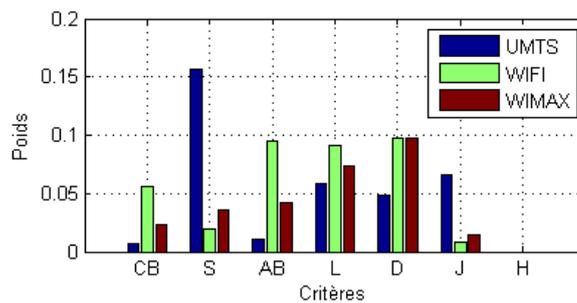


FIG. 4.9 – Différenciation de poids basée sur FADM-3 pour le flux conversationnel

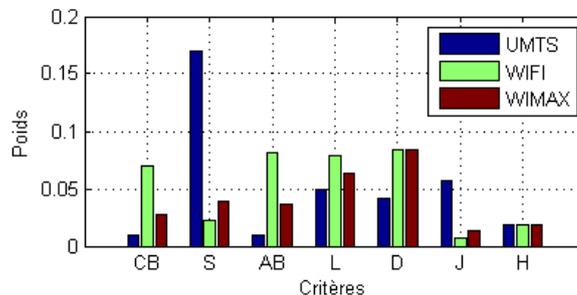


FIG. 4.10 – Différenciation de poids basée sur FADM-4 pour le flux conversationnel

- L'anomalie de classement** : la figure 4.11 montre les résultats obtenus avec ces quatre algorithmes pour le paramètre l'anomalie de classement en fonction du flux conversationnel. Nous observons que les algorithmes FADM-1, FADM-2, FADM-3 et FADM-4 permettent d'obtenir respectivement les valeurs 8.50%, 7%, 5.5% et 4%.

## CHAPITRE 4. UNE NOUVELLE APPROCHE DE LA SELECTION RESEAU AVEC DIFFERENCIATION DE POIDS

Vu que la valeur fournie par l'algorithme FADM-4 est plus faible par rapport aux valeurs des autres méthodes, nous pouvons déduire que notre algorithme FADM-4 fournit la meilleure performance concernant l'anomalie de classement.

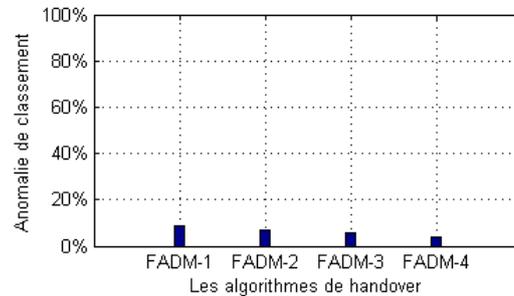


FIG. 4.11 – Variation de l'anomalie en fonction des algorithmes pour conversationnel

- **Le nombre de handoffs** : la figure 4.12 montre une comparaison de la variation du nombre du handoffs provoqué par le terminal mobile en fonction des quatre algorithmes pour le conversationnel. Nous pouvons constater que les quatre algorithmes FADM-1, FADM-2, FADM-3 et FADM-4 permettent de réduire respectivement le nombre de handoffs avec les valeurs 36%, 34%, 25% et 10%. D'après ces valeurs, nous pouvons conclure que l'algorithme FADM-4 fournit la meilleure performance par rapport aux autres algorithmes.

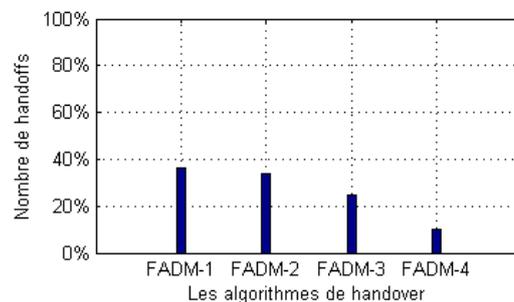


FIG. 4.12 – Taux de nombre de handoffs en fonction des algorithmes pour conversationnel

- **Le nombre de handovers échoués** : la figure 4.13 présente une comparaison de la variation du réseau préféré par le terminal mobile en fonction des quatre algorithmes, pour le conversationnel. D'après cette figure, nous remarquons que le réseau UMTS a été choisi à 56% comme un réseau préféré pour l'algorithme FADM-1. Nous remarquons également que le même réseau est considéré préféré par l'algorithme FADM avec un pourcentage de 32%. La décision effectuée par l'algorithme FADM-1 et FADM-2 est un mauvais choix, vu que le réseau UMTS n'est pas adéquat au transfert du flux conversationnel lors de l'existence de deux autres interfaces telles que WIFI et WIMAX.

En revanche, la décision prise par les deux algorithmes FADM-3 et FADM-4 est parfaitement valide en raison de l'absence de la sélection du réseau UMTS dans tous les points de décision. Ce qui implique que le taux du handovers échoués provoqués par ces deux algorithmes est égal à 0%. De plus, la technologie WIMAX a été choisie presque que à 70% comme un réseau préféré pour les deux algorithmes FADM-3 et FADM-4. Finalement, nous signalons que l'algorithme FADM-4 donne une meilleure

#### 4.4.4 Vers une technique efficace pour la sélection du réseau basée sur la différenciation de poids

possibilité au terminal mobile pour utiliser l'interface WIFI avec un coût de service faible pour le flux conversationnel.

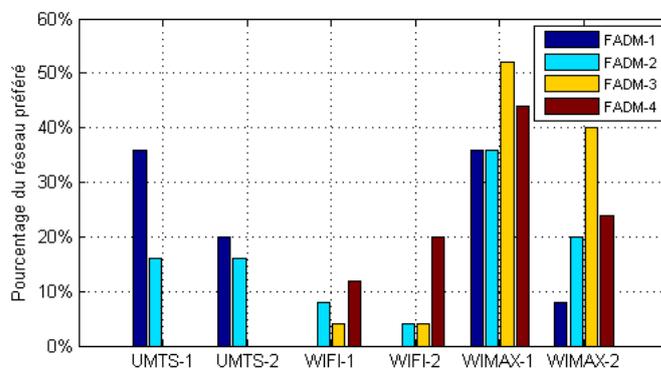


FIG. 4.13 – Taux de handovers échoués en fonction des algorithmes pour conversationnel

#### 4.4.4.4 La simulation 3

Nous comparons dans cette simulation les performances des quatre algorithmes FADM-1, FADM-2, FADM-3 et FADM-4 en fonction de l'anomalie de classement, le nombre de handoffs et le nombre de handovers échoués. Cette comparaison se fait pour le flux interactif. Les poids calculés pour chaque critère en utilisant FADM-1 et FADM-2 sont présentés dans la figure 4.14. De plus, le vecteur de poids accordé à chaque interface réseau en utilisant les deux algorithmes FADM-3 et FADM-4 sont illustrés respectivement dans la figure 4.15 et 4.16.

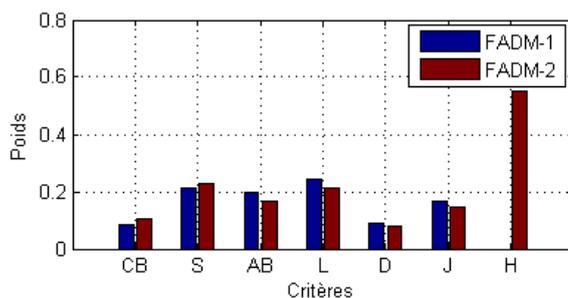


FIG. 4.14 – Pondération des critères basés sur FADM-1 et FADM-2 pour interactif

- L'anomalie de classement** : la figure 4.17 présente le taux moyen de l'anomalie de classement pour les algorithmes FADM-1, FADM-2, FADM-3 et FADM-4 pour le flux interactif. Nous observons que l'algorithme FADM-4 fournit une meilleure performance concernant ce paramètre par rapport aux autres algorithmes. Il permet de réduire ce problème de 10%. Nous remarquons également que l'algorithme FADM-3 fournit une valeur de 12% mieux que les deux autres algorithmes à savoir FADM-1 et FADM-2. De plus, l'algorithme réduit le risque d'avoir cette anomalie d'une valeur de 14%. Finalement, la mauvaise performance est donnée par l'algorithme FADM-1 avec une valeur de 15.50%.

## CHAPITRE 4. UNE NOUVELLE APPROCHE DE LA SELECTION RESEAU AVEC DIFFERENCIATION DE POIDS

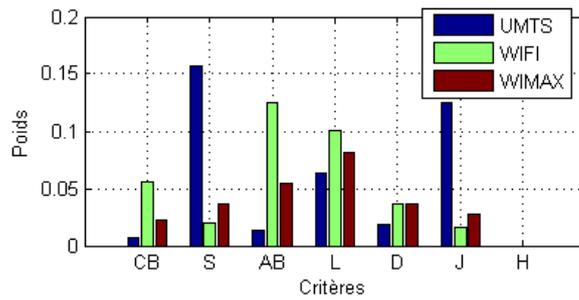


FIG. 4.15 – Différenciation de poids basée sur FADM-3 pour le flux interactif

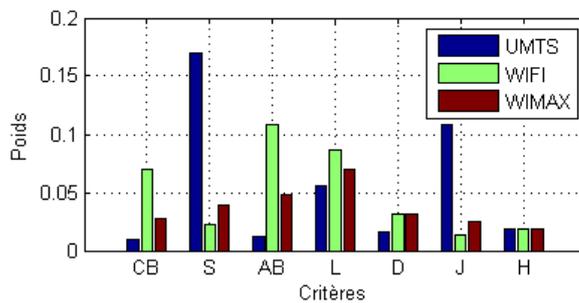


FIG. 4.16 – Différenciation de poids basée sur FADM-4 pour le flux interactif

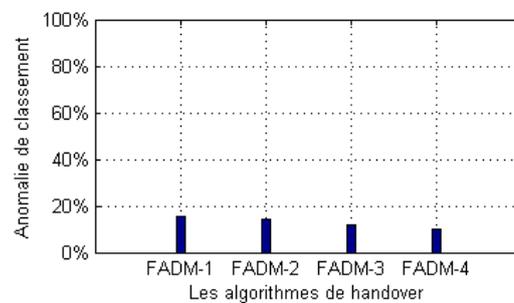


FIG. 4.17 – Variation de l'anomalie en fonction des algorithmes pour interactif

- Le nombre de handoffs** : la figure 4.18 montre le taux moyen qui correspond au nombre de handoffs effectué par les algorithmes FADM-1, FADM-2, FADM-3 et FADM-4 pour le flux interactif. Nous pouvons constater que ces quatre algorithmes fournissent respectivement les valeurs de 52%, 45%, 36% et 15%. Vu que la valeur fournie par l'algorithme FADM-4 est la plus faible par rapport aux autres méthodes, nous pouvons déduire que la meilleure performance concernant le nombre de handoffs est fournie par l'algorithme FADM-4.
- Le nombre de handovers échoués** : la figure 4.19 montre le pourcentage du réseau préféré par le terminal mobile en fonction des quatre algorithmes, pour le flux interactif. Nous remarquons que le taux d'échec de la décision du handover est élevé pour les deux algorithmes FADM-1 et FADM-2. Cet échec se manifeste par le choix du réseau UMTS par les deux algorithmes, à 80% pour l'algorithme FADM-1 et à 44% pour l'algorithme FADM-2. D'ailleurs le réseau UMTS n'est pas adéquat pour transférer le trafic interactif par rapport au réseau WIMAX et WIFI.

#### 4.4.4 Vers une technique efficace pour la sélection du réseau basée sur la différenciation de poids

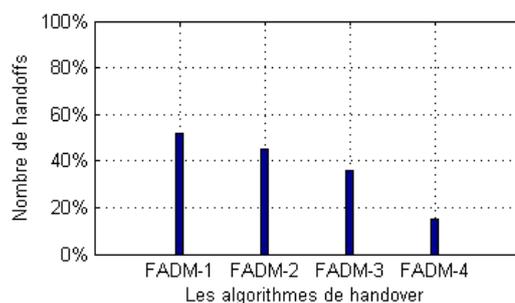


FIG. 4.18 – Variation du nombre de handoffs en fonction des algorithmes pour interactif

Nous remarquons également que le taux d'échec de la décision du handover est nul pour les deux algorithmes FADM-3 et FADM-4. Par conséquent, les deux algorithmes FADM-3 et FADM-4 permettent de fournir une meilleure décision concernant la sélection du réseau cible. De plus, la technologie WIFI a été choisie à 8% comme un réseau préféré pour l'algorithme FADM-3 et à 20% pour l'algorithme FADM-4. Cette dernière valeur offre la possibilité au terminal mobile d'utiliser l'interface WIFI avec un coût de service faible pour le flux interactif.

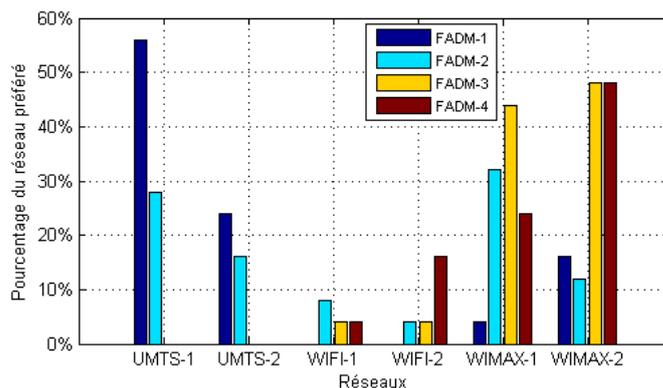


FIG. 4.19 – Variation de handovers échoués en fonction des algorithmes pour interactif

#### 4.4.4.5 La simulation 4

La dernière simulation consiste à comparer les trois paramètres de performances pour les quatre algorithmes en fonction du flux streaming. Les poids calculés pour chaque critère en utilisant FADM-1 et FADM-2 sont présentés dans la figure 4.20. De plus, le vecteur de poids accordé à chaque interface réseau en appliquant les deux algorithmes FADM-3 et FADM-4 sont illustrés respectivement dans la figure 4.21 et 4.22.

- L'anomalie de classement** : la figure 4.23 présente le taux moyen de l'anomalie de classement provoqué par les algorithmes FADM-1, FADM-2, FADM-3 et FADM-4. Nous observons que FADM-1 réduit ce problème d'une valeur de 18%. L'algorithme FADM-2 réduit l'anomalie d'une valeur de 16%. Ensuite, l'algorithme FADM-3 permet de fournir une valeur de 14.50. Finalement, l'algorithme FADM-4 réduit cette anomalie d'une valeur de 12%. Nous pouvons déduire que cet dernier algorithme permet d'obtenir une meilleure performance concernant l'anomalie de classement par rapport aux FADM-1, FADM-2 et FADM-3.

## CHAPITRE 4. UNE NOUVELLE APPROCHE DE LA SELECTION RESEAU AVEC DIFFERENCIATION DE POIDS

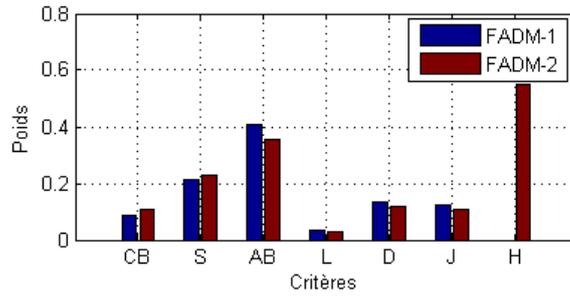


FIG. 4.20 – Pondération des critères basés sur FADM-1 et FADM-2 pour streaming

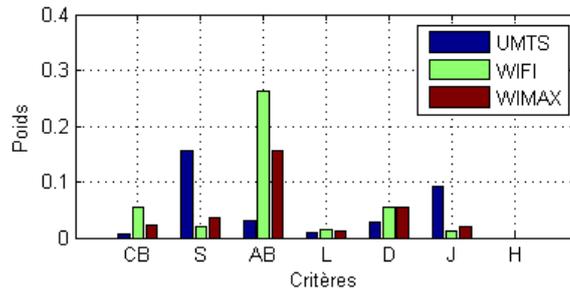


FIG. 4.21 – Différenciation de poids basée sur FADM-3 pour le flux streaming

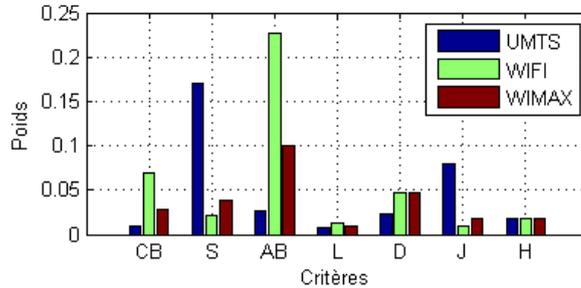


FIG. 4.22 – Différenciation de poids basée sur FADM-4 pour le flux streaming

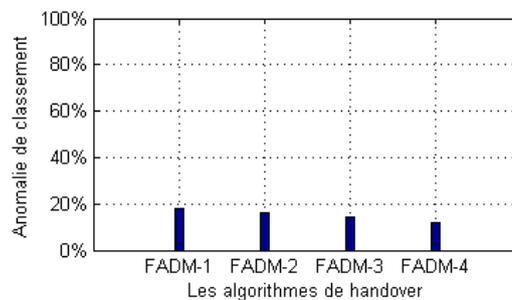


FIG. 4.23 – Variation de l’anomalie en fonction des algorithmes pour streaming

- **Le nombre de handoffs** : la figure 4.24 présente le taux moyen qui correspond au nombre de handoffs effectués par les quatre algorithmes pour le flux streaming. Nous observons que FADM-1, FADM-2, FADM-3 et FADM-4 permettent de réduire

#### 4.4.4 Vers une technique efficace pour la sélection du réseau basée sur la différenciation de poids

le nombre de handoffs respectivement à les valeurs de 45%, 36%, 28% et 18%. Nous remarquons également que la valeur donnée par l'algorithme FADM-4 est plus faible par rapport aux autres méthodes. Par conséquent, nous pouvons déduire que l'algorithme FADM-4 fournit la meilleure performance concernant le nombre de handoffs pour le flux streaming.

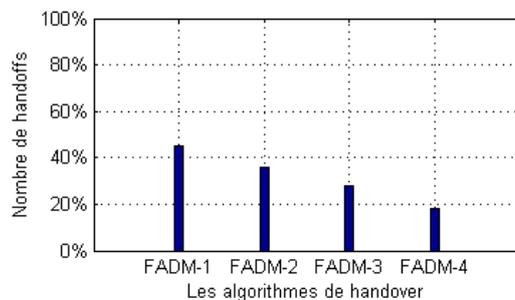


FIG. 4.24 – Variation du nombre de handoffs en fonction des algorithmes pour streaming

- Le nombre de handovers échoués** : la figure 4.25 montre que les deux algorithmes FADM-3 et FADM-4 permettent de fournir la même performance dans la majorité de points de décision. D'ailleurs, le taux moyen du nombre de handoffs effectué par les deux algorithmes est égal à 0. De plus, la technologie WIMAX a été choisie à 80% comme un réseau préféré pour les deux algorithmes. Ce qui implique une meilleure décision vu que le réseau WIMAX peut satisfaire les exigences du trafic streaming en termes de QoS. Nous remarquons également que FADM-3 et FADM-4 ont choisi la technologie WIFI en 20% des points de décision.

Par contre, les deux algorithmes FADM-1 et FADM-2 ont choisi la technologie UMTS comme un réseau préféré respectivement avec des valeurs de 40% et 28%. Cependant, cette décision effectuée par ces deux algorithmes n'est pas favorable vu que le réseau UMTS ne peut transférer le trafic streaming avec une meilleure QoS par rapport au réseau WIMAX. Finalement, nous remarquons que le réseau WIMAX a été choisi à 60% comme un réseau préféré pour les deux algorithmes FADM-1 et FADM-2.

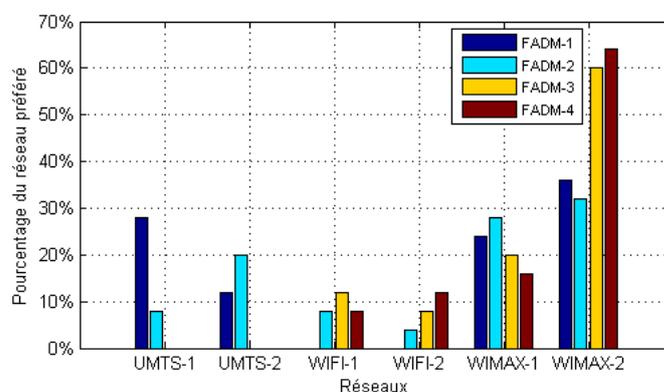


FIG. 4.25 – Variation de handovers échoués en fonction des algorithmes pour streaming

### 4.4.5 Discussion

Dans cette contribution, nous avons proposé une optimisation de notre architecture de la sélection du réseau FADM. Cette optimisation a été basée sur l'amélioration du module de pondération. En effet, nous avons intégré une nouvelle unité de la différenciation de poids au niveau de ce module. L'avantage majeur de cette unité est de calculer le degré d'importance relative à chaque critère en fonction de l'interface réseau. Par conséquent, notre nouvelle unité de différenciation a permis de surmonter l'inconvénient majeur des méthodes de pondération qui réside dans la pondération des critères indépendamment de la technologie réseau. Le nouveau module de pondération améliorée contient trois composants : le système inter-classes, le système intra-classes et l'unité de différenciation. Ceci implique de différencier le poids de chaque critère en fonction de l'interface réseau. Par la suite, ce nouveau module permet de fournir une meilleure pondération de différents critères par rapport à l'ancien module de pondération.

En outre, afin de mettre en évidence l'efficacité du module de la pondération améliorée et l'avantage d'introduire l'unité de différenciation du poids, nous avons effectué quatre simulations en fonction de quatre types de flux. La première conclusion que nous pouvons tirer à partir des résultats fournis à travers des quatre simulations est tout d'abord que pour tous les types de flux, l'algorithme FADM-4 fournit la meilleure performance par rapport aux algorithmes FADM-1, FADM-2 et FADM-3. Cela permet d'expliquer d'une part, l'utilité d'introduire le critère de l'historique de performance et d'autre part, l'avantage d'ajouter le composant de différenciation de poids dans le module de pondération.

Une deuxième remarque importante concerne le taux de l'échec de la décision effectuée par les quatre algorithmes. Nous remarquons que les deux algorithmes FADM-3 et FADM-4 permettent de fournir un taux d'échec nul contrairement aux deux algorithmes FADM-1 et FADM-2. Nous pouvons expliquer ces résultats par le fait que les deux algorithmes FADM-3 et FADM-4 utilisent le module de pondération améliorée, tandis que les deux algorithmes FADM-1 et FADM-2 reposent sur l'ancien module de pondération qui ne tient pas compte de l'unité de la différenciation.

La troisième remarque est que FADM-2 permet de fournir une meilleure performance concernant l'anomalie de classement et le nombre de handoffs par rapport à l'algorithme FADM-1. Cela est dû à l'utilisation du critère historique de performance dans l'algorithme FADM-2. En plus, la méthode FADM-3 permet de réduire l'anomalie du classement et le nombre de handoffs mieux que l'algorithme FADM-2. Nous pouvons déduire que l'unité de la différenciation est plus efficace par rapport à l'introduction du critère historique de performance.

Enfin, la quatrième remarque est en relation avec la performance de l'algorithme FADM qu'on a simulé dans le chapitre 3. Vu que nous avons utilisé le même scénario de simulation pour les deux algorithmes FADM et FADM-1, nous remarquons que ce dernier algorithme permet de fournir une meilleure performance concernant l'anomalie de classement et le nombre de handoffs par rapport à l'algorithme FADM. Cette amélioration obtenue par l'algorithme FADM-1 explique d'un côté l'utilité de remplacer la méthode floue AHP par la méthode ANP dans le module de pondération. D'un autre côté, nous confirmons les résultats obtenus par notre nouvelle approche de la validation qui a choisi la méthode ANP comme la plus adéquate pour la pondération des critères.

## 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'optimisation du module de pondération de notre architecture FADM. Pour ce faire, nous avons proposé deux contributions dans ce chapitre. Les résultats des différentes simulations effectuées dans chaque contribution en fonction de type de flux ont été très satisfaisantes. En effet, d'une part, nous avons proposé une première contribution afin de spécifier la méthode de pondération appropriée à être couplée avec l'architecture FADM. En effet, nous avons utilisé l'approche de la décision collective afin de développer une nouvelle solution pour la validation des algorithmes du handover. Cette solution proposée a pour but de déterminer la méthode de pondération adéquate qu'il faut coupler avec n'importe quel algorithme de classement en fonction du type de flux. Nous avons appliqué cette approche de validation dans le cadre de notre architecture FADM afin de valider le choix de la méthode de pondération dans le contexte de notre architecture FADM.

D'autre part, dans notre deuxième contribution, nous avons proposé d'ajouter une nouvelle unité de différenciation de poids au niveau du module de pondération. L'avantage majeur de cette unité est le fait de calculer le poids de chaque critère en fonction de l'interface réseau. Les simulations que nous avons menées dans cette contribution ont effectivement validé l'optimisation que nous avons apportée à notre architecture FADM. D'ailleurs, avec la différenciation de poids, une meilleure performance concernant l'anomalie de classement et le nombre de handoffs est obtenue. De plus, le fait de combiner la méthode de Mahalanobis et l'unité de différenciation de poids permet d'éviter des handovers échoués. Par conséquent, assurer une qualité de service supplémentaire lors du processus du handover. Enfin, nous signalons qu'il est important de tenir en compte l'unité de la différenciation dans n'importe quelle solution du handover vertical.

Finalement, à travers les résultats obtenus dans les deux contributions, la nouvelle architecture FADM est devenue comme suit :

- **Le module de pondération** : nous remplaçons la méthode AHP floue par la méthode ANP. De plus, nous confirmons l'utilité d'ajouter une nouvelle unité de la différenciation de poids ;
- **Le module de classement** : vu l'efficacité de la méthode de Mahalanobis, nous utilisons le même module de classement.

L'optimisation du module de pondération que nous avons réalisé au cours de ce chapitre, ainsi que les résultats très satisfaisants que nous avons obtenus grâce à cette amélioration, nous encourageons la poursuite de cette étude en vue d'améliorer davantage l'architecture FADM. Pour ce faire, dans le chapitre suivant, nous proposons d'envisager des optimisations en termes de critères qui interviennent dans la phase de la sélection du réseau.

---

---

## CHAPITRE 5

---

# VALIDATION ET OPTIMISATION DE L'ARCHITECTURE FADM

### 5.1 Introduction

L'architecture FADM que nous avons développé dans cette thèse est le fruit de l'ensemble des contributions proposées et validées à travers les simulations effectuées dans les deux chapitres précédents. Dans ce dernier chapitre, nous continuons à optimiser davantage cette architecture afin de satisfaire les exigences de l'utilisateur en termes de qualité de service. Comme nous l'avons déjà mentionné dans le deuxième chapitre, la conception et le développement d'une solution pour le handover vertical doivent prendre en compte trois facteurs essentiels : l'algorithme de classement, l'algorithme de pondération et les critères de la sélection. Or, notre architecture prend en considération uniquement les deux premiers facteurs. Pour ce faire, nous nous intéressons au troisième facteur qui représente un axe de recherches pertinent dans le contexte de la sélection du réseau.

De plus, bien que nous ayons élaboré une architecture efficace pour la sélection du réseau, nous ne l'avons pas encore validée. Le processus de validation consiste à évaluer notre architecture par rapport aux autres stratégies proposées dans la littérature dans le contexte de la sélection du réseau. Pour atteindre cet objectif, il est important d'introduire un modèle d'évaluation permettant de comparer et d'évaluer notre architecture.

Ce chapitre est structuré de la façon suivante : la deuxième section du chapitre s'articule autour d'un aperçu sur les limites des modèles d'évaluation existants. A l'issue de cette étude bibliographique, dans la troisième section, nous décrivons le principe et les limites du modèle d'évaluation sur lequel s'est basé notre travail. A la quatrième section, nous proposons notre modèle d'évaluation évolutif. Dans la cinquième section, nous appliquons ce modèle d'évaluation évolutif afin de valider l'architecture FADM. Le même modèle sera utilisé dans la sixième section, afin de résoudre le problème de la sélection de critères. Finalement, la septième section contient des conclusions de ce chapitre.

## 5.2 Intérêts et limitations des modèles d'évaluation du handover existants

Après avoir développé et amélioré notre architecture FADM qui permet à l'utilisateur mobile de choisir la meilleure technologie, nous pouvons nous poser les questions suivantes :

1. Est-ce que notre architecture proposée est valide en terme de performance par rapport aux autres solutions existantes ?
2. Y a t-il des optimisations supplémentaires possibles au niveau de cette architecture ?

En réponse à la première question, bien que notre architecture FADM permet de fournir de meilleurs résultats par rapport aux quelques algorithmes de handover, nous ne l'avons pas encore testée pour valider si elle est la meilleure solution existante dans la littérature. Afin d'y parvenir, il est nécessaire d'utiliser un modèle d'évaluation dans le but de comparer les performances de notre architecture FADM par rapport aux autres algorithmes du handover existants.

En réponse à la deuxième question posée, effectivement, nous pouvons améliorer davantage l'architecture FADM, en tenant compte du bloc de critères qui intervient dans la phase de décision. Par rapport à notre architecture, ce bloc représente les données d'entrées manipulées par le module de pondération et le module de classement. Notre dernier objectif est d'analyser et de traiter le bloc de critères afin d'améliorer la performance de notre architecture FADM. Comme nous l'avons déjà mentionné auparavant, plusieurs critères sont employés dans la phase de la décision du handover. Parmi les critères les plus répandus, nous citons : la bande passante, la puissance du signal, le coût de service, le délai, la perte, la sécurité, etc. Cependant, le choix des critères représente l'une des clés importantes dans la phase de la conception d'une stratégie de handover vertical. Si le choix de critères est fait d'une manière efficace, l'algorithme du handover fournit une meilleure performance. Or, la majorité des solutions du handover proposées ne prend pas en compte ce facteur de choix. Généralement, chaque nouvelle solution développée repose sur les critères souvent utilisés dans une autre stratégie, sans faire aucune étude sur la nécessité d'utilisation ou d'élimination d'un tel critère. En plus, aucune solution proposée dans la littérature ne justifie son choix des critères, qui reste un sujet ouvert dans le contexte du handover.

Une étude bibliographique, nécessaire mais n'est pas suffisante pour résoudre le problème du choix des critères en fonction du mécanisme du handover, a été faite par les auteurs [100]. Ils ont présenté quelques recherches qui ont été publiées concernant les critères employés dans sept algorithmes du handover. L'ensemble des critères considérés dans cette étude sont : la bande passante, le temps de latence, la consommation d'énergie, le coût de service, les préférences de l'utilisateur, le débit, le partage de charge, la sécurité, la puissance du signal reçu et la vitesse. Selon cette étude, il n'y a aucun algorithme qui prend en considération les dix critères simultanément. De plus, tous les algorithmes utilisent au moins cinq critères dans la phase de la sélection. Or, cette étude n'est pas suffisante pour comprendre le problème de la sélection de critères vu qu'il n'y a aucune validation des résultats obtenus, ni par la simulation, ni par une approche analytique.

Un autre problème relatif toujours au choix de critères est celui de la redondance. En fait, cette redondance se traduit par l'utilisation des critères qui sont en relation (dépendance) entre eux. Par exemple, il existe une relation entre le délai et la gigue. Or, ce problème influence directement le temps de latence du handover. En effet, l'équation 5.1 présente l'expression pour calculer le temps de latence.

$$TempsLatence_{VHO} = Latence_{Initiation} + Latence_{Decision} + Latence_{Execution} \quad (5.1)$$

Le temps de latence de l'initiation requis pour collecter les informations des critères non redondants est inférieur à celui de latence de l'initiation pour les critères redondants. Nous retenons la même remarque pour le temps de la décision. Par conséquent, si nous arrivons à éviter ce problème, automatiquement le temps de latence sera réduit. Nous signalons que ce problème implique aussi d'autres paramètres tels que la consommation d'énergie, l'anomalie de classement, etc. Bien que le problème de la redondance cause la dégradation de la qualité de service, toutes les stratégies du handover ne prennent pas en considération ce facteur.

Le dernier problème à résoudre réside dans l'identification des critères qui doivent être utilisés en fonction du type de flux. Or, toutes les solutions de handover choisissent les critères de la sélection indépendamment de type du flux. Autrement dit, les mêmes critères sont utilisés dans le contexte du handover pour les différents types du flux. En réalité, chaque algorithme du handover doit prendre en considération les critères qui représentent les exigences de n'importe quel type d'application. A titre d'exemple, nous ne pouvons pas ignorer le critère délai lorsque nous cherchons à déterminer la meilleure interface pour le flux streaming.

Pour surmonter les problèmes que nous avons cités au-dessus, nous avons besoin d'utiliser un modèle d'évaluation. Dans le contexte du handover, un modèle d'évaluation est efficace s'il permet de tenir en compte les trois facteurs suivants :

- **Algorithme de classement** : pour ce facteur, le modèle d'évaluation doit déterminer le meilleur algorithme de classement qu'il faut appliquer pour ranger les alternatives réseaux. Comme nous l'avons déjà évoqué dans le chapitre 2, plusieurs modèles d'évaluation ont été proposés et développés afin d'évaluer et comparer la performance des algorithmes de classement. Or, il n'existe aucune étude comparative des modèles visant à choisir le modèle d'évaluation adéquat dans le contexte des algorithmes de classement.
- **Algorithme de pondération** : dans ce contexte, le modèle d'évaluation vise à identifier la méthode de pondération adéquate qu'il faut appliquer pour calculer le poids. Bien que l'évaluation de performance des méthodes de pondération soit un processus décisif dans l'algorithme de la sélection du réseau, les seuls travaux qui abordent ce problème, sont nos deux contributions [87] et [80] présentées dans le chapitre précédent.
- **Les critères de sélection** : dans ce cadre, le modèle d'évaluation doit être capable de préciser les critères appropriés à être employés dans la phase de la sélection du réseau. Or, dans la littérature, il n'existe aucun modèle d'évaluation pour réaliser cette tâche. L'objectif de ce modèle d'évaluation sera la comparaison de la performance d'un algorithme de handover en fonction des critères de la sélection utilisés par l'algorithme. Les modèles proposés pour l'évaluation des performances des algorithmes de classement peuvent être exploités dans ce cadre. Autrement dit, nous n'avons pas besoin de développer un nouveau modèle consacré à l'évaluation des critères en raison que cette évaluation revient à comparer le même algorithme de classement, en changeant seulement les critères de la sélection qui interviennent dans cet algorithme de classement.

Vu la diversité des modèles d'évaluation, la question que nous pouvons nous poser est la suivante : quel est le meilleur modèle d'évaluation à choisir afin de répondre à nos besoins? Parmi les modèles d'évaluation que nous avons déjà mentionnés, notre choix s'est fixé sur le modèle proposé par les auteurs Alexander et al. [35] et [34]. D'ailleurs, ce choix n'est pas arbitraire, il s'appuie sur le fait que le modèle choisi possède les avantages suivants :

- Le modèle choisi est essentiellement basé sur une approche mathématique pour évaluer la performance des algorithmes de handover.

### 5.5.3 Le schéma du modèle d'évaluation choisi

- Le modèle introduit l'approche MADM et l'analyse de criticité qui permettent de fournir un meilleur résultat.
- La simplicité d'implémenter le modèle par rapport aux autres solutions en C++ ou Java.
- La flexibilité en termes de paramètres d'évaluation. En effet, on peut ajouter facilement de nouveaux paramètres dans le modèle.
- Le modèle peut être adapté pour évaluer les méthodes de pondération dans le contexte du handover vertical.

Dans la section suivante, nous exposons le principe et les limites de ce modèle sur lequel repose notre travail avant de présenter nos contributions pour résoudre le problème de la sélection des critères, ainsi que notre démarche pour valider notre architecture FADM.

## 5.3 Le schéma du modèle d'évaluation choisi

La figure 5.1 illustre le schéma du modèle d'évaluation proposé par les auteurs Alexander et al. [35] [34]. Ce schéma est décomposé en trois blocs ci-dessous :

1. **Le processus de la simulation** : ce bloc fonctionnel a pour but de simuler les différents algorithmes de handover afin d'évaluer leurs performances. Les algorithmes de handover constituent les données d'entrée de ce bloc, alors que les paramètres d'évaluation obtenus, en appliquant chaque algorithme de handover, représentent ses résultats de sortie.
2. **Le modèle d'évaluation** : il représente le noyau du schéma d'évaluation. Ce bloc combine l'approche MADM et l'analyse de la criticité afin de calculer l'indice de criticité. Puis-que l'objectif est de déterminer la meilleure solution du handover, il est important d'appliquer l'approche MADM. L'ensemble des algorithmes de handover représentent les alternatives possibles, quant aux paramètres d'évaluation, ils représentent les critères de décision. De plus, l'analyse de criticité est utilisée dans le but de déterminer les alternatives ayant un degré d'importance supérieur aux autres. L'algorithme du handover qui possède la plus grande valeur de l'indice criticité est considéré comme le meilleur. Les données traitées par ce bloc sont les mesures de paramètres d'évaluation fournies par le premier bloc. Le modèle génère les résultats sous la forme d'un fichier XML. Ce fichier contient les différentes valeurs de l'indice de criticité de chaque algorithme. Les différentes étapes effectuées par ce bloc pour générer ce fichier XML seront détaillées dans la section suivante.
3. **Les interfaces graphiques API** : ce bloc consiste à interpréter graphiquement les résultats obtenus à travers le modèle d'évaluation.



FIG. 5.1 – Le schéma du modèle d'évaluation pour les algorithmes du handover [35]

Bien que ce schéma d'évaluation [92] représente une solution prometteuse pour déterminer le meilleur algorithme du handover en combinant l'approche MADM et l'analyse de criticité,

il possède un inconvénient majeur au niveau du deuxième bloc. En effet, lors du calcul de l'indice de l'analyse de criticité, le modèle d'évaluation ne prend pas en considération le degré d'importance relatif à chaque paramètre d'évaluation fourni par le bloc du processus de la simulation. Pour cela, notre objectif consiste à proposer un modèle d'évaluation évolutif qui tient en compte le problème relatif à la pondération des paramètres d'évaluation. Ce modèle d'évaluation proposé sera utilisé en premier lieu pour valider notre architecture FADM. En deuxième lieu, nous exploitons ce modèle afin de remédier au problème de la redondance de critères.

## 5.4 Notre proposition : Le processus du modèle d'évaluation évolutif

Nous proposons dans cette contribution, notre modèle d'évaluation amélioré [74]. L'objectif de base de notre modèle est de combler les lacunes de l'ancien [92]. Pour ce faire, nous avons développé un nouveau modèle d'évaluation qui repose sur la même idée et le même principe de fonctionnement que l'ancien modèle proposé dans [92]. L'apport de notre modèle proposé par rapport à l'ancien modèle, réside dans l'introduction de la méthode de pondération ANP dans les étapes de calcul de l'indice de criticité. En effet, la méthode ANP est appliquée afin de calculer le poids de chaque paramètre d'évaluation. Par conséquent, notre idée d'utiliser cette méthode permet de résoudre définitivement l'inconvénient de l'ancien modèle. Le principe de fonctionnement de notre processus d'évaluation amélioré repose sur les étapes suivantes :

1. Identifier les paramètres d'évaluation : ces paramètres représentent les indicateurs qui influencent la performance de l'algorithme de la sélection du réseau. De plus, ils sont utilisés afin de comparer et d'évaluer les algorithmes du handover. Les différents paramètres d'évaluation existants sont déjà cités dans le chapitre 1.
2. Construire la matrice d'évaluation : dans le cadre de l'approche MADM, cette matrice représente la matrice de la décision. Elle contient l'évaluation de chaque algorithme de handover  $Alg_i$  en fonction du paramètre d'évaluation  $P_j$ . La matrice de décision est exprimée par l'équation suivante :

$$EM = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & \dots & v_{1m} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & \dots & v_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{n1} & v_{n2} & \dots & \dots & v_{nm} \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

- Les lignes contiennent l'ensemble des algorithmes de handover (alternatives)  
 $Alg = \{Alg_i, i = 1, 2, 3, \dots, n\}$
  - Les colonnes indiquent les paramètres d'évaluation (attributs)  $P = \{P_i, i = 1, 2, 3, \dots, m\}$
  - $v_{ij}$  représente la performance fournie par l'algorithme  $Alg_i$  en fonction du paramètre d'évaluation  $P_j$ . La valeur  $v_{ij}$  est obtenu à travers la simulation de l'algorithme du handover.
3. Normaliser la matrice d'évaluation : afin de contrôler l'importance de différents paramètres d'évaluation et d'unifier leurs unités de mesure, nous construisons la matrice d'évaluation normalisée  $EM_{norm}$ . La technique de normalisation par le maximum est utilisée pour calculer les éléments de cette matrice normalisée. La forme générale de

### 5.5.4 Notre proposition : Le processus du modèle d'évaluation évolutif

cette matrice est donnée par l'équation suivante :

$$EM_{norm} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & \dots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & \dots & d_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & v_{n2} & \dots & \dots & d_{nm} \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

Où la valeur de chaque élément  $d_{ij}$  est défini comme suit :

– Pour un critère de bénéfice, la valeur de  $d_{ij}$  est calculée par :

$$d_{ij} = \frac{v_{ij}}{v_j^{max}} \quad (5.4)$$

– Pour un critère de coût, la valeur de  $r_{ij}$  est calculée par :

$$d_{ij} = \frac{v_j^{min}}{v_{ij}} \quad (5.5)$$

4. Construire la matrice de criticité : selon l'échelle d'évaluation définie dans le tableau 5.1, nous analysons la matrice normalisée obtenue à travers l'équation 5.3 afin de construire la matrice de criticité  $C(c_{ij})$ . L'expression de la matrice C est définie par l'équation suivante :

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & \dots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & \dots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & v_{n2} & \dots & \dots & c_{nm} \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

Où la valeur de chaque élément  $c_{ij}$  est égale à  $k$ . La valeur de  $k$  est donnée en fonction de la valeur normalisée  $d_{ij}$  selon le tableau 5.1.

TAB. 5.1 – l'échelle d'évaluation de la matrice de criticité

Very low k=1	Low k=3	Medium k=5	Highk=7	Very high k=9
$d_{ij} > 80\%$ of the max value	$d_{ij} > 60\%$ of the max value	$d_{ij} > 40\%$ of the max value	$d_{ij} > 20\%$ of the max value	$d_{ij} \leq 20\%$ of the max value

5. Pondérer la matrice de criticité : cette étape représente notre apport par rapport à l'ancien modèle [92]. Elle permet de contourner le problème de pondération de différents paramètres d'évaluation en introduisant la méthode ANP. En effet, la méthode ANP est appliquée pour calculer le degré d'importance relatif à chaque paramètre en fonction du type de flux. Par conséquent, la matrice de criticité pondérée  $T(t_{ij})$  est donnée par l'équation suivante :

$$T = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & \dots & t_{1m} \\ t_{21} & t_{22} & \dots & \dots & t_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{n1} & t_{n2} & \dots & \dots & t_{nm} \end{pmatrix} \quad (5.7)$$

Où  $t_{ij} = w_j * c_{ij}$  avec  $\sum_{j=1}^m w_j = 1$ . La valeur de  $w_j$  représente le poids associé au paramètre d'évaluation  $P_i$  en utilisant la méthode ANP.

6. Calculer l'indice de criticité : cet indice permet de mesurer le degré d'importance de chaque algorithme du handover  $Alg_i$ . L'indice de criticité  $CI_i$  est calculé par :

$$CI_i = 100 * \left( \sum_{j=1}^m t_{ij} \right) / n \quad \text{avec } i = 1, \dots, n \quad (5.8)$$

Où  $n$  est la valeur maximale de tous les paramètres calculés dans la matrice de criticité.

7. Classer les alternatives : l'ensemble des algorithmes de handover sont ordonnés par ordre décroissant en fonction de l'indice de criticité  $CI_i^*$ .

### 5.5 Validation de l'architecture FADM à travers le modèle d'évaluation évolutif

Afin de mettre en valeur la pertinence de notre extension évolutive du modèle d'évaluation [74], nous l'avons utilisé pour valider notre architecture FADM. La validité de cette dernière repose sur la comparaison et l'évaluation des performances de l'algorithme FADM vis-à-vis des autres algorithmes les plus répandus tels que : E-TOPSIS, TOPSIS, GRA, DIA, SAW et MEW. Pour atteindre cet objectif, il convient dans un premier temps de fixer les paramètres d'évaluation qui doivent être considérés dans la phase de simulation. Dans un deuxième temps, nous simulons les différents algorithmes du handover pour mesurer leurs performances en fonction des paramètres d'évaluation fixés à l'avance. Ensuite, nous introduisons notre modèle d'évaluation évolutif pour exploiter les résultats obtenus par ces algorithmes afin de calculer les indices de criticité de chaque algorithme de la sélection du réseau. Finalement, nous classons en fonction de cet indice de criticité les différents algorithmes du handover afin de déterminer la meilleure solution pour chaque type de flux.

#### 5.5.1 Résultats numériques

##### 5.5.1.1 Scénario de simulation

Pour le scénario de la simulation, nous suivons la même procédure de la simulation que nous avons proposée dans la section 3.3.4.1. Deux paramètres d'évaluation sont mesurés : l'anomalie du classement et le nombre de handoffs. Nous effectuons quatre simulations en fonction de quatre type de flux : arrière-plan, conversationnel, interactif et streaming. Dans chaque simulation, les sept algorithmes du handover : FADM, E-TOPSIS, TOPSIS, GRA, DIA, SAW et MEW sont testés afin de mesurer leurs performances en fonction de deux paramètres d'évaluation que nous avons déjà mentionnés. Au fait, la finalité de chaque simulation consiste à déterminer la meilleure solution pour chaque type de service. Nous présentons dans ce qui suit les résultats de ces quatre simulations.

##### 5.5.1.2 La simulation 1

Dans cette simulation, nous analysons le flux en arrière-plan afin de calculer les indices de criticité liés à chaque algorithme de la sélection du réseau. Nous présentons tout d'abord les résultats fournis par les sept algorithmes de décision que nous avons mentionnés. Le tableau 5.2 montre les deux performances obtenues pour chaque algorithme. D'après ce tableau, nous remarquons que notre algorithme FADM fournit la meilleure performance en fonction de l'anomalie du classement et le nombre de handoffs. Par contre, si nous excluons notre approche FADM, nous remarquons qu'il n'y a aucun algorithme adéquat par rapport à un autre vu qu'il existe des méthodes qui minimisent l'anomalie du classement mieux que les autres et il y a d'autres qui permettent de réduire le nombre du handoffs mieux que les autres. Par exemple, la méthode GRA permet de fournir une meilleure performance concernant

### 5.5.5 Validation de l'architecture FADM à travers le modèle d'évaluation évolutif

l'anomalie du classement par rapport à la méthode DIA. Tandis que cette dernière méthode permet de réduire le nombre de handoffs mieux que la méthode GRA. Par conséquent, nous ne pouvons pas affirmer que la méthode GRA est meilleure que la méthode DIA. D'où, la nécessité d'introduire notre modèle d'évaluation évolutif.

TAB. 5.2 – Mesures de performances de paramètres d'évaluation pour le flux arrière-plan

Algorithmes	Anomalie du classement(%)	Nombre du handoffs(%)
FADM	6.5	28
E-TOPSIS	18	35
TOPSIS	50	70
GRA	20	80
DIA	30	60
SAW	50	70
MEW	60	60

En outre, le tableau 5.3 illustre la matrice de criticité calculée en appliquant l'étape quatre du modèle d'évaluation évolutif . Les éléments de cette matrice sont obtenus en analysant les résultats fournis dans le tableau 5. 2 en fonction de l'échelle d'évaluation définie dans le tableau 5.1.

TAB. 5.3 – Matrice de criticité correspondant au flux arrière-plan

Algorithmes	Anomalie du classement(%)	Nombre du handoffs(%)
FADM	9	7
E-TOPSIS	7	5
TOPSIS	1	1
GRA	7	1
DIA	5	3
SAW	1	1
MEW	1	3

Ensuite, nous calculons le poids de chaque paramètre d'évaluation en utilisant la méthode ANP. Les valeurs du poids accordées aux paramètres l'anomalie du classement et le nombre de handoffs en fonction du flux arrière-plan, sont illustrées dans le tableau 5.4.

TAB. 5.4 – Poids accordé à chaque paramètre d'évaluation pour le flux arrière-plan

Paramètres d'évaluation	Anomalie du classement	Nombre du handoffs	Poids
Anomalie du classement	1	1	0.5
Nombre du handoffs	1	1	0.5

Enfin, le tableau 5.5 montre les indices de criticité relatifs à chaque algorithme de la sélection du réseau. D'après ce tableau, nous observons que la plus grande valeur de cet indice est donnée par l'algorithme FADM. Avec cet algorithme, l'indice obtenu à travers le modèle évolutif est de 89.83%. Par conséquent, nous le considérons comme la meilleure solution destinée à la sélection du réseau. De plus, la méthode E-TOPSIS est qualifiée comme la deuxième solution favorable dans le contexte du handover vu que son indice de criticité est plus grand que

## CHAPITRE 5. VALIDATION ET OPTIMISATION DE L'ARCHITECTURE FADM

les valeurs fournies par les méthodes TOPSIS, GRA, DIA, SAW et MEW. Nous remarquons également que les deux méthodes GRA et MEW ont la même valeur de l'indice de criticité de 44.44%. Cette valeur permet de classer les deux méthodes en troisième position en terme de performance par rapport aux FADM et E-TOPSIS. Finalement, nous observons que la plus petite valeur de l'indice de criticité est fournie par les deux méthodes TOPSIS et SAW. Par conséquent, ces deux méthodes ne sont pas efficacement applicables pour le processus du handover.

TAB. 5.5 – Indices de criticité de différents algorithmes pour le flux arrière-plan

Algorithmes	Anomalie du classement(%)	Nombre du handoffs(%)	Indice de criticité(%)
FADM	9	7	88.89
E-TOPSIS	7	5	66.67
TOPSIS	1	1	11.11
GRA	7	1	44.44
DIA	5	3	44.44
SAW	1	1	11.11
MEW	1	3	22.22

### 5.5.1.3 La simulation 2

Cette simulation consiste à analyser le flux conversationnel afin de déterminer l'algorithme de la sélection du réseau adéquat que nous devons utiliser. Pour ce faire, nous calculons les indices de criticités de chaque algorithme du handover. Le tableau 5.6 illustre les résultats fournis par les différents algorithmes en fonction de deux paramètres d'évaluation à savoir : l'anomalie du classement et le nombre de handoffs. Nous remarquons que les algorithmes FADM, E-TOPSIS, TOPSIS, GRA, DIA, SAW et MEW permettent de réduire l'anomalie du classement avec les valeurs 5.5%, 16.50%, 36%, 18%, 27%, 42% et 60%. D'après ces valeurs, nous constatons que la meilleure performance en fonction de ce paramètre est assurée par notre algorithme FADM. Nous observons également que l'algorithme FADM réduit le nombre de handoffs d'une valeur de 25% qui est inférieure à toutes les autres fournies par les autres algorithmes. Ce qui implique que l'algorithme FADM permet d'assurer une meilleure performance en fonction de nombre du handoffs par rapport aux autres algorithmes.

TAB. 5.6 – Mesures de performances de paramètres d'évaluation pour le conversationnel

Algorithmes	Anomalie du classement(%)	Nombre du handoffs(%)
FADM	5.5	25
E-TOPSIS	16.50	42
TOPSIS	36	80
GRA	18	60
DIA	27	60
SAW	42	80
MEW	60	65

### 5.5.5 Validation de l'architecture FADM à travers le modèle d'évaluation évolutif

En outre, en appliquant le modèle d'évaluation évolutif pour construire la matrice de criticité, les éléments de cette matrice sont illustrés dans le tableau 5.7. Le calcul d'éléments de cette matrice se fait à travers l'analyse des résultats fournis dans le tableau 5.6 en fonction de l'échelle d'évaluation définie dans le tableau 5.1.

TAB. 5.7 – Matrice de criticité correspondant au flux conversationnel

Algorithmes	Anomalie du classement(%)	Nombre du handoffs(%)
FADM	9	7
E-TOPSIS	7	5
TOPSIS	5	1
GRA	7	3
DIA	5	3
SAW	3	1
MEW	1	1

Ensuite, nous calculons le poids de chaque paramètre d'évaluation en utilisant la méthode ANP. Les valeurs du poids accordées aux paramètres : l'anomalie de classement et le nombre de handoffs en fonction du service conversationnel sont illustrées dans le tableau 5.8.

TAB. 5.8 – Poids accordé à chaque paramètre d'évaluation pour le flux conversationnel

Paramètres d'évaluation	Anomalie du classement	Nombre du handoffs	Poids
Anomalie du classement	1	1/3	0.250
Nombre du handoffs	3	1	0.750

Enfin, le tableau 5.9 montre une comparaison de différents algorithmes de la sélection du réseau en fonction de l'indice de criticité. Nous remarquons que l'algorithme FADM possède le score le plus élevé en fonction de l'indice de criticité (83.33%). Cela signifie que cet algorithme est le plus approprié pour la sélection du réseau. Nous constatons également que la plus petite valeur de l'indice de criticité est fournie par l'algorithme MEW qui se limite à une valeur de 11.11%. Cette dernière valeur implique que l'algorithme MEW n'est pas favorable pour être implémenté comme une solution pour la sélection du réseau pour le flux conversationnel.

Pour le classement des autres algorithmes en termes de performance, nous trouvons l'algorithme E-TOPSIS dans la deuxième place avec une valeur de 61.11%. L'algorithme GRA en troisième place avec une valeur de 44.44%. L'algorithme DIA en quatrième place avec une valeur de 38.89%. Puis, l'algorithme TOPSIS dans la cinquième place avec une valeur de 22.22%. Finalement, l'algorithme SAW se positionne en sixième place avec une valeur de 16.67%.

TAB. 5.9 – Indices de criticité de différents algorithmes pour le flux conversationnel

Algorithmes	Anomalie du classement(%)	Nombre du handoffs(%)	Indice de criticité(%)
FADM	9	7	83.33
E-TOPSIS	7	5	61.11
TOPSIS	5	1	22.22
GRA	7	3	44.44
DIA	5	3	38.89
SAW	3	1	16.67
MEW	1	1	11.11

### 5.5.1.4 La simulation 3

Dans cette troisième simulation, nous calculons également les indices de criticité de différents algorithmes afin de déterminer la meilleure solution que nous devons utiliser dans le contexte de la sélection du réseau pour le flux interactif. Le tableau 5.10 montre les résultats fournis par les différents algorithmes en fonction de l'anomalie de classement et le nombre de handoffs. Nous observons que les algorithmes FADM, E-TOPSIS, TOPSIS, GRA, DIA, SAW et MEW permettent de réduire l'anomalie de classement respectivement avec les valeurs de 12%, 25%, 42%, 25%, 33%, 55% et 42%. Nous remarquons également que ces algorithmes permettent de réduire le nombre de handoffs respectivement avec les valeurs de 36%, 40%, 70%, 60%, 80%, 75% et 70%.

TAB. 5.10 – Mesures de performances de paramètres d'évaluation pour le flux interactif

Algorithmes	Anomalie du classement(%)	Nombre du handoffs(%)
FADM	12	36
E-TOPSIS	25	40
TOPSIS	42	70
GRA	25	60
DIA	33	80
SAW	55	75
MEW	42	70

En outre, le tableau 5.11 présente la matrice de criticité calculée en appliquant l'étape quatre du modèle d'évaluation évolutif. Les éléments de cette matrice sont obtenus en analysant les résultats fournis dans le tableau 5. 10 en fonction de l'échelle d'évaluation définie dans le tableau 5.1.

Avant de calculer l'indice de criticité relatif à chaque algorithme du handover dans le but d'en choisir le meilleur, nous introduisons la méthode ANP pour pondérer les deux paramètres anomalie de classement et le nombre de handoffs. Le tableau 5.12 contient les valeurs du poids accordées à chaque paramètre d'évaluation en fonction du flux conversationnel.

## 5.5.5 Validation de l'architecture FADM à travers le modèle d'évaluation évolutif

TAB. 5.11 – Matrice de criticité correspondant au flux interactif

Algorithmes	Anomalie du classement(%)	Nombre du handoffs(%)
FADM	7	5
E-TOPSIS	5	5
TOPSIS	3	1
GRA	5	3
DIA	5	1
SAW	1	1
MEW	3	1

TAB. 5.12 – Poids accordé à chaque paramètre d'évaluation pour le flux interactif

Paramètres d'évaluation	Anomalie du classement	Nombre du handoffs	Poids
Anomalie du classement	1	1/5	0.167
Nombre du handoffs	5	1	0.833

Finalement, le tableau 5.13 illustre les indices de criticité obtenus pour les différents algorithmes en utilisant notre modèle d'évaluation évolutif. D'après ce tableau, nous constatons que la plus grande valeur de l'indice de criticité est donnée par l'algorithme FADM (76.18%). Cela implique que notre algorithme est le plus approprié pour être implémenté dans le contexte de la sélection du réseau. Ensuite, la méthode E-TOPSIS vient dans la deuxième position avec une valeur de 71.42%. Pour le classement de deux algorithmes GRA et DIA en termes de performance, nous trouvons GRA en troisième place avec une valeur de 47.51% et l'algorithme DIA en quatrième place avec un score de 23.80%. Nous remarquons également que les deux méthodes TOPSIS et SAW ont la même valeur d'indice de criticité de 19.04%. Cette valeur permet de classer les deux méthodes en troisième position en terme de performance. Finalement, nous observons que la plus petite valeur de l'indice de criticité est donnée par l'algorithme MEW. Par conséquent, cet algorithme n'est pas favorable pour le processus du handover.

TAB. 5.13 – Indices de criticité de différents algorithmes pour le flux interactif

Algorithmes	Anomalie du classement(%)	Nombre du handoffs(%)	Indice de criticité(%)
FADM	7	5	76.18
E-TOPSIS	5	5	71.42
TOPSIS	3	1	19.04
GRA	5	3	47.61
DIA	5	1	23.80
SAW	1	1	14.28
MEW	3	1	19.04

### 5.5.1.5 La simulation 4

Dans la dernière simulation, nous analysons le flux streaming afin de déterminer l'algorithme de la sélection du réseau adéquat qui sera désigné pour le handover en fonction de son indice de criticité. Le tableau 5.14 montre les résultats fournis par les différents algorithmes en fonction de deux paramètres d'évaluation à savoir : l'anomalie du classement et le nombre de handoffs. Nous remarquons que l'algorithme FADM réduit l'anomalie de classement d'une valeur de 14.5% et il minimise le nombre de handoffs d'une valeur de 28%. Tandis que l'anomalie de classement fournie par l'algorithme E-TOPSIS se limite à 20% et le nombre de handoffs se limite à 45%. Nous observons également que les deux algorithmes TOPSIS et SAW permettent de réduire l'anomalie de classement avec la même de valeur de 60% et les deux algorithmes GRA et DIA permettent aussi de fournir la même valeur de 30% pour le même paramètre. Le dernier algorithme MEW réduit le risque d'avoir l'anomalie de classement d'une valeur de 65%. D'autre côté, nous constatons que les trois algorithmes TOPSIS, DIA et SAW minimisent le nombre de handover avec la même valeur de 60%. L'algorithme MEW permet de réduire ce problème d'une valeur de 50%. Or, la mauvaise performance concernant ce paramètre est donnée par l'algorithme GRA qui réduit ce problème d'une valeur de 70%. D'après ces valeurs, nous constatons que la meilleure performance en fonction de ces deux paramètres est assurée par notre algorithme FADM. Nous validons ce résultat par la suite en utilisant notre modèle d'évaluation.

TAB. 5.14 – Mesures de performances de paramètres d'évaluation pour le flux streaming

Algorithmes	Anomalie du classement(%)	Nombre du handoffs(%)
FADM	14.50	28
E-TOPSIS	20	45
TOPSIS	60	60
GRA	30	70
DIA	30	60
SAW	60	60
MEW	65	50

En outre, en appliquant le modèle d'évaluation évolutif pour construire la matrice de criticité, les éléments de cette matrice sont illustrés dans le tableau 5.14. Le calcul d'éléments de cette matrice se fait, d'abord, à travers l'analyse des résultats fournis dans le tableau 5. 6 en fonction de l'échelle d'évaluation définie dans le tableau 5.15.

TAB. 5.15 – Matrice de criticité correspondant au flux streaming

Algorithmes	Anomalie du classement(%)	Nombre du handoffs(%)
FADM	9	7
E-TOPSIS	7	5
TOPSIS	1	1
GRA	7	1
DIA	5	3
SAW	1	1
MEW	1	3

### 5.5.5 Validation de l'architecture FADM à travers le modèle d'évaluation évolutif

Ensuite, nous calculons le poids de chaque paramètre d'évaluation en utilisant la méthode ANP. Les valeurs du poids accordées aux paramètres : l'anomalie de classement et le nombre de handoffs en fonction du service streaming sont illustrées dans le tableau 5.16.

TAB. 5.16 – Poids accordé à chaque paramètre d'évaluation pour le flux streaming

Paramètres d'évaluation	Anomalie du classement	Nombre du handoffs	Poids
Anomalie du classement	1	1/7	0.125
Nombre du handoffs	7	1	0.875

Enfin, le tableau 5.17 montre les indices de criticité relatifs à chaque algorithme de la sélection du réseau. D'après ce tableau, nous remarquons que la plus grande valeur de cet indice est donnée par l'algorithme FADM. Avec cet algorithme l'indice obtenu à travers le modèle évolutif est de 80.56%. Par conséquent, nous le considérons comme la meilleure solution destinée à la sélection du réseau. De plus, l'indice de criticité associé à la méthode E-TOPSIS est égale à 58.33%. Ce qui implique que cet algorithme est qualifié comme la deuxième solution favorable dans le contexte du handover. La méthode se présente comme troisième solution favorable pour la sélection du réseau, vu que son indice de criticité est de 36.11%, qui est plus grand que les autres valeurs fournies par les méthodes GRA, TOPSIS, SAW et MEW. Nous remarquons également que l'indice de criticité de la méthode MEW se limite à 30.56%. Cette valeur classe cette méthode en quatrième position en terme de performance. Nous trouvons la méthode GRA en cinquième place avec une valeur de 19.44%. Finalement, nous observons que la plus petite valeur de l'indice de criticité est fournie par les deux méthodes TOPSIS et SAW. Par conséquent, ces deux méthodes ne sont pas appropriées pour le processus du handover.

TAB. 5.17 – Indices de criticité de différents algorithmes pour le flux streaming

Algorithmes	Anomalie du classement(%)	Nombre du handoffs(%)	Indice de criticité(%)
FADM	9	7	80.56
E-TOPSIS	7	5	58.33
TOPSIS	1	1	11.11
GRA	7	1	19.44
DIA	5	3	36.11
SAW	1	1	11.11
MEW	1	3	30.56

### 5.5.2 Discussion

Nous avons fixé dans cette première contribution l'objectif de valider l'architecture FADM à travers un modèle d'évaluation existant. Or, le premier obstacle que nous avons rencontré a été le choix du modèle d'évaluation adéquat permettant d'atteindre notre objectif. En effet, nous avons analysé les différents modèles d'évaluation existants. Puis, nous avons décidé de choisir le modèle proposé dans [92] vu ses avantages par rapport aux autres modèles d'évaluation proposés dans la littérature. Cependant, le seul inconvénient de ce modèle réside dans le fait qu'il ne prend pas en considération le degré d'importance relatif aux différents paramètres d'évaluation. Pour cela, nous avons investi dans l'amélioration de ce modèle afin

de pallier à cette limitation.

Ainsi, nous avons proposé un nouveau modèle d'évaluation évolutif reposant sur l'approche MADM et l'analyse de criticité. Notre modèle proposé est une extension de l'ancien modèle [92]. Son point fort est le fait qu'il introduit la méthode de pondération ANP pour calculer le poids de chaque paramètre d'évaluation. Finalement, nous avons appliqué ce modèle évolutif pour évaluer et comparer les performances de notre algorithme FADM par rapport aux autres méthodes de la sélection du réseau : E-TOPSIS, TOPSIS, GRA, DIA, SAW et MEW.

Les simulations effectuées nous amènent à conclure que pour tous les types de flux, l'algorithme FADM possède l'indice de criticité le plus élevé. Cela signifie que notre algorithme assure de meilleures performances en termes d'anomalie du classement et le nombre de handoffs par rapport aux autres algorithmes du handover. Par conséquent, nous affirmons que notre architecture, proposée dans cette thèse, est valide et prometteuse dans le contexte de la sélection du réseau.

TAB. 5.18 – Comparaison des performances des algorithmes MADM

Algorithmes	Arrière-plan	Conversationnel	Interactif	Streaming
FADM	1	1	1	1
E-TOPSIS	2	2	2	2
TOPSIS	5	5	5	6
GRA	3	3	3	5
DIA	3	4	4	3
SAW	5	6	6	6
MEW	4	7	5	4

## 5.6 Optimisation de l'architecture FADM à travers le modèle d'évaluation évolutif

Afin d'optimiser davantage notre architecture FADM, nous contournons dans cette contribution le problème de la sélection des critères. En effet nous utilisons notre modèle d'évaluation évolutif pour évaluer la performance de notre algorithme FADM en fonction des critères de la sélection. Cette évaluation a pour objectif d'éliminer le problème de la redondance des critères. Ce travail a été justifié par le fait que toutes les stratégies de handover proposées dans la littérature ne mettent pas un terme à ce problème.

L'idée de base de cette contribution [78] [77] consiste à utiliser notre modèle amélioré pour l'évaluation du handover afin de pallier au problème de la redondance de critères. Notre démarche proposée pour éliminer la redondance est illustrée dans la figure 5.2.

### 5.6.1 Résultats numériques

#### 5.6.1.1 Scénario de simulation

Dans cette section, nous montrons l'efficacité de notre modèle d'évaluation évolutif dans le cadre d'optimiser davantage l'architecture FADM au niveau de la sélection des critères [78] [77]. Pour ce faire, nous analysons les trois variantes de l'algorithme FADM en

### 5.5.6 Optimisation de l'architecture FADM à travers le modèle d'évaluation évolutif

fonction de critères. Il s'agit de la technique 1, la technique 2 et la technique 3. Ces trois techniques reposent sur la même architecture FADM, ayant unique différence l'ensemble des critères qui interviennent dans chaque technique. Les critères de la sélection utilisés en fonction de chaque technique sont :

- Technique 1 : cette technique prend en considération six critères : la bande passante disponible, la sécurité, le coût de service, la gigue, le délai et le taux de perte.
- Technique 2 : cet algorithme utilise cinq critères : la bande passante disponible, la sécurité, le coût de service, le délai et le taux de perte.
- Technique 3 : cette solution tient en compte uniquement les quatre critères : la bande passante disponible, la sécurité, le coût de service et le délai.

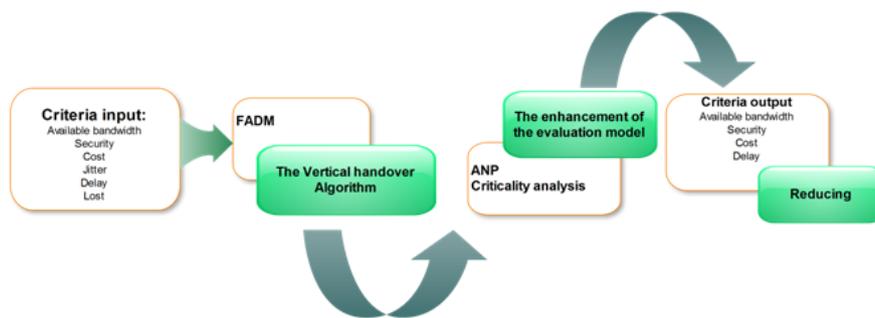


FIG. 5.2 – Démarche proposée pour éliminer la redondance de critères

Nous utilisons le même scénario de simulation proposé dans la section 3.3.4.1 en vue de mesurer les performances de ces trois techniques. En fait, pour calculer l'indice de criticité de chaque technique, nous procédons à la même démarche adoptée dans la première contribution de ce chapitre. En premier temps, nous simulons les trois techniques en fonction de quatre types de flux : arrière-plan, conversationnel, interactif et streaming. Pour chaque simulation, nous évaluons les performances de ces trois techniques dans 100 points de décision. Les performances de chaque technique sont mesurées en fonction de quatre paramètres d'évaluation. Il s'agit de l'anomalie de classement, du nombre de handoffs, du nombre de handover échoués et de la complexité.

Dans un deuxième temps, nous appliquons notre modèle d'évaluation pour obtenir l'indice de criticité relatif à chaque technique. Lors du calcul de cet indice, nous construisons la matrice de criticité qui repose sur l'analyse de différents paramètres d'évaluation en fonction de l'échelle d'évaluation. D'une part, pour les trois paramètres, l'anomalie de classement, le nombre de handoffs et le nombre de handover échoués, nous utilisons le tableau 5.1 pour construire les éléments de cette matrice. D'autre part, pour le paramètre de la complexité, nous introduisons le nouveau tableau 5.19 qui contient l'échelle d'évaluation de ce paramètre.

TAB. 5.19 – l'échelle d'évaluation de la matrice de criticité [92]

Paramètre	Low=3	Medium=5	High=7	Very high=9
Complexité	$O(2^n)$ ou $O(n!)$	$O(n^2)$ ou $O(n^a)$	$O(n)$ ou $O(\text{Log}(n))$	$O(\text{Log}(n))$

Finalement, en fonction de la valeur de l'indice de criticité obtenue par chaque technique, nous identifions les critères de la sélection les plus appropriés pour être utilisés dans le contexte du

handover vertical. Ceci entraîne l'élimination de la redondance de critères en fonction de chaque type de flux. Nous présentons dans ce qui suit les résultats de ces quatre simulations.

### 5.6.1.2 La simulation 1

Nous analysons dans cette simulation le flux arrière-plan afin d'optimiser davantage notre architecture FADM en termes du nombre de critères qui interviennent dans la sélection. Pour ce faire, nous évaluons les performances des trois algorithmes : technique 1, technique 2 et technique 3 en fonction de quatre paramètres d'évaluation : l'anomalie du classement, le nombre de handoffs, le nombre de handoffs échoués et la complexité. Le tableau 5.20 montre les résultats fournis par les différents algorithmes en fonction de différents paramètres d'évaluation. D'après ce tableau, nous remarquons que la technique 1, la technique 2 et la technique 3 permettent de réduire respectivement l'anomalie du classement avec les valeurs de 6.5%, 10% et 8%. Nous observons également que le nombre de handoffs provoqué par les trois algorithmes se limite respectivement aux valeurs de 28%, 20% et 18%. La dernière remarque est que tous les algorithmes permettent d'assurer les mêmes valeurs concernant le nombre de handoffs échoués et la complexité.

TAB. 5.20 – Mesures de performances relatives aux variantes de FADM pour l'arrière-plan

Algorithmes	Anomalie du classement	Nombre du handoffs	Handoffs échoués	Complexité
Technique 1	6.5%	28%	0%	$O(n^2)$
Technique 2	10%	20%	0%	$O(n^2)$
Technique 3	8%	18%	0%	$O(n^2)$

En outre, le tableau 5.21 présente la matrice de criticité calculée à travers notre modèle d'évaluation évolutif. Les éléments de cette matrice sont obtenus en analysant les résultats fournis dans le tableau 5. 20 en fonction de deux échelles d'évaluation qui sont définies respectivement dans les deux tableaux 5.1 et 5.19.

TAB. 5.21 – Matrice de criticité relative aux variantes de FADM pour le flux arrière-plan

Algorithmes	Anomalie du classement	Nombre du handoffs	Handoffs échoués	Complexité
Technique 1	3	1	9	5
Technique 2	1	3	9	5
Technique 3	3	3	9	5

Ensuite, avant de calculer l'indice de criticité relatif à chaque algorithme du handover, nous calculons le poids de chaque paramètre d'évaluation en utilisant la méthode ANP. Les valeurs du poids accordées aux paramètres : l'anomalie du classement, le nombre de handoffs, le nombre de handoffs échoués et la complexité en fonction du service arrière-plan sont présentées dans le tableau 5.22.

Enfin, le tableau 5.23 montre une comparaison de trois algorithmes de la sélection du réseau en fonction de l'indice de criticité. Nous remarquons que les indices de criticité associés respectivement aux trois algorithmes de handoffs technique 1, technique 2 et technique 3 sont 50.14%, 51.81% et 57.17%. D'après ces trois scores, nous déduisons que la meilleure performance est donnée par la technique 3 vu qu'elle possède la plus grande valeur correspondant à

### 5.5.6 Optimisation de l'architecture FADM à travers le modèle d'évaluation évolutif

l'indice de criticité. Pour le classement de la technique 2 et la technique 1, nous trouvons la première dans la deuxième place en termes de performance, tandis que la technique 1 occupe la dernière place. Dans cette simulation, nous déduisons que notre algorithme FADM qui prend seulement en considération trois critères de la sélection représente la meilleure solution pour le handover vertical. De plus, cette solution permet de remédier au problème de la redondance de critères pour le flux arrière-plan.

TAB. 5.22 – Degré d'importance de chaque paramètre d'évaluation pour l'arrière-plan

Paramètres	Anomalie classement	Nombre handoffs	Handoffs échoués	Complexité	Poids
Anomalie du classement	1	1	1	1	0.241
Nombre du handoffs	1	1	1	4	0.316
Handoffs échoués	1	1	1	4	0.316
Complexité	1	1/4	1/4	1	0.126

TAB. 5.23 – Indice de criticité relatif à chaque variante FADM pour le flux arrière-plan

Algorithmes	Anomalie classement	Nombre handoffs	Handoffs échoués	Complexité	Indice criticité
Technique 1	3	1	9	5	50.14
Technique 2	1	3	9	5	51.81
Technique 3	3	3	9	5	57.17

### 5.6.1.3 La simulation 2

Cette deuxième simulation est similaire à la première. Nous calculons les indices de criticité de différents algorithmes afin de pallier au problème de la redondance de critères pour le flux conversationnel. Le tableau 5.24 présente les résultats fournis par les trois techniques que nous avons déjà simulées dans la première simulation en fonction de l'anomalie du classement, le nombre de handoffs, le nombre de handoffs échoués et la complexité. Nous observons, d'une part, que les trois algorithmes technique 1, technique 2 et technique 3 minimisent le phénomène de l'anomalie du classement respectivement avec les valeurs de 5.5%, 6% et 8.5%. D'autre part, nous remarquons qu'elles permettent de réduire le nombre de handoffs respectivement avec les valeurs de 25%, 20% et 15%. Enfin, nous constatons que les trois techniques sont caractérisées par la même valeur de la complexité  $O(n^2)$  ainsi que le nombre de handoffs échoués est nul.

TAB. 5.24 – Mesures de performances de chaque variante FADM pour conversationnel

Algorithmes	Anomalie du classement	Nombre du handoffs	Handoffs échoués	Complexité
Technique 1	5.5%	25%	0%	$O(n^2)$
Technique 2	6%	20%	0%	$O(n^2)$
Technique 3	8.5%	15%	0%	$O(n^2)$

## CHAPITRE 5. VALIDATION ET OPTIMISATION DE L'ARCHITECTURE FADM

En appliquant le modèle d'évaluation évolutif pour construire la matrice de criticité. Les éléments de cette matrice sont illustrés dans le tableau 5.23. Le calcul d'éléments de cette matrice se fait à travers l'analyse des résultats fournis dans le tableau 5. 22 en fonction de deux échelles d'évaluation qui sont définies respectivement dans les deux tableaux 5.1 et 5.19.

TAB. 5.25 – Matrice de criticité relative aux variantes de FADM pour conversationnel

Algorithmes	Anomalie du classement	Nombre du handoffs	Handoffs échoués	Complexité
Technique 1	3	1	9	5
Technique 2	3	3	9	5
Technique 3	1	5	9	5

Ensuite, nous calculons le poids de chaque paramètre d'évaluation en appliquant la méthode ANP. Les valeurs du poids accordées aux différents paramètres d'évaluation en fonction du service conversationnel sont illustrées dans le tableau 5.26.

TAB. 5.26 – Degré d'importance de chaque paramètre d'évaluation pour le conversationnel

Paramètres	Anomalie classement	Nombre handoffs	Handoffs échoués	Complexité	Poids
Anomalie du classement	1	1/3	1/3	1/2	0.109
Nombre du handoffs	3	1	1	2	0.351
Handoffs échoués	3	1	1	2	0.351
Complexité	2	1/2	1/2	1	0.189

Enfin, le tableau 5.27 montre une comparaison de différents algorithmes de la sélection du réseau en fonction de l'indice de criticité. Nous remarquons que l'algorithme technique 3 possède le score le plus élevé en fonction de l'indice de criticité (66.31%). Cela signifie que cet algorithme est le plus approprié pour la sélection du réseau. Puis, nous constatons que la plus petite valeur de l'indice de criticité est fournie par la technique 1 qui se limite à une valeur de 53.13%. Cette dernière valeur implique que la technique 1 est moins performante que la technique 3 vu qu'elle présente le problème de la redondance de critères. Finalement, la technique 2 est moins performante que la technique 3 et plus performante que la technique 1.

TAB. 5.27 – Indice de criticité relatif à chaque variante FADM pour le flux conversationnel

Algorithmes	Anomalie classement	Nombre handoffs	Handoffs échoués	Complexité	Indice criticité
Technique 1	3	1	9	5	53.13
Technique 2	3	3	9	5	60.93
Technique 3	1	5	9	5	66.31

### 5.6.1.4 La simulation 3

Cette simulation consiste à analyser le flux interactif afin de déterminer l'algorithme de la sélection du réseau adéquat que nous devons appliquer. Pour ce faire, nous calculons les

### 5.5.6 Optimisation de l'architecture FADM à travers le modèle d'évaluation évolutif

indices de criticité relatifs aux trois techniques. Le tableau 5.28 contient les résultats fournis par trois techniques en simulant quatre paramètres d'évaluation. D'un côté, nous remarquons en ce qui concerne l'anomalie du classement, que la technique 1, la technique 2 et la technique 3 permettent de réduire ce paramètre, respectivement avec les valeurs 12%, 10% et 15%. D'un autre côté, nous constatons qu'en fonction de nombre de handoff, la technique 1, la technique 2 et la technique 3 réduisent le risque d'avoir ce problème respectivement avec les valeurs de 36%, 30% et 25%. Comme la dernière remarque, tous algorithmes fournissent les mêmes valeurs concernant le nombre de handoffs échoués et la complexité.

TAB. 5.28 – Mesures de performances relatives aux variantes de FADM pour l'interactif

Algorithmes	Anomalie du classement	Nombre du handoffs	Handoffs échoués	Complexité
Technique 1	12%	36%	0%	$O(n^2)$
Technique 2	10%	30%	0%	$O(n^2)$
Technique 3	15%	25%	0%	$O(n^2)$

En outre, le tableau 5.29 illustre la matrice de criticité calculée en appliquant le modèle d'évaluation évolutif. Les éléments de cette matrice sont obtenus en analysant les résultats fournis dans le tableau 5. 28 en fonction de deux échelles d'évaluation définies respectivement dans les deux tableaux 5.1 et 5.19.

TAB. 5.29 – Matrice de criticité relatives aux variantes de FADM pour le flux interactif

Algorithmes	Anomalie du classement	Nombre du handoffs	Handoffs échoués	Complexité
Technique1	3	1	9	5
Technique2	3	1	9	5
Technique3	1	3	9	5

Ensuite, avant de calculer l'indice de criticité relatif à chaque technique du handover dans le but d'en choisir la meilleure, nous pondérons les différents paramètres d'évaluation en utilisant la méthode ANP. Les valeurs du poids accordées aux paramètres : l'anomalie du classement, le nombre de handoffs, le nombre de handoffs échoués et la complexité en fonction du flux interactif sont illustrées dans le tableau 5.30.

TAB. 5.30 – Degré d'importance de chaque paramètre d'évaluation pour l'interactif

Paramètres	Anomalie classement	Nombre handoffs	Handoffs échoués	Complexité	Poids
Anomalie du classement	1	1/5	1/5	1/2	0.089
Nombre du handoffs	5	1	1/2	1/2	0.232
Handoffs échoués	5	2	1	1	0.368
Complexité	2	2	1	1	0.311

Enfin, le tableau 5.31 montre la comparaison de trois algorithmes de la sélection du réseau en fonction de l'indice de criticité. Nous remarquons que la technique 3 assure une valeur de l'indice de criticité égale à 62.60%. Nous constatons également que la technique 1 et la technique 2 ont la même valeur d'indice de criticité qui se limite à 59.62%. D'après ces

## CHAPITRE 5. VALIDATION ET OPTIMISATION DE L'ARCHITECTURE FADM

---

résultats, nous tirons la conclusion que la technique 3 est la plus appropriée pour la sélection du réseau vu que son indice de criticité est meilleur que les indices relatifs aux autres techniques. Cela signifie que la technique 3 permet de surmonter le problème de la redondance de critères pour le flux interactif.

TAB. 5.31 – Indice de criticité relatif à chaque variante FADM en fonction de flux interactif

Algorithmes	Anomalie classement	Nombre handoffs	Handoffs échoués	Complexité	Indice criticité
Technique 1	3	1	9	5	59.62
Technique 2	3	1	9	5	59.62
Technique 3	1	3	9	5	62.80

### 5.6.1.5 La simulation 4

Cette dernière simulation consiste à calculer les indices de criticité de différents algorithmes afin de pallier au problème de la redondance de critères pour le flux streaming. Le tableau 5.32 présente les résultats fournis par les trois techniques en simulant quatre paramètres d'évaluation à savoir : l'anomalie du classement, le nombre de handoffs, le nombre de handoffs échoués et la complexité. Nous observons, d'une part que les trois algorithmes technique 1, technique 2 et technique 3 réduisent le phénomène de l'anomalie du classement respectivement avec les valeurs de 14.5%, 16% et 12%. D'autre part, nous remarquons qu'elles permettent de réduire le nombre de handoffs respectivement avec les valeurs de 28%, 25% et 20%. Enfin, nous constatons que les trois techniques sont caractérisées par la même valeur de la complexité  $O(n^2)$  et un nombre de handoffs échoué nul.

TAB. 5.32 – Mesures de performances relatives aux variantes de FADM pour le streaming

Algorithmes	Anomalie du classement	Nombre du handoffs	Handoffs échoués	Complexité
Technique 1	14.5%	28%	0%	$O(n^2)$
Technique 2	16%	25%	0%	$O(n^2)$
Technique 3	12%	20%	0%	$O(n^2)$

Nous analysons les résultats fournis dans le tableau 5.32 en fonction de deux échelles d'évaluation définies respectivement dans les deux tableaux 5.1 et 5.19 afin de construire la matrice de criticité. Les éléments de cette matrice sont illustrés dans le tableau 5.33.

TAB. 5.33 – Matrice de criticité relative aux variantes de FADM pour le flux streaming

Algorithmes	Anomalie du classement	Nombre du handoffs	Handoffs échoués	Complexité
Technique 1	1	1	9	5
Technique 2	1	1	9	5
Technique 3	3	3	9	5

Ensuite, nous calculons le poids de chaque paramètre d'évaluation en appliquant la méthode ANP. Les valeurs du poids accordées aux différents paramètres d'évaluation en fonction du

### 5.5.6 Optimisation de l'architecture FADM à travers le modèle d'évaluation évolutif

service streaming sont illustrées dans le tableau 5.34.

Enfin, le tableau 5.35 montre la comparaison des trois techniques de la sélection du réseau en fonction de l'indice de criticité. Nous remarquons que l'algorithmique technique 3 possède le score le plus élevé en fonction de l'indice de criticité (67.52%). Cela signifie que cet algorithme est le plus approprié pour la sélection du réseau. Nous constatons également que la technique 1 et la technique 2 permettent de fournir la valeur d'indice de criticité de 62.30%. Cette dernière valeur implique que ces deux techniques sont moins performantes que la technique 3.

TAB. 5.34 – Degré d'importance de chaque paramètre d'évaluation pour le streaming

Paramètres	Anomalie classement	Nombre handoffs	Handoffs échoués	Complexité	Poids
Anomalie du classement	1	1/6	1/8	1/4	0.057
Nombre du handoffs	6	1	1/4	1/3	0.178
Handoffs échoués	8	2	1	1	0.388
Complexité	4	3	1	1	0.376

TAB. 5.35 – Indice de criticité relatif à chaque variante FADM pour le flux streaming

Algorithmes	Anomalie classement	Nombre handoffs	Handoffs échoués	Complexité	Indice criticité
Technique 1	1	1	9	5	62.30
Technique 2	1	1	9	5	62.30
Technique 3	3	3	9	5	67.52

## 5.6.2 Discussion

Dans cette contribution, nous avons proposé d'optimiser davantage notre architecture FADM. Cette optimisation a été focalisée sur l'élimination du problème de la redondance de critères. Ce phénomène se manifeste à travers l'utilisation des critères corrélés dans la phase de la sélection du réseau. Pour pallier à ce phénomène qui influence la performance de notre algorithme FADM, nous avons introduit le modèle d'évaluation évolutif. En effet, notre idée de base consiste à évaluer les différentes variantes de l'algorithme FADM. Ces variantes sont construites en fonction du nombre de critères utilisés par l'algorithme FADM. Dans ce travail, nous avons comparé les trois variantes : la technique 1, la technique 2 et la technique 3. La seule différence entre ces trois techniques est le nombre de critères utilisés. En fait, la technique 1 prend en considération six critères : la bande passante disponible, la sécurité, le coût de service, la gigue, le délai et le taux de perte. La technique 2 utilise cinq critères : la bande passante disponible, la sécurité, le coût de service, le délai et le taux de perte. La technique 3 tient en compte uniquement quatre critères : la bande passante disponible, la sécurité, le coût de service, et le délai.

Afin de mettre en évidence l'amélioration que nous avons apportée au niveau de notre architecture, nous avons évalué et comparé les trois techniques en utilisant notre modèle d'évaluation. Pour ce faire, nous avons effectué quatre simulations en fonction de quatre types de flux : arrière-plan, conversationnel, interactif et streaming. Dans chaque simulation, nous avons introduit le modèle d'évaluation pour calculer l'indice de criticité relatif à chaque technique.

De plus, pour assurer la validité des résultats fournis par le modèle d'évaluation, nous avons introduit quatre paramètres d'évaluation : l'anomalie du classement, le nombre de handoffs, le nombre de handoffs échoués et la complexité.

D'après les résultats fournis par les quatre simulations, nous remarquons que pour les quatre types de services, la technique 3 permet d'assurer la meilleure valeur de l'indice de criticité. Par conséquent, nous déduisons que cette technique est la plus appropriée à être implémentée dans notre architecture proposée. Une autre remarque pertinente est le fait que la technique 2 est plus performante que la technique 1 vu que son indice de criticité est supérieur à celui obtenu par la technique 1.

En guise de conclusion, nous affirmons que notre modèle d'évaluation évolutif est capable de surmonter le problème de la redondance des critères au niveau de l'architecture FADM. Ce qui implique, la réduction du nombre de critères qui doivent être utilisés dans le contexte de la sélection du réseau. Cette réduction, nous a permis de minimiser le temps de latence et de rendre notre architecture plus performante. Comme perspective de cette contribution, nous allons essayer d'analyser d'autres critères qui sont proposés dans la littérature afin de spécifier les critères adéquats qu'il faut tenir en compte dans la phase de la sélection du réseau en fonction de chaque type de service.

### 5.7 Conclusion

L'évaluation de la performance est l'un des problèmes les plus délicats auxquels sont souvent confrontés les solutions proposées dans le contexte de la sélection du réseau. En effet, pour juger qu'une telle solution du handover est meilleure par rapport à une autre, il est indispensable de comparer les performances de ces solutions. Pour effectuer cette comparaison, il faut tenir compte de deux points, le premier est le choix du modèle d'évaluation, le second point est l'identification des paramètres d'évaluation.

Vu l'utilité de l'évaluation comme une étape très importante dans la phase de la conception et le développement d'un algorithme du handover, plusieurs modèles d'évaluation sont proposés dans la littérature. Cependant, tous ces modèles ne prennent pas en considération le degré d'importance relatif à chaque paramètre d'évaluation. C'est pourquoi, nous avons élaboré un modèle d'évaluation évolutif pour les algorithmes de la sélection du réseau. Ce modèle repose sur l'approche MADM et l'analyse de criticité. L'avantage de ce modèle évolutif est le fait qu'il permet de surmonter les limites concernant les modèles classiques d'évaluation.

Ensuite, nous avons exploité ce modèle d'évaluation évolutif afin de valider notre architecture. En effet, nous avons utilisé notre modèle pour comparer la performance de l'algorithme FADM par rapport aux autres algorithmes du handover tels que E-TOPSIS, TOPSIS, GRA, DIA, SAW et MEW. Les résultats de quatre simulations que nous avons effectuées ont montré que notre algorithme FADM permet d'assurer l'indice de criticité le plus élevé pour tous les types de flux. C'est à partir de ceci que notre architecture tient sa validité.

Finalement, après avoir validé l'architecture FADM, nous avons proposé de l'améliorer davantage. L'optimisation que nous avons apportée à notre architecture a eu pour but éliminer le problème de la redondance de critères. A travers les quatre simulations que nous avons effectuées en fonction du type de flux, nous avons pu utiliser uniquement quatre critères en éliminant la gigue et le taux de perte. Cette élimination de critères corrélés permet par conséquent de pallier au problème de la redondance de critères.

---

# CONCLUSION GÉNÉRALE

## Conclusions

La forte demande des services multimédias à haut débit par le biais de l'internet mobile a motivé l'évolution des nouvelles technologies d'accès comme WIFI, UMTS, WIMAX et LTE. De plus, au fil du temps de nouvelles technologies d'accès ne cessent d'évoluer et les services offerts aux utilisateurs continuent de se développer. Par conséquent, les utilisateurs ont l'opportunité de profiter de nombreuses applications telles que la vidéo-conférence, les jeux en ligne, La TV mobile, etc.

En parallèle, l'évolution extraordinaire des terminaux mobiles vers une architecture multi-modes et leur miniaturisation avaient une influence considérable sur l'augmentation du nombre des utilisateurs de l'Internet mobile. Cette forte augmentation a un impact direct sur l'économie des pays.

Dans ce contexte, le protocole IEEE 802.21 est standardisé par l'IETF en 2009 dans le but d'interconnecter les différentes technologies réseaux. En outre, la norme IEEE 802.21 est une solution générique qui permet à l'utilisateur de rester connecté à l'Internet lorsqu'il se déplace d'un réseau à un autre. Ce transfert de la communication est appelé handover vertical. Nous signalons dans ce cadre que l'avantage majeur du protocole IEEE 802.21 est que le handover vertical se fait sans coupure et avec une continuité de service "Seamless handover" en respectant le principe ABC (Always Best Connected).

Les différentes technologies développées représentent un environnement réseau hétérogène dans lequel l'utilisateur peut se connecter à l'Internet n'importe où et n'importe quand par le biais de son terminal multi-interfaces. Cependant, vu l'abondance des technologies réseaux utilisables pour se connecter à l'internet à travers le protocole IEEE 802.21, la sélection de la meilleure technologie réseau qu'il faut utiliser reste une problématique qui n'est pas encore résolue par le protocole. En effet, l'objectif de chaque utilisateur dans cet environnement réseau hétérogène est de se doter d'une connectivité optimale. Cette connectivité doit garantir les exigences de l'utilisateur en termes de qualité de service et de coût.

Comme la sélection de la meilleure interface réseau est un problème très complexe qui est classé dans la catégorie NP-difficile, plusieurs approches et stratégies ont été proposées dans la littérature. L'ensemble des solutions proposées contiennent des algorithmes qui reposent sur la logique floue, les algorithmes génétiques, la théorie de jeux, la fonction de coût, fonction d'utilité et les méthodes d'aide à la décision multi-attributs (MADM).

L'étude de l'ensemble des solutions proposées dans la littérature dans le contexte de la sélection

du réseau nous a permis de nous focaliser sur l'approche MADM. Ce choix n'est pas arbitraire, mais il est influencé par les facteurs suivants :

- La sélection du réseau est un problème de nature multi-critères.
- L'approche MADM est très simple à implémenter par rapport aux autres algorithmes.
- L'approche MADM permet de choisir la meilleure interface rapidement.

Bien que l'approche MADM représente une solution incontournable pour résoudre et améliorer le problème de la sélection du réseau, la revue de littérature que nous avons menée sur l'ensemble des algorithmes basés sur cette approche nous a montré leurs insuffisances pour résoudre notre problématique. En effet, cette approche possède plusieurs limites qui sont regroupées en deux catégories. D'un côté, la première catégorie contient des limites relatives aux algorithmes MADM destinés à la pondération de critères :

- L'hétérogénéité de critères n'est pas traitée par ces algorithmes
- L'utilisation de l'expérience d'un seul expert pour pondérer les attributs.
- L'association du même vecteur du poids aux différents critères indépendamment de l'interface réseau.
- L'absence d'un modèle d'évaluation pour identifier la méthode de pondération adéquate en fonction de type de flux.

D'un autre côté, la deuxième catégorie représente des inconvénients relatifs aux algorithmes de classement :

- L'anomalie du classement provoquée par l'utilisation de la distance euclidienne.
- Le nombre élevé de handoff.
- Le taux élevé de handoffs échoués.
- Le manque de précision dans l'identification du classement.

Après avoir pu identifier les limites de l'approche MADM, dans un premier temps, nous nous sommes d'abord intéressés à la conception et au développement d'une nouvelle architecture pour la sélection du réseau. En effet, nous avons proposé une nouvelle architecture pour répondre à la problématique de la sélection du réseau. Cette architecture que nous avons appelée FADM a été définie en deux modules basés sur l'approche MADM. Le premier module est un système de pondération efficace capable de surmonter le problème de l'hétérogénéité de critères. Ce module contient un système de pondération intra-classes et un autre inter-classes. Après avoir regroupé les critères homogènes dans la même classe, le système de pondération intra-classes est appliqué pour calculer le poids de chaque critère de cette classe en utilisant la méthode AHP floue. Ensuite, le système inter-classes est utilisé pour fournir le degré d'importance relatif à chaque classe en utilisant aussi la méthode AHP floue. Enfin, la multiplication de deux vecteurs de poids générés par les deux systèmes permet de fournir le degré d'importance relatif à chaque critère.

Le second module de l'architecture FADM représente une nouvelle méthode MADM que nous avons développée afin de classer les alternatives réseaux sans avoir le problème de l'anomalie de classement. Nous nous sommes inspirés pour cette nouvelle méthode MADM de l'algorithme TOPSIS en éliminant l'anomalie du classement.

Nous avons montré, à travers des simulations, l'avantage de notre architecture FADM dans l'amélioration des performances en termes d'anomalie de classement et le nombre de handoffs par rapport aux trois algorithmes TOPSIS, GRA et DIA.

Les résultats très satisfaisants que nous avons obtenus à travers cette architecture, nous ont encouragés à optimiser davantage la solution FADM. Pour cela, nous avons proposé d'introduire un nouveau critère dans la phase de la sélection du réseau. Ce critère que nous avons appelé historique de la performance a son rôle de mémoriser la performance de l'interface réseau afin de l'utiliser à la prochaine décision. Les résultats des simulations que nous avons

effectués ont montré l'utilité de ce paramètre dans l'objectif de réduire l'anomalie de classement et d'éviter des handovers successifs.

Ensuite, en deuxième temps, nous nous sommes penchés sur l'optimisation du module de la pondération. En effet, le fait d'avoir d'autres méthodes de pondération telles que ANP et floue ANP nous a incités à chercher la méthode de pondération appropriée qui doit être intégrée dans le module de pondération. Or, dans la littérature, aucune étude n'a été faite pour spécifier la méthode de pondération à appliquer en fonction du type de flux.

Pour cela, nous avons développé une nouvelle approche de la validation qui se base sur l'approche MADM collective. L'avantage majeur de cette approche proposée réside dans sa capacité de déterminer la méthode de pondération adéquate qu'il faut combiner avec n'importe quel algorithme de classement en fonction du type de flux. Dans le cadre de notre architecture FADM, les résultats des différentes simulations effectuées à travers l'approche de la validation ont montré que la méthode ANP est la plus adéquate pour le module de pondération que la méthode AHP floue.

Comme les autres méthodes classiques de pondération, notre module amélioré accorde le poids pour chaque critère sans prendre en considération l'interface réseau. Cependant, comme nous l'avons déjà évoqué dans cette thèse, le degré d'importance associé à un critère doit changer en fonction de la technologie réseau. Afin de surmonter ce problème, nous avons proposé d'intégrer une nouvelle unité de la différenciation de poids au niveau du module de pondération. L'idée de base de cette unité est de calculer le poids de chaque critère en fonction de l'interface réseau. Les simulations que nous avons menées dans cette contribution ont effectivement montré les améliorations apportées à l'architecture FADM en termes de l'anomalie de classement, le nombre de handoffs et le nombre de handovers échoués. D'ailleurs, nous confirmons qu'il est important de tenir en compte l'unité de la différenciation dans n'importe quelle solution du handover vertical afin d'éviter des handovers échoués.

Enfin, nous avons visé de réaliser deux objectifs à la fin de cette thèse. Comme premier objectif, il s'agissait de valider l'architecture FADM. Cette validation consiste à évaluer et comparer les performances de notre architecture FADM par rapport aux algorithmes les plus répandus tels que E-TOPSIS, TOPSIS, GRA, DIA, SAW et MEW. Le deuxième objectif cible est d'optimiser le bloc de critères de l'architecture FADM. Cette optimisation se fait dans deux parties, la première partie concerne l'identification des critères qu'il faut tenir en compte dans la phase de la sélection, tandis que la deuxième partie traite le problème de la redondance de critères. L'utilisation d'un modèle d'évaluation est indispensable afin d'atteindre le premier objectif. Vu la diversité des modèles d'évaluation développés et proposés dans la littérature, nous sommes confrontés au problème de choisir le modèle adéquat pour répondre à notre problématique. Pour cela, nous avons analysé les différents modèles d'évaluation existants. Puis, nous avons décidé de choisir un modèle efficace qui repose sur l'approche MADM et l'analyse de criticité vu ses avantages par rapport aux autres modèles existants. Le seul inconvénient de ce modèle choisi réside dans le fait qu'il ne prend pas en considération le degré d'importance relatif aux différents paramètres d'évaluation. Pour pallier à cet inconvénient, nous avons investi dans le développement d'un nouveau modèle d'évaluation évolutif qui repose sur le modèle choisi.

Ensuite, nous avons introduit ce modèle d'évaluation évolutif afin de valider notre architecture. En effet, les résultats des simulations que nous avons effectuées ont montré que notre algorithme FADM permet d'assurer l'indice de criticité le plus élevé pour tous les types de flux. Ce qui assure la validité de notre architecture dans le contexte de la sélection du réseau.

Finalement, ce modèle d'évaluation évolutif nous a permis aussi de réaliser notre deuxième objectif qui concerne l'élimination du problème de la redondance de critères. Ce problème se manifeste à travers l'utilisation des critères corrélés dans la phase de la sélection du réseau.

De plus, comme nous l'avons déjà mentionné, ce phénomène influence le temps de latence du handover. Vu qu'il n'y a plus de travaux de recherches qui s'intéressent au problème de la redondance de critères, nous nous sommes focalisés sur l'élimination de ce phénomène. Notre idée de base consiste à évaluer, à l'aide du modèle évolutif, les différentes variantes de l'algorithme FADM. Ces variantes sont construites en fonction du nombre de critères utilisés par l'algorithme FADM. A travers les résultats fournis par les quatre simulations que nous avons fait, nous avons pu utiliser uniquement que les quatre critères suivants : la bande passante disponible, la sécurité, le coût de service et le délai. L'élimination de critères corrélés tels que la gigue et le taux de perte permet par conséquent de pallier au problème de la redondance de critères.

A l'issue de toutes les contributions que nous avons proposées, tout au long de cette thèse, nous avons abouti à une architecture de la sélection du réseau efficace et efficiente qui répond aux spécifications de la norme IEEE 802.21. De plus, cette architecture est caractérisée par plusieurs avantages :

- La décision est contrôlée par le terminal mobile qui choisit d'une manière dynamique et en temps réel la meilleure interface réseau qu'il faut utiliser.
- La faisabilité et la simplicité d'être intégrée dans la norme IEEE 802.21.
- L'architecture FADM est basée sur une approche mathématique qui est la théorie de l'aide à la décision multi-attributs (MADM).
- La flexibilité de cette architecture en terme de l'intégration des nouveaux modules (par exemple unité de la différenciation).
- L'architecture FADM assure de très bonne performances, le taux de l'anomalie de classement et le nombre du handoffs sont significativement diminués.

## Perspectives

A l'issue des contributions menées tout au long de cette thèse, plusieurs pistes méritent d'être explorées. Nous les résumons dans les points suivants :

- Implémenter notre architecture FADM en utilisant la plate-forme ODTONE [2]. Cette dernière est une solution open source qui est développée dans le but d'implémenter le protocole IEEE 802.21. En fait, nous envisageons de réaliser une expérimentation réelle pour illustrer le handover entre trois technologies réseaux Ethernet (802.3), WiFi (802.11) et 3G en utilisant l'architecture FADM.
- L'architecture FADM proposée dans cette thèse permet de satisfaire uniquement les exigences de l'utilisateur en termes de la QoS. La tendance aujourd'hui est de garantir aussi la qualité de l'expérience d'utilisateur (QoE). Cette dernière consiste à mesurer la performance d'utilisation d'un service directement auprès de l'utilisateur. Dans ce contexte, notre objectif est d'améliorer l'architecture afin de supporter la QoE.
- Le module de pondération de l'architecture FADM repose essentiellement sur la méthode ANP. Cette dernière est une méthode de pondération subjective. De plus, elle s'appuie sur la théorie de prise de décision individuelle. Il serait intéressant d'introduire la pondération objective avec le groupe MADM afin d'améliorer davantage le module de pondération.
- Nous envisageons également de proposer une nouvelle méthode de normalisation [85] qui utilise la fonction d'utilité. L'avantage de cette fonction est le fait de normaliser chaque critère en tenant en compte des exigences de chaque type de flux par rapport à ce critère. Par conséquent, à l'aide de cette nouvelle méthode de normalisation,

- nous éliminerons définitivement l'anomalie du classement et l'effet de ping pong.
- Dans cette thèse nous nous sommes focalisés sur l'optimisation et l'évaluation de la sélection du réseau qui représente la deuxième phase du processus du handover vertical. Dans ce contexte, nos recherches pourront continuer sur les deux autres étapes telles que l'initiation et l'exécution. Il sera avantageux de les étudier afin de proposer une architecture efficace et évolutive pour le handover vertical.
  - Dans le contexte où le terminal est équipé de plusieurs interfaces, il peut utiliser simultanément les différentes interfaces à chaque moment et non pas seulement une pour servir plusieurs applications, ce qu'on appelle le "multihoming". Notre architecture FADM ne prend pas en considération le "multihoming". Pour cela, il est très intéressant d'étudier cet aspect afin de l'intégrer dans notre architecture.
  - Nous envisageons finalement de tenir en compte la consommation d'énergie comme un paramètre crucial lors de la décision du handover.

---

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] 3GPP. *QoS Concepts and Architecture*. tS 22.107 (v 6.3.0), 2005.
- [2] AGUIAR, R., GOMES, D., GUIMARÃES, C., AND GÉNIO, M. *ODTONE* : <http://at-nog.av.it.pt/odtone/index.html>, 2009-2013 Universidade Aveiro.
- [3] AHLGREN, P., JARNEVING, B., AND ROUSSEAU, R. Requirements for a cocitation similarity measure, with special reference to pearson's correlation coefficient. *Journal of the American Society for Information Science and Technology* 54, 6 (2003), 550–560.
- [4] AHMED, T., KYAMAKYA, K., AND LUDWIG., M. A context-aware vertical handover decision algorithm for multimode mobile terminals and its performance. *Proceedings of IEEE/ACM Euro American Conference on Telematics and Information System* (Feb 2006), 19–28.
- [5] AKYILDIZ, I., XIE, J., AND MOHANTY, S. A survey of mobility management in next generation all ip based wireless systems. *IEEE Wireless Communications* 11(4) (August 2004), 16–28.
- [6] ALKHAWLANI, M., AND AYESH, A. Access network selection based on fuzzy logic and genetic algorithms. *Advances in Artificial Intelligence* 8(1) (January 2008), 1–12.
- [7] ANGUÉ, K. *La régression floue principes et applications en sciences de gestion*. Université de Nice Sophia Antipolis, Laboratoire GREDEG/RODIGE, 2007.
- [8] AUSTIN, M., AND STUBER, G. Direction biased handoff algorithms for urban micro-cells. in *IEEE 44th Conference on Vehicular Technology Conference 1* (1994), 101–105.
- [9] AUSTIN, M., AND STUBER, G. Velocity adaptive handoff algorithms for microcellular systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 43 (1994), 549–561.
- [10] BARI, F., AND LEUNG., V. Multi attribute network selection by iterative topsis for heterogeneous wireless access. *4th IEEE Consumer Communications and Networking Conference* (January 2007), 808–812.
- [11] BARI, F., AND LEUNG, V. Network selection with imprecise information in heterogeneous all-ip wireless systems. *Proceedings of the 3rd international conference on Wireless internet (WICON'07)* (2007), 1–10.
- [12] BARI, F., AND LEUNG., V. Use of non-monotonic utility in multi-attribute network selection. In *Proceedings of the of the Wireless Telecommunications Symposium* (April 2007), 1–8.

- [13] BARI, F., AND LEUNG., V. Application of electre to network selection in a heterogeneous wireless network environment. *In the Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference* (2008), 3810–3815.
- [14] BARJA, M. J. *Scalable and Efficient Vertical Handover Decision Algorithms in Vehicular Network Contexts*. Master Thesis, Networking Research Group Departament of Computer Engineering Universitat Politècnica Valencia, Spain., November, 2012.
- [15] BARTH, U. *3GPP Long-Term Evolution / System Architecture Evolution Overview*, Alcatel, Technical white paper, Septembre 2006.
- [16] BERTIN, P. *Gestion de la mobilité dans une architecture d'accès multi-technologies*. Master Thesis, Télécom Bretagne, France, octobre 2010.
- [17] BIANCHI, G., AND AL. Handover across heterogeneous wireless systems : a platform independent control logic design. *In Proc. IEEE WPMC* (2003), 1–5.
- [18] BONNIN, J. *La diversité d'accès au service de terminaux et de routeurs multi-connectés*. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, l'Université de Rennes I, France, 2011.
- [19] CHAKRABORTY, S., AND YEH, C. A simulation based comparative study of normalization procedures in multiattribute decision making. *In Proceedings of the 6th WSEAS Ing. Con. on Artificial Intelligence, Knowledge Engineering and Data Bases, Corfu Island* (February 2007), 102–109.
- [20] CHAKRABORTY, S., AND YEH, C. A simulation comparison of normalization procedures for topsis. *In Proceedings of the International Conference on Computers and Industrial Engineering* (July 2009), 1815–1820.
- [21] CHAMODRAKAS, I., AND MARTAKOS., D. A utility-based fuzzy topsis method for energy efficient network selection in heterogeneous wireless networks. *Applied Soft Computing* 11 (2011), 3734–3743.
- [22] CHEN, L., AND AL. A smart decision model for vertical handoff. *In Proc of the 4th International Workshop on Wireless Internet and Reconfigurability (ANWIRE'04)* (2004), 1–5.
- [23] CHEN, L., AND AL. An utility based network selection scheme for future urbanroad wireless networks. *In the 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)* (June 2010), 181–185.
- [24] CHEN, W. On the problem and elimination of rank reversal in the application of topsis method. *Operations Research and Management Science* 14(5) (October 2005), 39–43.
- [25] CHUNG, H., AND YU-HERN., C. Validating multiattribute decision making methods for supporting group decisions. *In Proceedings of the IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems* (2008), 878–883.
- [26] CUI, H.-Y., YAN, Q.-J., CAI, Y.-L., GAO, Y., AND WU, L. Heterogeneous network selection using a novel multi- attribute decision method. *In Proceedings of the Third International Conference on Communications and Networking in China* (Aug 2008), 153–157.
- [27] DE MAESSCHALCK, R., JOUAN-RIMBAUD, D., AND MASSART, D. L. The mahalanobis distance. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 50, 1 (2000), 1–18.
- [28] DE OLIVEIRA FILHO, J. L., AND MADEIRA, E. A mechanism for vertical handover based on saw using ieee 802.21. *In Mobile Networks and Management*. Springer, 2011, pp. 96–108.

- [29] DENG., J. Introduction to grey system theory. *The Journal of Grey System* 1(1) (1989), 1–24.
- [30] DHAR, J., KIRAN, S., AND REDDY., K. Network selection in heterogeneous wireless environment : A ranking algorithm. *In the Proceedings of the 3rd International Conference on Wireless Communication and Sensor Networks* (2007), 41–44.
- [31] DHAR, S., AND AL. Fast vertical handover algorithm for vehicular communication : A holistic approach. *International Journal of Computer Network and Information Security(IJCNIS)* 4, No.3 (April 2012), 8–16.
- [32] DIMITRIS, E., AND AL. Application of fuzzy ahp and electre to network selection. *In the Mobile Lightweight Wireless Systems* 13 (2009), 63–73.
- [33] EKEL, P., QUEIROZ, J., PARREIRAS, R., AND PALHARES, R. Fuzzy set based models and methods of multicriteria group decision making, nonlinear analysis : Theory, methods and applications. *IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics—Part A : Systems and Humans* 71 (409-419 2009).
- [34] ESCOBAR, L., AND AL. Vertical handoff algorithms a new approach for performance evaluation. *In IEEE Globecom Workshop on Ubiquitous Computing and Networks* (December 2010), 1724–1728.
- [35] ESCOBARA, L., AND AL. Performance evaluation of vertical handoff algorithms. *In 6th IEEE International Workshop on Performance and Management of Wireless and Mobile Networks* (Octobre 2010), 851–854.
- [36] FALOWO, O. E., AND ANTHONY CHAN, H. Dynamic rat selection for multiple calls in heterogeneous wireless networks using group decision-making technique. *Computer Networks* 56, 4 (2012), 1390–1401.
- [37] FAN, Z., AND LIU, Y. An approach to solve group-decision-making problems with ordinal interval numbers. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B : Cybernetics* 40(5) (2010), 1413–1423.
- [38] FERNANDES, S., AND KARMOUCH, A. Vertical mobility management architectures in wireless networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials* 14(1) (2012), 45–63.
- [39] FU, J., WU, J., ZHANG, J., PING, L., AND LI, Z. A novel ahp and gra based handover decision mechanism in heterogeneous wireless networks. *In Information Computing and Applications*. Springer, 2010, pp. 213–220.
- [40] GAZIS, V., HOUSSOS, N., ALONISTIOTI, N., AND MERAKOS, L. On the complexity of always best connected in 4g mobile networks,. *In IEEE 58th Vehicular Technology Conference (VTC)* (Octobre 2003), 2312–2316.
- [41] GINTIS, H. *Game theory evolving*. Princeton, NJ : Princeton University Press, 2000.
- [42] GODOR, G., AND DETARI., G. Novel network selection algorithm for various wireless network interfaces. *in 16th IST Mobile and Wireless Communications Summit* (2007 July), 1–5.
- [43] GUNDAVELLI, S., LEUNG, K., DEVARAPALLI, V., AND CHOWDHURY, K. Proxy mobile ipv6. *RFC 5213 (Proposed Standard)*, <http://www.ietf.org/rfc/rfc5213.txt> (Aug 2008).
- [44] GUO, C., GUO, Z., ZHANG, Q., AND ZHU, W. A seamless and proactive end-to-end mobility solution for roaming across heterogeneous wireless networks. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on* 22, 5 (2004), 834–848.

- [45] GUSTAFSSON, E., AND JONSSON, A. Always best connected. *IEEE Wireless Communications Magazine* 10 (Feb 2003), 49–55.
- [46] GYEKYE, N., AND AGBINYA, Y. A vertical handoff decision algorithm for next generation wireless networks. *Third International Conference on Broadband Communications, Information Technology and Biomedical Applications* (Nov 2008), 358–364.
- [47] HASSWA, A., NASSER, N., AND HOSSANEIN, H. Generic vertical handoff decision function for heterogeneous wireless. In *Second IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)* (2005), 239–243.
- [48] HAYKIN, S. *Neural Networks : A Comprehensive Foundation*. Prentice Hall PTR Upper Saddle River, NJ, USA, 1998.
- [49] HORRICH, S., AND GODLEWSKI, P. Neural networks for adaptive vertical handover decision. In *5th IEEE International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks* (2007), 1–7.
- [50] HOU, J., AND O'BRIEN, D. Vertical handover-decision-making algorithm using fuzzy logic for the integrated radio-and-ow system. In *IEEE Transactions on Wireless Communications* 5(1) (Jan 2006), 176–185.
- [51] HUANG, H., WANG, C., AND HWANG, R. Context awareness handoff planning in heterogeneous wireless networks. *Lecture Notes in Computer Science, Springer Verlag Berlin Heidelberg* (2010), 430–444.
- [52] HUSZA, K., AND IMRE., A. Eliminating rank reversal phenomenon in gra-based network selection method. In *Proc. International Communications Conference (ICC'10) in Cape Town, South Africa*. (May 2010), 1–6.
- [53] HWANG, C., AND YOON, K. *Multiple Attribute Decision Making : Methods and Applications*. Springer, Berlin Heidelberg New York, 1981.
- [54] HWANG, C.-L., AND LIN, M.-J. *Group decision making under multiple criteria : methods and applications*, vol. 281. Springer-Verlag Berlin, 1987.
- [55] IEEE802.11. Standard for information technology-telecommunications and information exchange between systems-local and metropolitan area networks-specific requirements - part 11 : Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. (*Revision of IEEE Std 802.11-1999*) (2007), 1–1184.
- [56] IEEE802.15. *Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks- Specific requirements Part 15.1 : Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for wireless personal area networks (WPANs)*, New York, 2002.
- [57] IEEE802.16. Air interface for fixed broadband wireless access systems. *Local and Metropolitan Area Networks, Part 16*, (2004).
- [58] IEEE802.21. *Ieee standard for local and metropolitan area networks, part 21 : Media independent handover services*, January 2009.
- [59] INWHEE, J., WON-TAE, K., AND SEOKJOON, H. A network selection algorithm considering power consumption in hybrid wireless networks. *IEICE transactions on communications* 91, 1 (2008), 314–317.
- [60] ISMAIL, A., AND ROH, B. Adaptive handovers in heterogeneous networks using fuzzy madm. In *IEEE International Conference on Mobile IT Convergence (ICMIC)* (September 2011), 99–104.

- [61] JAVIER, S., AND MAMADOU, T. *UMTS : services, architecture et WCDMA*, Lavoisier, 2001.
- [62] JOHNSON, D., PERKINS, C., AND ARKKO., J. Mobility support in ipv6. *RFC 3775 (Proposed Standard)*, [http ://www.ietf.org/rfc/rfc3775.txt](http://www.ietf.org/rfc/rfc3775.txt) (Jun 2004).
- [63] KAHRAMAN, C., CEBECI, U., AND ULUKAN, Z. Multi-criteria supplier selection using fuzzy ahp. *Logistic information Management* 16(6) (2003), 382–394.
- [64] KALEEM, F., MEHBODNIYA†, Z., YEN, K., AND ADACHI, F. A dynamic weighting of attributes in heterogeneous wireless networks using fuzzy linguistic variables. *In Proceedings of the First IEEE International Conference on Communications in China : Wireless Networking and Applications (WNA)* (Aug 2012), 698–703.
- [65] KALEEM†, F., AND AL. A fahp weighting scheme for system attributes in heterogeneous wireless networks. *In the 9th IEEE Vehicular Technology Society Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS'12), Japan* (Aug 2012), 1–6.
- [66] KANG, J.-M., STRASSNER, J., SEO, S.-S., AND HONG, J. W.-K. Autonomic personalized handover decisions for mobile services in heterogeneous wireless networks. *Computer Networks* 55, 7 (2011), 1520–1532.
- [67] KASSAR, M., KERVELLA, B., AND PUJOLLE, G. An overview of vertical handover decision strategies in heterogeneous wireless networks. *Computer Communications* 31, 10 (2008), 2607–2620.
- [68] KEMPF, J., AND KOODLI., R. Distributing a symmetric fast mobile ipv6 (fmipv6) handover key using secure neighbor discovery (send). *RFC 5269 (Proposed Standard)*, [http ://www.ietf.org/rfc/rfc5269.txt](http://www.ietf.org/rfc/rfc5269.txt) (Jun 2008).
- [69] KHER, S., SOMANI, A., AND GUPTA, R. *An intelligent vertical handoff decision algorithm in next generation wireless networks*. Ph.D. Thesis, The Department of Computer Science, University of the Western Cape, May 2010.
- [70] KIM, Y., LEE, K., AND CHIN, Y. Analysis of multi-level threshold handoff algorithm. *In Global Telecommunications Conference Communications (GLOBECOM) : The Key to Global Prosperity 2* (1996), 1141–1145.
- [71] KOBASHIKAWA, C., HATAKEYAMA, Y., DONG, F., AND HIROTA, K. Fuzzy algorithm for group decision making with participants having finite discriminating abilities. *Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans, IEEE Transactions on* 39, 1 (2009), 86–95.
- [72] KUMAR, R., AND SINGH, B. Comparison of vertical handover mechanisms using generic qos trigger for next generation network. *In the International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN)* 2(3) (Septembre 2010), 80–97.
- [73] LAHBY, M., LEGHRIS, C., AND ADIB, A. A hybrid approach for network selection in heterogeneous multi-access environments. *In the Proceedings of the 4th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS), Paris France* (February 2011), 1–5.
- [74] LAHBY, M., LEGHRIS, C., AND ADIB, A. An enhanced evaluation model for vertical handover algorithm in heterogeneous networks. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)* 9(3) (May 2012), 254–259.
- [75] LAHBY, M., LEGHRIS, C., AND ADIB, A. Network selection decision based on handover history in heterogeneous wireless networks. *International Journal of Computer Science and Telecommunication (IJCST)* 3(2) (February 2012), 21–25.

- [76] LAHBY, M., LEGHRIS, C., AND ADIB, A. New multi access selection method using differentiated weight of access interface. *In the Proceedings of the 2nd International Conference on Communications and Information Technology IEEE (ICCIT 2012), University of carthage, Hammamet, Tunisa* (June 2012), 237–242.
- [77] LAHBY, M., LEGHRIS, C., AND ADIB, A. New optimized network selection decision in heterogeneous wireless networks. *International Journal of Computer Applications (IJCA) 54(16)* (Septembre 2012), 1–7.
- [78] LAHBY, M., LEGHRIS, C., AND ADIB, A. Reducing handover metrics for access network selection in heterogeneous wireless networks. *In the Proceedings of the Second International Conference on Innovative Computing Technology (INTECH 2012), Casablanca, Morocco* (September 2012), 75–80.
- [79] LAHBY, M., LEGHRIS, C., AND ADIB, A. A survey and comparison study on weighting algorithms for access network selection. *In the Proceedings of the 9th Annual Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services (WONS) Italy* (January 2012), 35–38.
- [80] LAHBY, M., LEGHRIS, C., AND ADIB, A. Towards an efficient network selection technique based on differentiated weight of access interface. *International Journal of Business Data Communications and Networking (IJBDCN) 4(8)* (October 2012), 32–48.
- [81] LAHBY, M., LEGHRIS, C., AND ADIB, A. An enhanced-topsis based network selection technique for next generation wireless networks. *In the Proceedings of the 20th International Conference on Telecommunications (ICT 2013), Casablanca, Morocco* (May 2013), 1–6.
- [82] LAHBY, M., LEGHRIS, C., AND ADIB, A. Hybrid network selection strategy by using m-ahp/e-topsis for heterogeneous networks. *In the Proceedings of the 8th International Conference on Intelligent Systems : Theories and Applications, (SITA 2013), Rabat Morocco* (May 2013), 1–6.
- [83] LAHBY, M., LEGHRIS, C., AND ADIB, A. An intelligent weighting model based on handover decision in heterogeneous networks. *Submitted to Elsevier Computer Communications* (April 2013).
- [84] LAHBY, M., LEGHRIS, C., AND ADIB, A. Network selection mechanism by using m-ahp and gra for heterogeneous networks. *In the Proceedings of the Sixth Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC), Dubai, United Arab Emirates* (April 2013), 1–5.
- [85] LAHBY, M., LEGHRIS, C., AND ADIB, A. A new normalization algorithm based network selection in heterogeneous wireless networks. *Submitted to Journal of Network and Computer Application Elsevier* (July 2013).
- [86] LAHBY, M., LEGHRIS, C., AND ADIB, A. A new survey of vertical handover decision algorithms. *Submitted to Pervasive and Mobile Computing ELSEVIER*. (January 2013).
- [87] LAHBY, M., LEGHRIS, C., AND ADIB, A. New validation approach based on group madm for network selection. *In the Proceedings of the First International Conference on Networked Systems (NETYS 2013), Springer, Marrakech, Morocco* (May 2013), 306–310.
- [88] LAHBY, M., LEGHRIS, C., AND ADIB, A. A novel ranking algorithm based network selection for heterogeneous wireless access. *Journal of Networks 8(2)* (February 2013), 263–272.

- [89] LAHBY, M., LEGHRIS, C., AND ADIB, A. Novel validation approach for network selection algorithm by applying the group madm. *In the Proceedings of the 10th ACS/IEEE International Conference on computer systems and applications, Ifrane, Morocco* (May 2013), 1–4.
- [90] LAMATA, M. T. Ranking of alternatives with ordered weighted averaging operators. *International journal of intelligent systems* 19, 5 (2004), 473–482.
- [91] LAMPROPOULOS, G., PASSAS, N., MERAKOS, L., AND KALOXYLOS., A. Handover management architectures in integrated wlan cellular networks. *Communications Surveys Tutorials, IEEE* 7(4) (quarter 2005), 30–44.
- [92] LASSOUED, I., BONNIS, J., HAMOUDA, Z., AND BELGHITH., A. A methodology for evaluation vertical handoff decision mechanisms. *In Seventh International Conference on Networking (ICN'2008)* (April 2008), 377–384.
- [93] LEE, J., AND KIM, S. Compromise solution by mcdm methods : A comparative analysis of vikor and topsis. *European journal of operational research* 156(2) (2004), 445–455.
- [94] LIU., Y. *Access network selection in a 4G networking environment*. Master Thesis, University of Waterloo, Department of Electrical Engineering, 2008.
- [95] MAHALANOBIS, P. C. On the generalized distance in statistics. *Proceedings of the National Institute of Sciences (Calcutta)* 2 (1936), 49–55.
- [96] MAHMOODZADEH, S., SHAHRABI, J., PARIAZAR, M., AND ZAERI, M. S. Project selection by using fuzzy ahp and topsis technique. *International Journal of Human and Social Sciences* 24 (October 2007), 397–402.
- [97] MARKAKI, O., CHARILAS, D., AND NIKITOPOULOS., D. Enhancing quality of experience in next generation networks through network selection mechanisms. *In 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'07)* (2007), 1–5.
- [98] MÁRQUEZ-BARJA, J., CALAFATE, C. T., CANO, J.-C., AND MANZONI, P. An overview of vertical handover techniques : Algorithms, protocols and tools. *Computer Communications* 34(11), 8 (2011), 985–997.
- [99] MARTÍNEZ-MORALES, J., PINEDA-RICO, U., AND STEVENS-NAVARRO, E. Performance comparison between madm algorithms for vertical handoff in 4g networks. *In 7th International Conference on Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control (CCE)* (Septembre 2010), 309–314.
- [100] MAYSTRE, L. Y., PICTET, J., SIIMOS, J., AND ROY, B. *Méthodes multicritères ELECTRE : description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale*, vol. 8. PPUR presses polytechniques, 1994.
- [101] MOLA., G. Interactions of vertical handoffs with 802.11b wireless lans : Handoff policy. *Master of Science Thesis Stockholm, Sweden* (2004).
- [102] MONTAVONT, N. *Gestion optimisée d'interfaces multiples et prise en compte des déplacements rapides sur un terminal IPv6 mobile*. Master Thesis, l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, France, September 2004.
- [103] MOTOROLA. *Long Term Evolution (LTE) : A Technical Overview*, Technical White Paper, 2007.
- [104] MURTHY, M., AND PHIRI, F. Performance analysis of downward handoff latency in a wlan gprs interworking system. *Journal of Computer Science* 1 (2005), 24–27.

- [105] MÄKELÄ, J. *Effects of Handoff Algorithms on the Performance of Multimedia Wireless Networks*. Ph.D. Thesis, Faculty of Technology, Department of Electrical and Information Engineering, University of Oulu, 2008.
- [106] NASSER, N., GUIZANI, S., AND AL-MASRI, E. Middleware vertical handoff manager : A neural network-based solution. in *IEEE International Conference on Communications (ICC'07)* (2007), 5671–5676.
- [107] NASSER, N., HASSWA, A., AND HASSANEIN, H. Handoffs in fourth generation heterogeneous networks. *Communications Magazine, IEEE 44* (2006), 96–103.
- [108] NGUYEN, Q., AND AL. Evaluation of vertical handoff decision algorithms based on madm methods for heterogeneous wireless networks. In *Proc. IEEE IFIP Network Operations and Management Symposium (NOMS)* (April 2008), 144–151.
- [109] NGUYEN-VUONG, Q., AGOULMINE, N., AND GHAMRI-DOUDANE, Y. A user-centric and context-aware solution to interface management and access network selection in heterogeneous wireless environments. *52 Computer Networks* (December 2008), 3358–3372.
- [110] OLGA, O. *Network Selection Strategy in Heterogeneous Wireless Networks*. Ph.D. Thesis, School of Computer Science and Informatics College of Engineering, Mathematics and Physical Science University College Dublin, Ireland, 2007.
- [111] PAHLAVAN, K., KRISHNAMURTHY, P., HATAMI, A., YLIANTTILA, M., MAKELA, J., PICHNA, R., AND VALLSTRON, J. Handoff in hybrid mobile data networks. *IEEE Personal Communication 7(2)* (2000), 34–47.
- [112] PERVAIZ, H. A multi-criteria decision making (mcdm) network selection model providing enhanced qos differentiation to customers. *Multimedia Computing and Information Technology (MCIT)* (March 2010), 49–52.
- [113] PUJOLLE., G. *Les réseaux*. 5eme édition, EYROLLES 61, bd Saint-Germain 75240 Paris Cedex 05, Sptembre, 2007.
- [114] RADHIKA, K. An ahp based network selection algorithm for heterogeneous wireless-networks. *International Journal of Computational Intelligence and Information Security 21(8)* (August 2011), 87–95.
- [115] RAMIREZ, V., AND RAMOS, M. A vertical handoff decision algorithm which considers the uncertainty during the decision making process. In *Proceedings of the International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN'09)* (2009), 1–6.
- [116] ROSENBERG, J., SCHULZRINNE, H., CAMARILLO, G., JOHNSTON, A., PETERSON, J., R. SPARKS, M. H., AND SCHOOLER, E. Sip : Session initiation protocol., *RFC 3261*, <http://www.ietf.org/rfc/rfc3261.txt> (June 2002).
- [117] SAATY, T. *The Analytic hierarchy Process : Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill, USA, 1980.
- [118] SAATY, T. *Decision making with dependence and feedback : The analytic network process*. Pittsburgh : RWS Publications., 1996.
- [119] SAATY, T. Fundamentals of the analytic network process. In *the Proceedings of the 5th International Symposium on the Analytic Hierarchy Process, Kobe, Japan* (1999), 1–14.

- [120] SASIREKHA, V., ILANGKUMARAN, M., AND CHANDRASEKAR, C. Heterogeneous wireless network vertical handoff decision using a hybrid multicriteria decision making technique. *International Journal of Computational Science and Engineering, Inderscience publishers* (2013), 1–10.
- [121] SAVITHA, K., AND CHANDRASEKAR, C. An overview of vertical handoff decision based on madm for heterogeneous wireless network. *Journal of Computer Applications* 3(3) (Sept 2010), 12–15.
- [122] SGORA, A., GIZELIS, C. A., AND VERGADOS, D. D. Network selection in a wimax-wifi environment. *Pervasive and Mobile Computing* 7, 5 (2011), 584–594.
- [123] SGORA, A., VERGADOS, D., AND CHATZIMISIOS, P. An access network selection algorithm for heterogeneous wireless environments. *In the IEEE symposium on Computers and Communications (ISCC)* (2010), 890–892.
- [124] SHAIKH, F. *Intelligent Proactive Handover and QoS Management using TBVH in Heterogeneous Networks*. Ph.D. Thesis, School of Engineering and Information Sciences Hendon. NW4 4BT United Kingdom, January 2010.
- [125] SHARMA, M., AND KHOLA, R. Fuzzy logic based handover decision system. *In International Journal of Ad hoc, Sensor and Ubiquitous Computing (IJASUC)* 3(4) (August 2012), 22–29.
- [126] SHENG-MEI, L., SU, P., AND MING-HAI, X. An improved topsis vertical handoff algorithm for heterogeneous wireless networks. *In the Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Communication Technology (ICCT)* (November 2010), 750–754.
- [127] SHENG-MEI, L., SU, P., ZHENG-KUN, M., QING-MIN, M., AND MING-HAI, X. A simple additive weighting vertical handoff algorithm based on sinr and ahp for heterogeneous wireless networks. *In Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2010 International Conference on* (2010), vol. 1, IEEE, pp. 347–350.
- [128] SHENGMEI, L., AND AL. An improved multiplicative exponent weighting vertical handoff algorithm for wlan-wcdma heterogeneous wireless networks. *Engineering Sciences* 10(1) (2012), 86–90.
- [129] SHI, Z., AND ZHU, Q. Network selection based on multiple attribute decision making and group decision making for heterogeneous wireless networks. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications* 19, 5 (2012), 92–114.
- [130] SHIN, C., CHO, J., KIM, J. G., AND LEE, B. An ahp-based resource management scheme for crm in heterogeneous wireless networks. *annals of telecommunications-Annales des télécommunications* 67, 11-12 (2012), 511–522.
- [131] SIDDIQUI, F., AND ZEADALLY, S. Mobility management across hybrid wireless networks : Trends and challenges. *Computer Communications* 29 (May 2006), 1363–1385.
- [132] SINGHROVA, A., AND PRAKASH, N. A review of vertical handoff decision algorithm in heterogeneous networks. *In 4th ACM International conference on mobile technology, applications, and systems* (Sept 2007), 68–71.
- [133] SOLIMAN, H., BELLIER, L., ELMALKI, K., AND CASTELLUCCIA, C. Hierarchical mobile ipv6 (hmipv6) mobility management. *RFC 5380*, <http://www.ietf.org/rfc/rfc5380.txt> (October 2008.).
- [134] SONG, Q., AND JAMALIPOUR, A. Quality of service provisioning in wireless lan/umts integrated systems using analytic hierarchy process and grey relational analysis. *In Global Telecommunications Conference Workshops, 2004. GlobeCom Workshops 2004. IEEE* (2004), IEEE, pp. 220–224.

- [135] SONG, Q., AND JAMALIPOUR, A. A network selection mechanism for next generation networks. In *in IEEE International Conference on Communications (ICC'2005)* (2005), vol. 2, IEEE, pp. 1418–1422.
- [136] STEVENS-NAVARRO, E., AND AL. A vertical handoff decision algorithm for heterogeneous wireless networks. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'07)* (Decembre 2007), 3199–3204.
- [137] STEVENS-NAVARRO, E., GALLARDO-MEDINA, R., PINEDA-RICO, U., AND ACOSTA-ELIAS, J. Application of madm method vikor for vertical handoff in heterogeneous wireless networks. *IEICE transactions on communications* 95, 2 (2012), 599–602.
- [138] STEVENS-NAVARRO, E., MARTINEZ-MORALES, J., AND PINEDA-RICO, U. Evaluation of vertical handoff decision algorithms based on madm methods for heterogeneous wireless networks. In *Journal of Applied Research and Technology* 10(4) (August 2012), 534– 548.
- [139] STEVENS-NAVARRO, E., AND V.WONG. Comparison between vertical handoff decision algorithms for heterogeneous wireless networks. In *63rd IEEE Vehicular Technology Conference* (May 2006), 947–951.
- [140] STEWART, R. Stream control transmission protocol,. *RFC 4960* <http://www.ietf.org/rfc/rfc4960.txt> (September 2007).
- [141] STEWART, R., XIE, Q., TUEXEN, M., MARUYAMA, S., AND KOZUKA, M. Stream control transmission protocol (sctp) dynamic address reconfiguration. *RFC 5061*, <http://www.ietf.org/rfc/rfc5061.txt> (September 2007).
- [142] SUN, J., AND SAUVOLA, J. Mobility and mobility management : a conceptual framework. *10th IEEE International Conference on Networks (ICON)* (August 2002), 205–210.
- [143] TALEBIFARD, P., AND LEUNG, V. C. A dynamic context-aware access network selection for handover in heterogeneous network environments. In *Computer Communications Workshops* (2011), IEEE, pp. 385–390.
- [144] TAWIL, R., DEMERJIAN, J., AND PUJOLLE, G. A trusted handoff decision scheme for the next generation wireless networks. *International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS)* 8(6) (June 2008), 174–182.
- [145] TAWIL, R., PUJOLLE, G., AND SALAZAR., O. A vertical handoff decision scheme in heterogeneous wireless systems. in *Vehicular Technology Conference VTC'2008* (2008), 2626–2630.
- [146] TAWIL, R., SALAZAR, O., AND PUJOLLE, G. Vertical handoff decision scheme using madm for wireless networks. In *Wireless Communications and Networking Conference, WCNC'08* (2008), 2789–2792.
- [147] TAWIL, R., SALAZAR, O., PUJOLLE, G., AND DEMERJIAN., J. A decision scheme for vertical handoff in overlay wireless networks. In *Proc. 4th International Conference on Innovations in Information Technology, IIT'07* (2007), 436–440.
- [148] TRAN, P. *Modèles de décision pour la sélection d'interface et l'association flux-interface pour les terminaux mobiles multi-interfaces*. Master Thesis, Télécom ParisTech, Spécialité : Informatique et Réseaux, France, September 2010.
- [149] TRAN, P., AND BOUKHATEM, N. Comparison of madm decision algorithms for interface selection in heterogeneous wireless networks. In *16th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)* (2008), 119–124.

- [150] TRAN, P., AND BOUKHATEM., N. The distance to the ideal alternative (dia) algorithm for interface selection in heterogeneous wireless networks. *Proceedings of The 6th ACM international symposium on Mobility management and wireless access (MobiWac'08)* (Oct 2008), 61–68.
- [151] TRESTIAN, R., ORMOND, O., AND MUNTEAN, G. Game theory based network selection : Solutions and challenges. *IEEE Communication Survey and Tutorials* (2012), 1–20.
- [152] TRIANTAPHYLLOU, E. *Multi-Criteria Decision Making Methods : A Comparative Study*. Netherland : Kluwer Academic Publication, 2000.
- [153] TRIPATHI, N. *Generic Adaptive Handoff Algorithms Using Fuzzy Logic and Neural Networks*. Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, août 1997.
- [154] TRIPATHI, N., REED, J., AND VANLANDINGHAM, H. An adaptive direction biased fuzzy handoff algorithm with unified handoff candidate selection criterion. *in 48th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) 1* (1998), 127–131.
- [155] VAN QUANG, B., PRASAD, R. V., AND NIEMEGEERS, I. A survey on handoffs—lessons for 60 ghz based wireless systems. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE 14*, 1 (2012), 64–86.
- [156] WANG, H., KATZ, R., AND GIESE, J. Policy enabled handoffs across heterogeneous wireless networks. *Second IEEE Workshop on Mobile Computing systems and Applications, WMCSA* (Feb 1999), 51–60.
- [157] WANG, L., AND BINET., D. Madm based network selection in heterogeneous wireless networks : A simulation study. *In International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory, and Aerospace Electronic Systems Technology* (May 2009), 559–564.
- [158] WANG, S., AND BINET, D. a trigger based automatic subjective weighting method for network selection. *In Proceedings of the 5th Advanced International Conference on Telecommunications 40(5)* (May 2009), 362–368.
- [159] WANG, Y., AND AL. Generalizing topsis for fuzzy multiple-criteria group decision-making. *International Journal computers and mathematics with applications 53(11)* (2007), 1762–1772.
- [160] WANG, Y., AND AL. Vertical handover decision in an enhanced media independent handover framework. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference* (2008), 2693–2698.
- [161] WEI, G. *Optimisation du handover dans le protocole IPV6 mobile avec la méthode E-HCF*. Master Thesis, L'UNIVERSITE PARIS XII, France, 2007.
- [162] YAFANG, W., HUIMIN, C., AND JINYAN., Z. Network access selection algorithm based on the analytic hierarehy process and gray relation analysis. *In Proc. New Trends in Information Science and Service Science NISS'2010*. (May 2010), 503–506.
- [163] YAN, X., AHMET ŞEKERCIOĞLU, Y., AND NARAYANAN, S. A survey of vertical handover decision algorithms in fourth generation heterogeneous wireless networks. *Computer Networks 54*, 11 (2010), 1848–1863.
- [164] YAN, Z., LUO, H., QIN, Y., ZHOU, H., GUAN, J., AND ZHANG, S. An adaptive multi-criteria vertical handover framework for heterogeneous networks. *In Proceedings of the International Conference on Mobile Technology, Applications, and Systems, Yilan, Taiwan* (2008), 141–147.

- [165] YANG, L., WU, J., AND HUANG., H. A vertical media-independent handover decision algorithm across wifi and wimax networks. *In 5th IFIP International Conference on Wireless and Optical Communication Networks* (2008), 1–5.
- [166] YIN, C. *Vers l'autogestion pour une continuité de service intégrée et « sans couture»*. Master Thesis, Spécialité : Informatique et Réseaux, Télécom ParisTech, France, novembre 2008.
- [167] YING., H. Typical takagi-sugeno and mamdani fuzzy systems as universal approximators : necessary conditions and comparison. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems 1* (May 1998), 824–828.
- [168] YOON, K., AND HWANG, C. *Multiple Attribute Decision Making : An introduction*. Sage Publications, 1995.
- [169] ZADEH., L. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning i. *Information sciences, Elsevier 8(3)* (Decembre 1975), 199–249.
- [170] ZAHNAN, A., AND LIANG, B. Performance evaluation framework for vertical handoff algorithms in heterogeneous networks. *In in IEEE International Conference on communications (ICC'2005)* (2005), vol. 1, IEEE, pp. 173–178.
- [171] ZAHNAN, A., LIANG, B., AND SALEH, A. Signal threshold adaptation for vertical handoff in heterogeneous wireless networks. *Mobile Netw. Appl 11* (2006), 625–640.
- [172] ZANAKIS, S., SOLOMON, A., WISHART, N., AND DUBLISH., S. Multi-attribute decision making : A simulation comparison of select methods. *European Journal of Operational Research 107(3)* (1998), 507–529.
- [173] ZAVADSKAS, E., AND AL. Multi-attribute decision-making model by applying grey numbers. *Informatica 20(2)* (2009), 305–320.
- [174] ZEKRI, M. *Prise de décision de handover vertical pour la gestion de mobilité dans les réseaux hétérogènes sans fil*. Ph.D. Thesis, Doctorat conjoint Télécom et Management SudParis et Université Pierre et Marie Curie, Janvier 2012.
- [175] ZHANG, W. Handover decision using fuzzy madm in heterogeneous networks. *In Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) 2* (2004), 653–658.
- [176] ZHENG, L., YU, W., AND WEILING, W. Position location and direction assisted handoff algorithm in dwcs. *in 15th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 1* (2004), 663–666.
- [177] ZHU, F., AND MCNAIR, J. Multiservice vertical handoff decision algorithms. *Computer Communications 55* (April 2006), 52–57.