



HAL
open science

Gestion de la Mobilité, de la Qualité de Service et Interconnexion de Réseaux Mobiles de Nouvelle Génération

Tarek Bchini

► **To cite this version:**

Tarek Bchini. Gestion de la Mobilité, de la Qualité de Service et Interconnexion de Réseaux Mobiles de Nouvelle Génération. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT; École supérieure des communications de Tunis (Tunisie), 2010. Français. NNT : 2010INPT0016 . tel-04272191

HAL Id: tel-04272191

<https://theses.hal.science/tel-04272191v1>

Submitted on 6 Nov 2023

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

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



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *L'INPT/ENSEEIH*
Discipline ou spécialité : *Réseaux et Télécoms*

Présentée et soutenue par *Tarek BCHINI*
Le *10/06/2010*

Titre : Gestion de la Mobilité, de la Qualité de Service et Interconnexion de Réseaux Mobiles de Nouvelle Génération

JURY

<i>Mme. Monique BECKER</i>	<i>Présidente</i>	<i>Professeur, Telecom SudParis – Paris</i>
<i>M. Salah BEN ABDALLAH</i>	<i>Examineur</i>	<i>M.C.HDR, ISET'COM – Tunis</i>
<i>M. Farouk KAMOUN</i>	<i>Rapporteur</i>	<i>Professeur, ENSI – Tunis</i>
<i>M. Toufik AHMED</i>	<i>Rapporteur</i>	<i>Professeur, ENSEIRB – Bordeaux</i>
<i>M. André-Luc BEYLOT</i>	<i>Directeur</i>	<i>Professeur, INPT/ENSEEIH – Toulouse</i>
<i>M. Sami TABBANE</i>	<i>Directeur</i>	<i>Professeur, SUP'COM – Tunis</i>
<i>M. Nabil TABBANE</i>	<i>Co-Directeur</i>	<i>M.C.HDR, SUP'COM – Tunis</i>
<i>M. Emmanuel CHAPUT</i>	<i>Co-Directeur</i>	<i>M.C, INPT/ENSEEIH – Toulouse</i>

Ecole doctorale : *Mathématiques, Informatique et Télécommunications de Toulouse*
Unité de recherche : *IRIT/IRT UMR 5505*
Directeur(s) de Thèse : *André-Luc BEYLOT*

- *Dédicace* -

❖ *A mon cher père Abdallah,*

❖ *à ma chère mère Mahbouba,*

❖ *à mon frère Dhafer,*

❖ *à ma sœur Nada,*

❖ *à tous mes oncles et tantes,*

❖ *à tous mes cousins et cousines*

❖ *à toute la famille*

❖ **et à tous ceux qui m'aiment**

Remerciements

Mes remerciements vont à mes Directeurs et Codirecteurs de thèse : Professeur **André-Luc BEYLOT**, Professeur **Sami TABBANE**, Maître assistant Docteur **Nabil TABBANE** et Maître de Conférences Docteur **Emmanuel CHAPUT**, de m'avoir donné leur confiance, et pour m'avoir donné la chance de découvrir, de connaître et de collaborer avec eux dans cette thèse au sein de leurs laboratoires et unités de recherche. J'ai apprécié la considération qu'ils me portaient ainsi que les précieux conseils qu'ils m'ont prodigués.

J'aimerais exprimer ma reconnaissance envers les membres du jury, Monsieur **Farouk KAMOON** Professeur émérite à l'ENSI de Tunis et Monsieur **Toufik AHMED** Professeur à l'ENSEIRB de Bordeaux qui ont accepté de juger ce travail et d'en être les rapporteurs. Je remercie particulièrement, Monsieur **Salah BEN ABDALLAH** Maître de conférences (HDR) directeur de l'ISET'COM de Tunis et Madame **Monique BECKER** Professeure à Télécom SudParis qui ont accepté aussi de juger ce travail et d'en être les examinateurs.

Je remercie tout le personnel de l'unité de recherche en Réseaux Radio-Mobiles Multimédia (*MEDIATRON*), de l'Ecole Doctorale Technologie de l'Information et de la Communication (*TIC*), de l'Ecole Supérieure des Communications de Tunis (*SUP'COM*), de l'Université 7 Novembre à Carthage, de l'équipe de recherche en Ingénierie des Réseaux et Télécommunications (*IRT*), de l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (*IRIT*), de l'Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique, d'Informatique, d'Hydraulique et des Télécommunications (*ENSEEIH*) de Toulouse, de l'Institut National de Polytechnique de Toulouse (*INPT*), qui m'ont aidé à accomplir mon travail dans de bonnes conditions.

Je remercie énormément l'IFC (*Institut Français de Coopération*) et le **CROUS de Toulouse (Les Services de la Vie Etudiante)** qui m'ont fourni une aide pécuniaire pendant mes séjours à Toulouse pour mes travaux de recherche dans le laboratoire **IRIT**, et je remercie aussi beaucoup le **Ministère de l'Enseignement Supérieur à Tunis (Programme d'Encouragement des Jeunes Chercheurs)** pour son aide financière durant mon séjour à Tunis pour mes travaux de recherche dans le laboratoire **MEDIATRON**. Je remercie aussi les services financiers du laboratoire **IRIT** et de l'école doctorale **TIC de SUP'COM** de m'avoir aidé financièrement pour pouvoir payer mes missions dans des conférences internationales.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude envers le Docteur **Nabil TABBANE** codirecteur tunisien de ma thèse et le Professeur **André-Luc BEYLOT** directeur français de ma thèse pour leur suivi technique, leur disponibilité, et leurs conseils d'expert tout au long de ma thèse ; envers le Professeur **Sami TABBANE** directeur tunisien de ma thèse et le Docteur **Emmanuel CHAPUT** codirecteur français de ma thèse pour leur soutien très précieux et leur encadrement ; et enfin envers le Docteur **Hafedh GAHA** ami et collègue de grande expérience pour tout ce qu'il a fait afin que je puisse poursuivre ma thèse en cotutelle.

Enfin, Je remercie tous les gens qui m'aiment et qui m'ont aidé tout au long de ma thèse directement ou indirectement, soit moralement, ou financièrement, ou techniquement...

Remerciements	3
Table des matières	4
Résumé de la thèse	8
INTRODUCTION GENERALE	9
Chapitre I. ETAT DE L'ART	12
1 Réseaux Impliqués	12
1.1 Réseau 4G.....	12
1.1.1 Introduction.....	12
1.1.2 Buts de la 4G.....	13
1.1.3 Conclusion.....	13
1.2 Technologies 4G.....	13
1.2.1 Réseau WiMAX.....	13
1.2.1.1 Introduction.....	13
1.2.1.2 Couches protocolaires.....	13
1.2.1.3 QoS dans le WiMAX.....	14
1.2.1.4 WiMAX mobile.....	15
1.2.1.4.1 Introduction.....	15
1.2.1.4.2 Architecture du WiMAX mobile.....	15
1.2.1.4.3 Mobilité dans l'IEEE 802.16e.....	17
1.2.1.5 IEEE 802.16m.....	18
1.2.1.6 Conclusion.....	19
1.2.2 LTE.....	19
1.2.2.1 Introduction.....	19
1.2.2.2 Accès radio LTE.....	19
1.2.2.3 Réseau cœur SAE.....	19
1.2.2.4 Réseau global EPS.....	20
1.2.2.5 Le Handover dans LTE.....	21
1.2.2.5 Conclusion.....	21
1.2.3 L'UMB.....	21
1.2.3.1 Introduction.....	21
1.2.3.2 Architecture de l'UMB.....	22
1.2.3.3 Mobilité dans l'UMB.....	23
1.2.3.4 Conclusion.....	23
1.2.4 Comparaison entre WiMAX, LTE et UMB.....	23
1.3 Réseau WLAN.....	24
1.3.1 IEEE 802.11.....	24
1.3.2 IEEE 802.11e.....	24
1.3.3 Comparaison entre 802.11e et 802.16e.....	25
1.3.4 Conclusion.....	25
1.4 Réseau 3G.....	26
1.4.1 L'UMTS.....	26
1.4.2 Comparaison entre UMTS et IEEE 802.16e.....	27
1.4.3 Conclusion.....	28
1.5 Réseaux satellitaires.....	28
1.5.1 DVB-S.....	28
1.5.2 DVB-S et DVB-RCS.....	29
1.5.3 DVB-S2.....	30
1.5.4 IPoS.....	30
1.5.5 Conclusion.....	31

2	Protocoles de Mobilité	31
2.1	Handover.....	31
2.2	Micro-Mobilité en utilisant des Protocoles de Niveau 2.....	32
2.2.1	Introduction.....	32
2.2.2	Hard Handover IEEE 802.16e.....	32
2.2.3	Soft Handover IEEE 802.16e.....	33
2.2.3.1	MDHO.....	33
2.2.3.2	FBSS.....	34
2.2.4	Conclusion.....	35
2.3	Macro-Mobilité en utilisant des Protocoles de Niveau 3.....	36
2.3.1	Introduction.....	36
2.3.2	Mobile IPv4.....	36
2.3.3	Proxy Mobile IPv4.....	37
2.3.4	Mobile IPv6.....	37
2.3.5	Conclusion.....	38
2.4	Macro-mobilité en utilisant des Protocoles de Niveau 3+.....	38
2.4.1	HIP.....	38
2.4.2	MSCTP.....	39
2.4.2.1	Introduction.....	39
2.4.2.2	Fonctionnement.....	40
2.4.3	SIP.....	40
2.4.4	Architecture de mobilité IEEE 802.21 (MIH).....	41
2.4.5	Conclusion.....	42
2.5	Conclusion du premier chapitre.....	43
	Chapitre II. GESTION DE LA MOBILITE DANS LE WIMAX MOBILE	44
1	Mobilité à grande vitesse dans une zone rurale	44
1.1	Introduction.....	44
1.2	Modèle des simulations et scénarios de mobilité.....	44
1.2.1	Modèle des simulations.....	44
1.2.2	Scénarios de mobilité.....	45
1.3	Paramètres des simulations et critères de performance.....	47
1.3.1	Paramètres des simulations.....	47
1.3.2	Critères de performance.....	47
1.4	Résultats des simulations.....	48
1.5	Conclusion.....	53
2	Mobilité avec différentes vitesses dans une zone urbaine	53
2.1	Introduction.....	53
2.2	Modèle des simulations et scénarios de mobilité.....	53
2.2.1	Modèle des simulations.....	53
2.2.2	Scénarios de la mobilité.....	54
2.3	Paramètres des simulations et critères de performance.....	55
2.3.1	Paramètres des simulations.....	55
2.3.2	Critères de performance.....	56
2.4	Résultats des simulations.....	56
2.5	Conclusion.....	59
3	Transfert intercellulaire de niveau 3 en utilisant MSCTP	59
3.1	Introduction.....	59

3.2	Comparaison entre MIP, PMIP et MSCTP.....	59
3.3	Modèle des simulations et scénario de mobilité.....	60
3.3.1	Modèle des simulations.....	60
3.3.2	Scénario de la mobilité.....	60
3.4	Paramètres des simulations et critères de performance.....	61
3.4.1	Paramètres des simulations.....	61
3.4.2	Critères de performance.....	61
3.5	Résultats des simulations.....	61
3.6	Conclusion.....	62
4	Mécanisme décisionnel flou pour la gestion du HO dans 802.16e	63
4.1	Introduction.....	63
4.2	La logique floue.....	63
4.2.1	Introduction.....	63
4.2.2	Système d'inférence floue.....	63
4.3	Algorithme décisionnel fondé sur la logique floue.....	65
4.3.1	Paramètres d'entrée.....	65
4.3.1.1	Les attributs.....	65
4.3.1.2	Les critères.....	65
4.3.2	Algorithme proposé.....	66
4.3.3	Fuzzification.....	67
4.3.4	Evaluation des règles.....	69
4.3.5	Défuzzification.....	69
4.3.6	Exemple pratique.....	69
4.4	Modèle des simulations et scénarios de mobilité.....	69
4.4.1	Modèle des simulations.....	69
4.4.2	Scénarios de la mobilité.....	70
4.5	Paramètres des simulations et critères de performance.....	71
4.5.1	Paramètres des simulations.....	71
4.5.2	Critères de performance.....	71
4.6	Résultats des simulations.....	71
4.6.1	Les délais.....	71
4.6.2	Les taux des paquets perdus.....	74
4.6.3	Les débits.....	75
4.7	Conclusion.....	77
	Chapitre III. INTERCONNEXION DU 802.16e AVEC LES RESEAUX	78
1	Interconnexion du WiMAX mobile avec le WLAN (802.11e)	78
1.1	Introduction.....	78
1.2	Modèles d'interconnexion et scénarios de mobilité.....	78
1.2.1	Modèle et scénarios communs.....	78
1.2.2	Modèle d'interconnexion fondé sur MSCTP.....	79
1.2.3	Modèle d'interconnexion fondé sur IEEE 802.21.....	80
1.3	Paramètres des simulations et critères de performance.....	81
1.3.1	Paramètres des simulations.....	81
1.3.2	Critères de performance.....	82
1.4	Résultats des simulations.....	82
1.4.1	Délai de bout en bout.....	82
1.4.2	Taux des paquets perdus.....	83
1.4.3	Débits.....	84
1.5	Conclusion.....	84

2	Interconnexion du WiMAX mobile avec la 3G (UMTS)	85
2.1	Introduction.....	85
2.2	Pile protocolaire fondée sur MIH et MSCTP.....	85
2.3	Modèle de mobilité et schéma du Handover.....	87
2.3.1	Modèle d'interconnexion et scénarios de mobilité.....	87
2.3.2	Schéma de Handover.....	88
2.4	Simulations.....	89
2.4.1	Paramètres des simulations.....	89
2.4.2	Critères de performance.....	90
2.5	Résultats.....	90
2.5.1	Les délais.....	90
2.5.2	Les taux des paquets perdus.....	92
2.5.3	Les débits.....	94
2.6	Conclusion.....	95
3	Interconnexion du WiMAX mobile avec le satellite (DVB-S/RCS)	95
3.1	Introduction.....	95
3.2	Pile protocolaire convergente du DVB-S/RCS.....	95
3.3	Modèle d'interconnexion et scénarios de mobilité.....	96
3.4	Paramètres des simulations et critères de performance.....	98
3.4.1	Paramètres des simulations.....	98
3.4.2	Critères de performance.....	98
3.5	Résultats des simulations.....	98
3.6	Conclusion.....	100
4	Interconnexion du WiMAX mobile avec la 3G+ (LTE)	102
4.1	Introduction.....	102
4.2	Fonctionnement de MIH+MSCTP.....	102
4.3	Pile protocolaire fondée sur MIH et MSCTP.....	103
4.4	Modèle d'interaction et schémas du Handover.....	104
4.4.1	Modèle d'interconnexion et scénarios de mobilité.....	104
4.4.2	Schémas du Handover.....	105
4.5	Conclusion.....	106
	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE	107
	Publications internationales	110
	Annexe	111
	Glossaire	119
	Références bibliographiques	124
	Table des figures	127
	Liste des tableaux	129

Résumé de la thèse

Avec l'évolution rapide des technologies réseaux et télécoms radios mobiles, les chercheurs sont actuellement en train de préparer l'arrivée d'une nouvelle génération baptisée 4G. Le réseau de 4^{ème} génération qui est encore l'objet de travaux de recherche vise à améliorer l'efficacité spectrale et à augmenter la capacité de gestion du nombre des mobiles dans une même cellule. Il tend à offrir des débits élevés en situation de mobilité à grande ou faible vitesse. Il vise aussi à permettre et à faciliter l'interconnexion et l'interopérabilité entre différentes technologies existantes en rendant transparent à l'utilisateur le passage entre les réseaux. Enfin, il vise à éviter l'interruption des services durant le transfert intercellulaire, et à basculer l'utilisation vers le tout IP.

Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés en premier lieu aux problématiques de la QoS en situation de mobilité au sein d'une technologie candidate à la 4G (WiMAX mobile) pour du trafic temps-réel. Pour cela, nous avons comparé la performance de plusieurs protocoles de mobilité dans le contexte du Handover de niveau 2 et de niveau 3 et plus. Nous avons pour cela fait varier les modèles de mobilité, les configurations et les scénarios. Enfin, nous avons modélisé un algorithme décisionnel qui gère le Handover dans le WiMAX mobile en fonction de plusieurs paramètres d'entrées.

Au travers de ces études, nous avons dégagé des protocoles de mobilité qui offrent un niveau de QoS acceptable pour un trafic temps-réel dans le cadre des scénarios envisagés.

En deuxième lieu, nous nous sommes concentrés sur les problèmes d'interconnexion et d'interopérabilité entre les réseaux en tenant compte de la mobilité et du Handover vertical entre deux technologies. Pour cela, nous avons proposé de comparer des protocoles de mobilité puis de les combiner afin de diminuer les délais des trafics temps-réel au cours du Handover. Au niveau de l'interconnexion, nous avons proposé des modèles entre WiMAX mobile et de nombreux autres standards (802.11e, UMTS, DVB-S/RCS, LTE).

Outre les solutions d'interconnexion, nous avons également mis en évidence la ou les combinaisons de protocoles de gestion de la mobilité qui permettent de garantir de la QoS.

INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui, les systèmes de communication sans fil sont de plus en plus présents dans notre vie quotidienne et ils tendent à remplacer l'utilisation excessive de câbles. Bien que les connexions à haut-débit de type ADSL se multiplient dans le monde, elles ne permettent pas la souplesse d'utilisation que procure un réseau radio sans fil. Pour améliorer la qualité de service qu'ils offrent, les chercheurs préparent l'arrivée de la future génération baptisée 4G.

Dans le contexte de l'arrivée de la 4G, notre travail de thèse s'est concentré sur des principaux problèmes liés à cette nouvelle génération : le transfert intercellulaire sans coupure et avec un niveau de qualité de service acceptable dans une technologie 4G, et l'interconnexion et le Handover vertical transparent avec un minimum de délai entre une technologie 4G et un autre réseau. Pour cela, nous allons proposer plusieurs scénarios de mobilité dans une même technologie ou entre deux technologies différentes, et dans chaque scénario nous allons essayer une combinaison de protocoles de mobilité, et à la fin de chaque scénario nous allons dégager la combinaison qui fonctionne le mieux pour un ou plusieurs types de trafic utilisés dans un scénario.

Si nous faisons un tour d'horizon des solutions 3G/4G, nous pouvons citer tout d'abord WiMAX. Cette technologie a pour objectif de fournir un accès sans fil haut débit à Internet dans un rayon de plusieurs kilomètres et est donc destinée principalement aux réseaux métropolitains.

En effet, la portée prévue des ondes est d'environ 50 km. Néanmoins cette portée est théorique et la portée réelle devrait se situer plutôt aux alentours de 8 ou 10 km, ce qui reste suffisant pour proposer une connectivité à l'échelle d'une ville.

Le WiMAX est donc une solution hertzienne pour des réseaux WMAN. C'est une technologie prometteuse alliant portée, haut débit, qualité de service, interopérabilité, efficacité en terme de coût, mobilité, etc, ...

La norme IEEE 802.16e permet d'apporter la mobilité au WiMAX Fixe tout en étant interopérable avec celui-ci. Elle permet aussi la téléphonie sur IP ou VoIP et l'usage des services mobiles à haut débit.

A partir d'une station de base vers des clients mobiles se déplaçant à moins de 120 km/h en passant d'une antenne à l'autre, l'IEEE 802.16e prévoit la transmission de données à des débits allant jusqu'à 30 Mb/s sur une zone de couverture d'un rayon inférieur à 3,5 km. Pour communiquer, les PC portables et d'autres équipements nomades devront naturellement intégrer un composant dédié.

Ce standard permet de mixer les zones de couverture par interopérabilité entre des liaisons fixes et des liaisons mobiles. De même, celui-ci donne la possibilité au client mobile de passer automatiquement d'une station à une autre sans perte de connexion.

Au vu des caractéristiques, nous avons décidé de fonder une grande partie de notre travail sur cette technologie en nous intéressant plus particulièrement à la gestion de la mobilité.

Le Handover ou le transfert intercellulaire est l'ensemble des fonctions et d'opérations mises en œuvre entre une ou plusieurs stations de base et une station mobile, pour permettre à cette dernière de changer de cellule et de bénéficier des services d'une nouvelle cellule. La station mobile aura la possibilité de continuer sa communication en cours avec un minimum d'interruption, sachant que les deux cellules impliquées sont gérées par un ou plusieurs réseaux.

Les protocoles de mobilité interviennent généralement au cours du Handover.

Si l'on s'en réfère au modèle OSI, la mobilité peut être mise en œuvre à différents niveaux. Le niveau de mobilité le plus bas est le niveau 2 qui correspond à la couche liaison du modèle

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

La mobilité de niveau réseau et plus est connue également 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. La station mobile effectue dans ce cas un transfert intercellulaire entre deux cellules gérées par différentes passerelles.

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) et son extension DAR (Dynamic Address Reconfiguration). SCTP étendu avec DAR constituent le protocole MSCTP (Mobile SCTP).

Enfin, l'architecture IEEE 802.21, connue aussi sous le nom de MIH (Media Independent Handover), fournit des méthodes et des fonctionnalités pour aider la station mobile à détecter les réseaux disponibles dans son environnement et lui permettre d'initier le Handover vertical entre les différents réseaux détectés. La norme permet simplement de fournir des informations qui aident à l'initiation du Handover, la sélection du réseau et l'activation de l'interface. L'exécution et la décision du Handover ne font pas partie de la norme.

LTE (Long Term Evolution) est une technologie avancée concurrente du WiMAX pour la validation 4G. Elle propose des débits élevés pour le trafic temps-réel, avec une longue portée.

DVB-S/RCS (Digital Video Broadcast over Satellite / Return Channel System) est un système combiné de communication de type aller/retour par satellite, son plus grand avantage est l'immense couverture qu'il offre.

Cette grande diversité de solutions nous a poussé à essayer de faire un tri entre ces techniques en se plaçant dans différents contextes. Si l'on prend l'exemple tout d'abord des réseaux WiMAX mobiles, la question que l'on se pose est de savoir s'il sont à même de garantir la QoS aux utilisateurs lors des transferts intercellulaires.

On peut s'interroger sur cette aptitude en fonction du degré de mobilité, de la densité des utilisateurs, ou encore des attentes des applications.

En outre, parmi les techniques évoquées, il est désormais important de mettre en évidence la solution ou la combinaison de solutions qui sera à même de conduire aux meilleurs résultats.

Par ailleurs, il apparaît clairement qu'il n'y aura pas une seule technologie sans fil dans les années à venir avec des utilisateurs qui désireront, tout en se déplaçant, se raccorder en permanence à un réseau ; il faudra alors prévoir des solutions d'interopérabilité efficaces entre les systèmes.

Dans le domaine des réseaux télécoms, ce sera probablement UMTS et LTE ; dans le cadre des réseaux WLAN des réseaux WIFI voir des réseaux par satellite pour certains régions mal couvertes.

On doit donc proposer des solutions efficaces pour tous ces contextes pour gérer à la fois la mobilité et la qualité de service.

Dans le premier chapitre, notre travail de thèse s'est focalisé sur l'étude de plusieurs normes de communication radio mobile et quelques normes de communication par satellite ; puis sur le choix d'une technologie susceptible de devenir la base de la 4G ; et enfin sur l'étude de plusieurs protocoles de mobilité de tous niveaux.

Dans le deuxième chapitre, le travail s'est concentré sur l'amélioration de la qualité de service pour du trafic temps-réel dans le cas d'une mobilité de l'utilisateur au sein d'une seule technologie (WiMAX mobile). Dans ce contexte, les contributions qui ont été apportées couvrent d'abord la comparaison de quelques protocoles de mobilité de niveau 2 dans un scénario de mobilité à grande vitesse dans une autoroute. Ensuite abordent la mobilité de niveau 2 et 3 dans un scénario supportant tous les niveaux de mobilité dans une zone urbaine. Après nous réalisons la comparaison de quelques protocoles de mobilité de niveau 3 dans le WiMAX mobile. Enfin, nous proposons un algorithme décisionnel modélisé avec la logique floue et qui consiste à améliorer la latence au cours du Handover dans le WiMAX mobile en effectuant un choix rapide et juste du bon protocole de mobilité en fonction de l'existant.

Dans le troisième chapitre, nous avons traité plusieurs cas de mobilité et de Handover vertical entre différentes technologies. Dans chaque cas nous avons proposé une solution d'interconnexion et d'interopérabilité entre les différentes technologies, et nous avons testé un seul protocole ou une combinaison de protocoles pour essayer d'obtenir une meilleure QoS au cours du Handover pour le trafic temps-réel.

Les contributions effectuées dans cette dernière partie consistent en l'interconnexion du WiMAX mobile avec la version dédiée à la QoS du WIFI (IEEE 802.11e) ; l'interconnexion du WiMAX mobile avec la technologie de télécommunications baptisée 3G (UMTS) ; l'interconnexion du WiMAX mobile avec le système combiné de communication par satellite (DVB-S/RCS) ; et l'interconnexion du WiMAX mobile avec la technologie concurrente à la 4G (LTE).

Enfin, nous dresserons une conclusion générale du manuscrit et proposerons des perspectives à ce travail.

Chapitre I. ETAT DE L'ART

Ce premier chapitre est consacré à la présentation des éléments clés et des acteurs majeurs nécessaires aux contributions abordés dans notre thèse. D'abord, nous allons présenter le concept de la nouvelle génération attendue dans le domaine des télécoms : 4G. Ensuite, nous allons décrire quelques technologies de communication mobile candidates à cette nouvelle génération et actuellement en cours de standardisation comme le WiMAX mobile, le LTE et le UMB (Ultra Mobile Broadband). Puis, nous allons présenter des normes de communication radio mobiles moins récentes et qui sont trop connues comme : le WIFI et l'UMTS. Après, nous allons présenter quelques normes de communication par satellite comme : DVB-S, DVB-RCS et DVB-S2. Et enfin, nous allons présenter plusieurs protocoles de mobilité suivant leurs niveaux par rapport au modèle OSI : par exemple pour le niveau 2 (couche liaison), nous allons présenter Hard Handover et Soft Handover. Ensuite, pour le niveau 3 (couche réseau), nous présenterons MIPv4 (Mobile IP), PMIPv4 (Proxy MIP) et MIPv6. Et enfin, dans le niveau de mobilité 3+, nous aborderons les protocoles HIP (Host Identity Protocol), MSCTP (Mobile Stream Control Transmission Protocol), et l'architecture 802.21 proposée par l'IEEE.

A l'issue de ce premier chapitre, nous allons choisir le WiMAX mobile comme technologie de base de nouvelle génération, et nous allons concentrer nos études et contribuer en se fondant sur cette technologie. Dans le 2^{ème} chapitre nous allons aborder la gestion de la mobilité et de la qualité de service au niveau du WiMAX mobile. Et dans le dernier chapitre, nous finaliserons avec l'interconnexion du WiMAX mobile avec d'autres réseaux.

1. Réseaux Impliqués

1.1 Réseau 4G

1.1.1 Introduction

Toujours en cours de recherches et de standardisation, le réseau 4G (4^{ème} génération) [1], [2], [3], [4], [5] est proposé comme future génération des réseaux mobiles après la 3G. Ce réseau a également pour objectif d'abolir les frontières de la mobilité.

Avec le réseau 4G, un utilisateur pourra se connecter où qu'il se trouve : à l'intérieur des bâtiments avec les technologies Bluetooth, UWB ou WiFi..., à l'extérieur (dans la rue et les lieux publics) avec l'UMTS ou le WiMAX... En général, le passage d'un réseau à l'autre deviendra transparent pour l'utilisateur.

Les débits supposés sont entre 20 et 100 Mb/s à longue portée et en situation de mobilité, et 1 Gb/s à courte portée vers des stations fixes.

Par définition, la 4G assure la convergence de la 3G avec les réseaux de communication radio fondés sur le protocole IP. La connexion devra être possible quel que soit le mode de couverture.

L'institution internationale de standardisation ITU (Union Internationale des Télécoms) n'a toujours pas donné de définition à la 4G. Les trois technologies supposées comme candidates potentielles pour une validation 4G sont [6] :

- **Long Term Evolution (LTE)** poussée par les Européens, avec Ericsson en tête suivi de Nokia et Siemens...
- **WiMAX version 802.16m** soutenu par Intel sachant que le WIMAX a été ajouté à la liste des standards 3G par l'ITU le 19/10/2007 [7].
- **Ultra Mobile Broadband (UMB)** soutenu par le fondateur américain Qualcomm (fabriquant des puces).

1.1.2 Buts de la 4G

La 4^{ème} génération vise à améliorer l'efficacité spectrale et à augmenter la capacité de gestion du nombre de mobiles dans une même cellule. Elle tente aussi d'offrir des débits élevés en situation de mobilité et à offrir une mobilité totale à l'utilisateur en établissant l'interopérabilité entre différentes technologies existantes. Elle vise à rendre le passage entre les réseaux transparent pour l'utilisateur, à éviter l'interruption des services durant le transfert intercellulaire, et à basculer l'utilisation vers le tout-IP.

1.1.3 Conclusion

La 4G, toujours en cours de recherche, est un futur standard qui vise en général à améliorer la QoS en terme de débit, mobilité, etc, dans le cas d'échange de trafic temps-réel sensible au délai par les abonnés. Cependant, il y a quelques buts visés par la 4G qui sont très difficiles à réaliser, comme offrir des débits très élevés pour des utilisateurs qui se déplacent à très grande vitesse, ou encore garantir à l'utilisateur un Handover transparent et sans aucune interruption.

Parmi les objectifs de la 4G, nous avons intervenu au niveau des problématiques de la QoS et la mobilité dans une technologie candidate à la 4G, et au niveau des problématiques des interconnexions et du Handover transparent entre les réseaux.

1.2 Technologies 4G

1.2.1 Réseau WiMAX

1.2.1.1 Introduction

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) [8], [9], [10], [11], [12] est une solution pour des réseaux MAN sans fil. En utilisant un accès WiMAX, on peut atteindre théoriquement un débit jusqu'à 70 Mb/s avec une distance de 50 km.

WiMAX se sert de la technologie micro onde avec plusieurs bandes de fréquences.

Par rapport au modèle OSI, IEEE 802.16 se focalise comme tous les standards IEEE sur les couches 1 et 2.

WiMAX prend en charge les transferts de type ATM et IP. Pour cela il utilise une sous-couche de convergence qui permet la conversion des informations afin de les rendre exploitable par la couche MAC.

WiMAX couvre des zones géographiques importantes sans la contrainte d'installation d'infrastructures coûteuses pour faire parvenir la connexion jusqu'à l'utilisateur. Le premier élément de l'architecture WMAN est la station de base (BS) qui couvre une certaine zone géographique où se situent des utilisateurs immobiles ou en mouvement relativement lent qui communiquent avec la BS selon le principe du point à multipoint.

Ce réseau peut fournir des débits importants et un passage à l'échelle en raison des capacités de canal flexibles. Il offre une couverture importante, des services avec des exigences de QoS, ainsi qu'une sécurité importante.

Le standard 802.16 couvre l'utilisation des bandes de fréquences de 10 à 66 GHz.

1.2.1.2 Couches Protocolaires

Dans la structure de la pile protocolaire du WiMAX, il existe une couche physique et trois sous-couches MAC :

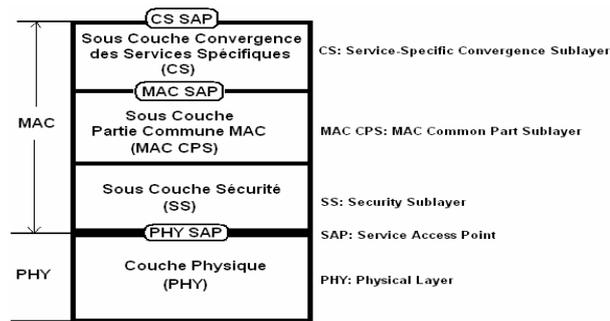


Figure 1. Pile protocolaire de WiMAX

- **Service-Specific Convergence Sublayer (1^{ère} sous couche MAC)**

Joue le rôle d'interface avec les couches supérieures ou bien avec les systèmes externes. Elle a entre autre la charge de classer les paquets selon leur provenance et leur destination afin de les répartir sur la bonne connexion MAC.

- **Common Part Sublayer (2^{ème} sous couche MAC)**

Contient les fonctions clés de la couche MAC. Elle détermine de quelle manière le médium va être partagé. C'est le cœur de la couche MAC à savoir qu'elle s'occupe de l'allocation de ressource, de l'établissement et de la maintenance des connexions, etc...

- **Sous couche de protection (3^{ème} sous couche MAC)**

Contient les informations d'authentification et de cryptage. Elle s'occupe aussi du cryptage des données, de l'échange des clefs, etc...

- **Couche physique**

- *Modulation* : Selon les besoins, différentes couches physiques peuvent être utilisées par la couche MAC. Au niveau physique, on utilisera par exemple différentes méthodes de modulation (QPSK, QAM 16, QAM 64) pour gérer l'envoi des bits sur le support.
- *Multiplexage* : Pour gérer le partage des porteuses sur les voies montantes et descendantes, des techniques de multiplexage sont utilisées: TDD (Time Division Duplex) et FDD (Frequency Division Duplex).
- *Méthodes d'accès* : Il est nécessaire de partager un support unique entre plusieurs utilisateurs. Une politique d'accès au support est donc mise en place, en l'occurrence, le WiMAX utilise TDM/TDMA (Time Division Multiplexing / Time Division Multiple Access).

1.2.1.3 QoS dans le WiMAX

Le WiMAX a été conçu dès le début pour prendre en charge la Qualité de Service (QoS).

La couche MAC permet de différencier deux classes de stations d'abonnées (SS):

- GPC (Grant per Connection) : Où le débit est alloué explicitement par la BS à une connexion, et la SS emploie les ressources seulement pour cette connexion.
- GPSS (Grant per SS) : Où l'allocation de débit par la BS est faite par station d'abonné SS. Elle va ensuite répartir ses ressources entre les différentes connexions.

Le WiMAX propose des classes de services pour offrir une QoS différente entre les communications. Les classes de QoS sont :

- Unsolicited Grant Service (UGS) : Ce type de service est utilisé pour des flux temps réel générant des paquets de taille fixe et de façon périodique comme de la transmission de voix sans suppression de silences.
- Real-Time Polling Service (rtPS) : Ce service concerne les flux temps réel générant périodiquement des paquets de taille variable comme de la vidéo encodée en MPEG.

- Non-Real-Time Polling Service (nrtPS) : Ce service est conçu pour les flux ne nécessitant pas de temps réel, utilisant des paquets de taille variable, comme du transfert de fichiers (FTP) à haut débit.
- Best Effort (BE) : Ce service est le plus simple de tous, il est utilisé pour tous les flux ne nécessitant pas de qualité de service particulière.

1.2.1.4 WiMAX mobile

1.2.1.4.1 Introduction

Le WiMAX mobile (Standard IEEE 802.16e) [12], [13] est la version qui apporte la mobilité au WiMAX fixe tout en restant interopérable avec celui-ci. A partir d'une station de base (BS) vers des clients mobiles (MS) se déplaçant à moins de 120 km/h en passant d'une antenne à l'autre, l'IEEE 802.16e prévoit la transmission de données à des débits allant jusqu'à 30 Mb/s sur une zone de couverture d'un rayon inférieur à 3,5 km. Pour bénéficier des services de cette technologie, les équipements mobiles devront intégrer un composant dédié. Au niveau de l'interface physique, IEEE 802.16e utilise la méthode d'accès OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) qui permet d'adapter les canaux de manière dynamique.

1.2.1.4.2 Architecture du WiMAX mobile

L'architecture du WiMAX mobile [9], [14], [15] est composée de terminaux mobiles (MS) qui communiquent via un lien radio avec une station de base (BS) qui joue le rôle d'un relais avec une infrastructure terrestre fondée sur le protocole IP. Les BSs sont connectées à un élément du réseau appelé ASN-GW utilisé comme passerelle (Gateway) pour gérer le raccordement des BSs avec le réseau IP.

L'IEEE 802.16e est composé aussi du NAP (Network Access Provider) qui est l'entité responsable de fournir l'infrastructure nécessaire pour l'accès radio à un ou plusieurs fournisseurs de services. Elle contrôle un ou plusieurs ASN (Access Service Network) qui est formée d'une ou plusieurs BS, et d'un ou plusieurs ASN-GW.

La dernière composante de l'IEEE 802.16e est le NSP (Network Service Provider). Cette entité fournit l'accès au réseau IP et offre aux abonnés l'accès aux services réseau. Le NSP contrôle un ou plusieurs CSN (Connectivity Service Network) qui est le cœur du réseau WiMAX.

Les fonctions des différents éléments formant l'architecture du réseau WiMAX mobile sont décrites ici :

- **Network Access Provider (NAP) :**

Une entreprise qui fournit l'infrastructure d'accès radio à un ou plusieurs fournisseurs de services de réseau.

- **Network Service Provider (NSP) :**

- Une entité qui fournit la connectivité IP et les services réseau aux abonnés compatibles avec le niveau de service établi. Pour fournir ces services, un NSP établit des ententes contractuelles avec un ou plusieurs programmes d'action nationaux.

- Un NSP peut également établir des accords de Roaming avec d'autres fournisseurs de services réseau et des ententes contractuelles avec des tiers fournisseurs de l'application (par exemple ASP) pour fournir des services IP aux abonnés.

- **Connectivity Serving Network (CSN) :**

Représentation logique des fonctions du NSP, par exemple :

- Raccordement à Internet.
- Authentification, autorisation et gestion.
- Gestion de l'adresse IP.

- Mobilité et Roaming entre ASNs.
 - Gestion de la politique et de la QoS fondée sur le SLA (Service Level Agreement).
- Elle contient des éléments de gestion comme le DHCP, l'AAA, l'HA, etc.

- **Access Serving Network (ASN) :**

Représentation logique des fonctions du NAP, exemple :

- Interface d'entrée au réseau 802.16.
- Gestion des ressources radio et contrôle d'admission.
- Gestion de la mobilité.
- QoS et politique de renforcement.
- Acheminement pour la sélection de CSN.

Elle contient une ou plusieurs stations de bases responsables de la communication avec les abonnés, et un ou plusieurs ASN-GW qui constituent une passerelle qui assure la connexion des BSs avec le CSN.

- **ASN Gateway (ASN GW) :**

Élément du réseau WIMAX qui agit comme une entité logique dans le système WIMAX. Il sert à représenter une agrégation du plan de contrôle des entités fonctionnelles avec la fonction correspondante dans l'ASN ou la fonction résidente dans le CSN, ou une autre fonction dans l'ASN.

Fonctionnalités de l'ASN GW :

Gère la mobilité, le Handover (transfert intercellulaire) et le forwarding. Il agit comme une passerelle. Il contrôle les ressources radio. Il renforce la QoS et la classification des fonctions et se charge de la gestion et de la sécurité.

Fonctions de l'ASN-GW :

- Gestion de localisation et du Paging.
- Serveur pour la session réseau et le contrôle de la mobilité.
- Contrôle d'admission et mise en cache des profils d'abonnés, et des clés de chiffrement.
- AAA (Authentication Authorization Accounting) client/proxy.
- Fournit les fonctionnalités de l'agent étranger.
- Routage IPv4 et IPv6 pour sélectionner le CSN.

- **La station de base :**

Située dans l'ASN et responsable de la communication sans fil avec les abonnés.

- **Les terminaux d'abonnés :**

Sont des équipements spéciaux équipés d'une carte WiMAX qui permet la communication avec ce réseau. Ils sont situés dans la zone de couverture d'une BS pour pouvoir communiquer avec cette dernière.

L'architecture de l'IEEE 802.16e est illustrée ci-dessous :

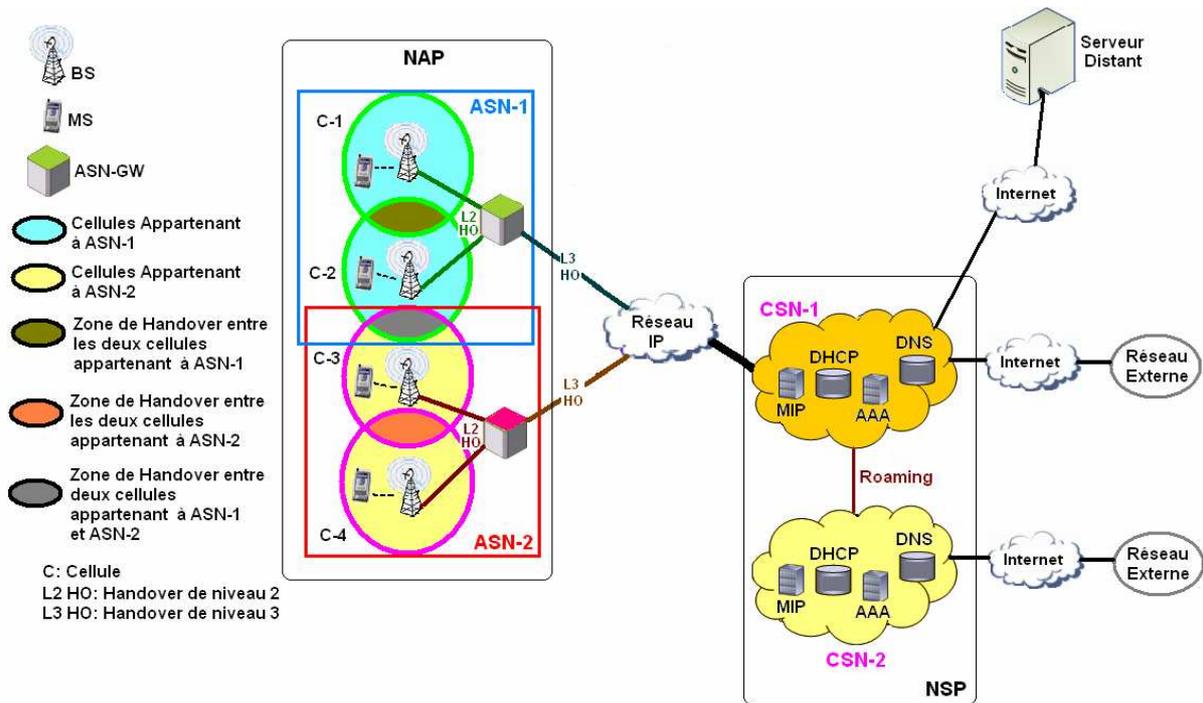


Figure 2. Architecture du WiMAX mobile

1.2.1.4.3 Mobilité dans l'IEEE 802.16e

▪ Fonctions relatives au déplacement du MS

Il y a trois fonctions principales de gestion du déplacement de la station mobile :

- Data Path : prend en charge la configuration du chemin et la transmission des données.
- MS Context : s'occupe de l'échange des informations relatives au MS dans le réseau cœur.
- Handover : c'est la fonction la plus intéressante, elle s'occupe de la signalisation et prend les décisions relatives au passage entre les cellules.

▪ Handover de niveau 2 (ASN Anchored Mobility Management)

Mobilité Intra-ASN (entre BSs de même ASN / Handover de couche 2 du modèle OSI) :

- Micro mobilité.
- Pas de mise à jour de l'adresse IP.

Deux types de Handover :

- Hard Handover : Début du nouveau service avec la nouvelle BS après la déconnexion avec l'ancienne BS (délai d'arrêt). La station communique avec une seule BS.
- Soft Handover : Début du nouveau service avec la nouvelle BS avant la déconnexion avec l'ancienne BS (pas de délai d'arrêt). La MS communique avec plusieurs BS en même temps, et maintient une liste de BSs *active set*. Il propose deux techniques : le MDHO et le FBSS.

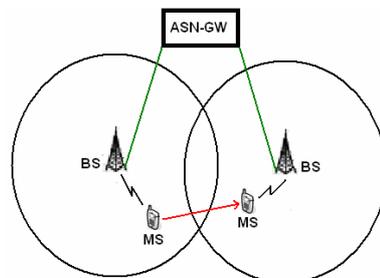


Figure 3. Intra-ASN Handover

Les différentes étapes d'un Hanter sont les suivantes :

1) Sélection de la cellule : une MS doit d'abord acquérir des informations sur les BSs dans le réseau. Ces informations servent à déterminer si un Handover est possible ou non. Cela peut se produire soit en utilisant les informations déjà connues sur le réseau, soit en exigeant un scrutation (scan).

2) Décision et initialisation du Handover : c'est la procédure de migration d'une MS à partir de l'ancienne BS vers la BS cible. La décision peut être déclenchée par la MS ou par la BS.

3) Synchronisation en voie descendante avec la BS cible : la synchronisation est obligatoire pour établir la communication. Durant cette phase, la MS reçoit les paramètres de transmission en voie montante et descendante. Si la MS a obtenu auparavant ces paramètres de la même BS, la procédure peut être raccourcie.

4) Ranging : lorsque la MS est synchronisée avec la nouvelle BS, il faut commencer la procédure de Ranging qui consiste en la réception de la MS des bons paramètres de la communication (exemple : décalage temporel, puissance du signal, etc.).

5) Résiliation de service : l'ancienne BS termine la connexion associée à la MS qui vient de migrer vers une autre BS et supprime toutes les informations de sa file d'attente.

6) Annulation de Handover : durant le processus de Handover, la MS a le droit d'annuler la procédure et de reprendre la communication avec l'ancienne à condition qu'elle ne l'ait pas annulée.

▪ Handover de niveau 3 (CSN Anchored Mobility Management)

Mobilité Inter-ASN (entre BSs de différentes ASN / Handover de couche 3 du modèle OSI)

- Macro mobilité.
- Mise à jour de l'adresse IP.
- Fondée sur MIP : Proxy MIP (PMIP) ou Client MIP (CMIP) (nous reviendrons ultérieurement sur la description de ces protocoles).

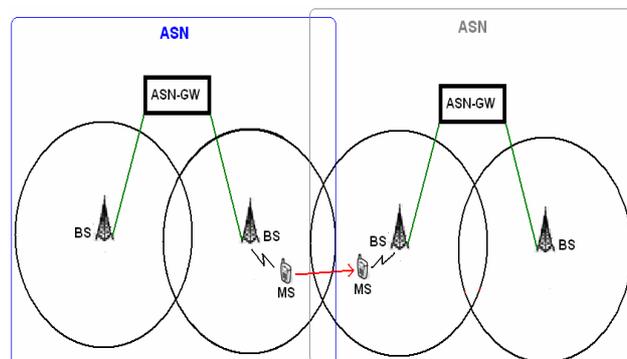


Figure 4. Inter-ASN Handover

1.2.1.5 IEEE 802.16m

IEEE 802.16m [12], [16], [17], [18], [19] est une amélioration du WiMAX (802.16-2004) et du WiMAX mobile (802.16e) assurant la compatibilité avec les deux systèmes. Les débits théoriques proposés par cette version atteignent 100 Mb/s en situation de mobilité, et à 1 Gb/s quand la station abonnée est fixe. Le système 802.16m peut opérer dans des fréquences radio inférieures à 6 GHz. IEEE 802.16m utilisera la technologie MIMO (Multiple Input / Multiple Output) comme le Mobile WiMAX en proposant d'améliorer la technologie d'antenne pour obtenir une bande passante plus grande. On peut voir le 802.16m comme une technologie qui profite des avantages de la 3G et du 802.16 pour offrir un ensemble de services à très haut débit (Streaming vidéo, IPTV, VoIP).

L'IEEE 802.16m gardera la même architecture et la même pile protocolaire que le 802.16e.

1.2.1.6 Conclusion

Le WiMAX fixe (IEEE 802.16) est une technologie radio de longue portée qui offre un bon niveau de QoS pour un nombre limité de stations d'abonnés fixes. La version mobile du WiMAX (IEEE 802.16e), est une technologie prometteuse qui offre une certaine QoS pour des terminaux mobiles qui se déplacent à une vitesse maximale de 120 km/h. La portée, ainsi que les débits offerts par cette technologie dépendent de l'environnement des utilisateurs (zone rurale ou urbaine...). Enfin, la version la plus évoluée de la gamme WiMAX (IEEE 802.16m) toujours en cours de recherche, est une technologie qui est prévue offrir des débits d'ordre supérieur avec un bon niveau de QoS. Cette technologie devra assurer aussi la rétro-compatibilité entre le WiMAX fixe et mobile.

Actuellement dans le monde, le WiMAX commence à être déployé surtout aux Etats-Unis, vue que c'est une technologie Américaine proposée par l'organisme IEEE. Il commence aussi à être déployé dans quelques pays de l'Asie. Et il est peu déployé en Europe.

1.2.2 LTE

1.2.2.1 Introduction

LTE [12], [18], [20], [21], [22], [23], [24] (Long Term Evolution of 3G) est la norme de communication mobile la plus récente qui est proposée par l'organisme 3GPP dans le contexte de la 4G. Comme l'IEEE 802.16m, elle propose des débits élevés pour le trafic temps-réel, avec une large portée. Théoriquement, le LTE peut atteindre un débit de 50 Mb/s en lien montant et 100 Mb/s en lien descendant.

En réalité, l'ensemble de ce réseau s'appelle EPS (Evolved Packet System), et il est composé des deux parties : le réseau évolué d'accès radio LTE, et le réseau cœur évolué appelé SAE (System Architecture Evolution).

Le seul inconvénient de cette nouvelle technologie est l'installation de ses nouveaux équipements qui sont différents de ceux des normes précédentes, et le développement des terminaux adaptés.

1.2.2.2 Accès radio LTE

Pour offrir des débits élevés, le LTE emploie la technologie OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) dans le sens descendant, et le SC-FDMA (Single Carrier - Frequency Division Multiple Access) dans le sens montant.

Le LTE respecte les délais requis par le trafic temps-réel.

Cette technologie prend en charge la mobilité des utilisateurs en exécutant le Handover à une vitesse allant jusqu'à 350 km/h.

Le LTE a pris en charge l'interconnexion et l'interopérabilité avec les normes 2G et 3G, et les réseaux CDMA-2000.

Contrairement à la 3G qui nécessite d'allouer une bande de fréquence de 5 MHz, le LTE propose plusieurs bandes de fréquences allant de 1.25 jusqu'à 20 MHz. Cela lui permettra de couvrir de grandes surfaces.

1.2.2.3 Réseau cœur SAE

Contrairement aux normes 2G et 3G qui proposent deux domaines de commutation de circuit et de paquet, SAE ne propose qu'un seul domaine paquet fondé sur l'IP et appelé EPC (Evolved Packet Core).

Il y a deux types de communication au niveau de SAE : Default bearer qui est une connectivité permanente sans garantie de débit entre un abonné et son réseau SAE

d'attachement ; et Dedicated bearer qui est une connectivité avec garantie de débit et d'une certaine QoS dans le cas de l'utilisation d'un trafic temps-réel sensible au délai.

1.2.2.4 Réseau global EPS

En comparant avec les normes 2G et 3G, l'architecture de l'EPS est plus simple. En particulier la nouvelle entité eNodeB remplace les fonctions des deux composants NodeB et RNC définis dans la 3G.

L'EPS est composé de :

- **UE** : équipement utilisateur.
- **eNodeB** : responsable de la transmission et de la réception radio avec l'UE.
- **MME (Mobility Management Entity)** : MME est responsable de la gestion de la mobilité et l'authentification des utilisateurs. Elle est responsable aussi du Paging lorsque l'utilisateur est en état inactif. Elle sélectionne les composants dédiés aux types de la communication de l'utilisateur. Elle gère le Handover inter-domaines et inter-réseaux. Et enfin elle s'occupe de la signalisation.
- **Serving GW (Serving Gateway) ou UPE (User Plane Entity)** : joue le rôle d'une passerelle lors du Handover inter-domaines et inter-réseaux. Responsable du routage des paquets.
- **PDN GW (Packet Data Network Gateway) ou IASA (Inter-Access System Anchor)** : chargé de la mobilité entre différents systèmes, il est composé de l'élément 3GPP Anchor qui permet d'exécuter la mobilité entre LTE est les technologies 2G/3G, et l'élément SAE Anchor qui permet d'exécuter la mobilité entre le système 3GPP et les systèmes non 3GPP (WIFI, WIMAX, etc.). Sachant que l'élément SAE Anchor ne prend aucune décision concernant la mobilité, il exécute seulement les décisions prises par l'UE. Responsable de l'attribution des adresses IP aux utilisateurs.
- **HSS (Home Subscriber Server)** : base de données, évolution du HLR de la 3G. Elle contient les informations de souscriptions pour les réseaux GSM, GPRS, 3G et LTE...
- **PCRF (Policy & Charging Rules Function)** : fournit les règles de la taxation.
- **ePDG (Evolved Packet Data Gateway)** : un élément réseau qui permet l'interopérabilité avec le réseau WLAN en fournissant des fonctions de routage des paquets, de Tunneling, d'authentification, d'autorisation et d'encapsulation / décapsulation des paquets.

L'architecture du réseau EPS est présentée ci-dessous [20], [21]:

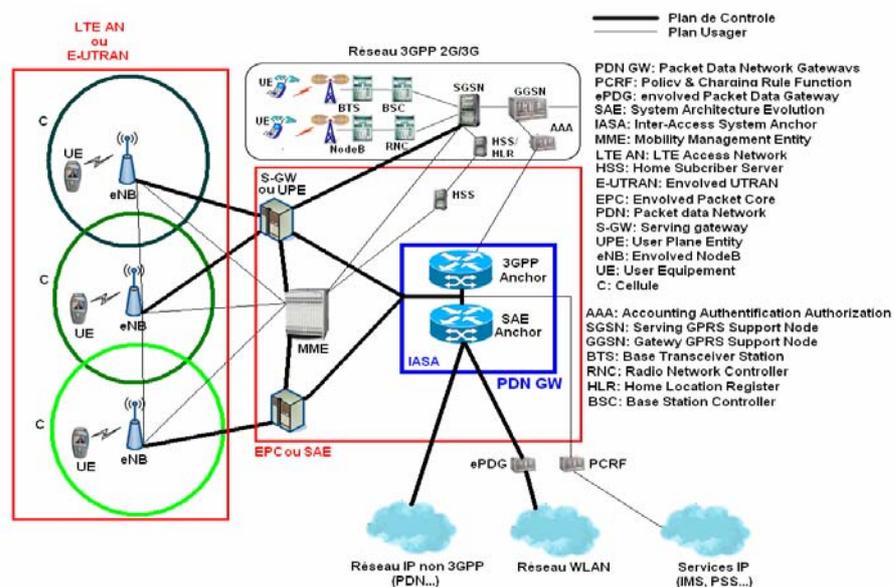


Figure 5. Architecture de l'EPS

1.2.2.5 Le Handover dans LTE

Dans LTE la gestion de mobilité est distribuée, les eNodeBs prennent la décision de Handover d'une façon autonome sans implication des éléments : MME et S-GW. Les informations nécessaires au Handover sont échangées entre les eNodeBs via une interface appelée X2. Le MME et le S-GW recevront une notification avec un message complet de Handover après que la nouvelle connexion aura été attribuée entre l'UE et la nouvelle eNodeB. Après réception du message, les Gateways effectuent le chemin de commutation. Durant le Handover il y a un délai durant lequel l'UE n'est pas connecté au système. Pour résoudre cela, une solution temporaire de Forwarding des données perdues de l'ancien eNB vers le nouveau eNB est proposée. Dans ce cas il n'y a pas de mémorisation des données au niveau des Gateways. L'intérêt de cette solution est de minimiser la charge de signalisation au niveau de l'interface entre l'eNB et l'MME/S-GW.

Les principales étapes du Handover sont :

- 1) Le Handover est déclenché par l'UE qui envoie un rapport de mesure à l'eNB source qui va décider en se fondant sur le rapport reçu et sur les informations concernant la gestion des ressources radio (RRM : Radio Resource Management).
- 2) La phase de préparation du Handover commence par l'envoi d'une requête de Handover (HO Request) de la part de l'eNB source vers l'eNB cible. Ce message contient toutes les informations pertinentes sur le Handover (UE - RAN, PDP context, etc.)
- 3) L'eNB cible enregistre le contexte, prépare les couches 1 et 2 (L1/L2) pour le Handover et répond à l'eNB source par un acquittement (HO Request Ack) qui fournira les informations sur l'établissement de nouveau lien radio.
- 4) L'eNB source transférera toutes les informations nécessaires à l'UE, et à ce moment là, l'eNB source arrête d'envoyer et de recevoir des données avec l'UE. Il fera alors suivre les données à l'eNB cible.
- 5) L'UE informe l'eNB cible du succès du Handover avec un message de confirmation. Jusqu'à cet instant l'eNB cible mémorise les données reçus de l'eNB source. Après avoir reçu le message de confirmation il commence à envoyer les données bufférisées à l'UE.
- 6) L'eNB cible initie le changement de chemin de données en envoyant un « Handover Complete » aux passerelles. Les informations de localisation de l'UE seront ensuite mises à jour au niveau des passerelles qui vont effectuer le changement de chemin pour que les données soient envoyées directement vers l'eNB cible.
- 7) L'MME/S-GW confirment le chemin par un message 'Handover Complete Ack', et dès que l'eNB cible reçoit ce message, il envoie une indication 'release Source' au eNB source pour qu'il libère définitivement la connexion avec l'UE.

1.2.2.5 Conclusion

LTE est une technologie avancée de communication radio mobile qui propose des débits d'ordre supérieur, et un bon niveau de QoS pour ses abonnés. Elle est soutenue par les européens et proposée par l'organisme 3GPP qui a déjà fixé toute la gamme de la téléphonie mobile fondée sur le monde des télécommunications. Dernièrement, et seulement en Europe, cette technologie prise en charge surtout par Alcatel commence à prendre de l'avance par rapport au WiMAX. Cependant, le déploiement à grande échelle est freiné par le coup induit par l'incompatibilité avec les équipements UMTS déjà fonctionnels.

1.2.3 L'UMB

1.2.3.1 Introduction

L'UMB (Ultra Mobile Broadband) [12], [18], [25], [26] ou plus exactement «CDMA2000 1xEV-DO Revision C» est le nom commercial de la prochaine version de la famille CDMA.

Avec la première révision A avec le CDMA, le débit offert était de 450 à 800 Kb/s vers des points fixes uniquement. Ensuite, avec la révision B il y avait une amélioration des débits jusqu'à 46,5 Mb/s. La dernière révision C proposée ajoute la gestion de la mobilité de l'utilisateur en grande vitesse et offre des débits théoriques à l'ordre de 288 Mb/s en voie descendante, et 75 Mb/s en voie montante. Elle propose aussi un environnement réseau qui se repose sur le principe de tout-IP et dispose de passerelles permettant l'interconnexion avec les réseaux de la famille 3GPP.

L'UMB repose sur une méthode d'accès de type OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) utilisant des mécanismes sophistiqués de contrôle et de signalisation, une gestion fine des ressources radio (RRM : Radio Resource Management), une gestion adaptative des interférences des liens retour (RL : Reverse Link) et la technique FDD (Frequency Division Duplex). Elle utilise aussi des techniques avancées d'antennes comme MIMO (Multiple In Multiple Out), SDMA (Space Division Multiple Access), et formation des faisceaux, tout en restant compatible avec les normes antérieures.

Parmi les caractéristiques décrites dans la spécification, nous noterons son usage polyvalent (fixe, pédestre, mobile jusqu'à plus de 300 km/h), son temps de latence de l'ordre de 14,3 ms, sa large couverture, et sa flexibilité de déploiement entre 1.25 MHz et 20 MHz.

1.2.3.2 Architecture de l'UMB

Les éléments du réseau et les interfaces formant l'architecture de l'UMB sont :

- **Access Terminal (AT)** : c'est le périphérique sans fil compatible avec l'UMB.
- **Access Gateway (AGW)** : c'est un routeur qui présente le premier point de rattachement au réseau IP.
- **Evolved Base Station (eBS)** : c'est une entité logique supportant la communication radio avec l'AT.
- **Session Reference Network Controller (SRNC)** : il est responsable du maintien de la référence de la session avec l'AT. Il est responsable aussi de la prise en charge de la gestion du statut IDLE de l'AT, et de la fourniture des fonctions de contrôle de Paging quand l'AT est inactif.

L'architecture de l'UMB est présentée ci-dessous :

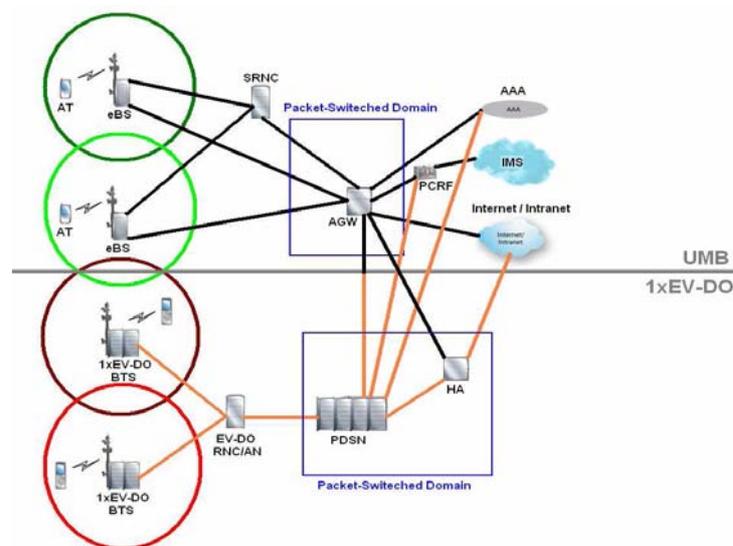


Figure 6. Architecture de l'UMB

1.2.3.3 Mobilité dans l'UMB

Il y a trois types de mobilité dans l'UMB : dans un même domaine AGW, entre deux domaines AGW, et entre deux technologies différentes.

- **Handover inter-eBS** : l'AT peut changer d'eBS à travers le Handover de couche 2.
- **Handover inter-AGW** : c'est dans le cas où le mobile passe d'une cellule gérée par un AGW à une autre gérée avec un autre AGW, ce Handover est de niveau 3.
- **Handover inter-systèmes** : entre UMB et une autre technologie.

1.2.3.4 Conclusion

Malgré les qualités de cette technologie, actuellement elle ne connaît pas un grand succès par rapport au WiMAX et LTE. Peut être parce qu'elle n'est pas soutenue par plusieurs industriels connus comme les autres, ou l'installation de ses équipements pose un problème ; mais dans tous les cas elle reste une technologie avancée qui propose une bonne QoS avec prise en charge de la mobilité des utilisateurs.

1.2.4 Comparaison entre WiMAX, LTE et UMB

Le tableau ci-dessous présente une comparaison entre des technologies candidates à la 4G : 802.16e / 802.16m, LTE et UMB [27], [28], [29].

	802.16e	802.16m	LTE	UMB
Cœur de réseau	IP	IP	IP	IP
Max des Débits Lien Descendant	75 Mb/s	> 130 Mb/s	100 Mb/s	288 Mb/s
Lien Montant (pour 20 Mhz)	25 Mb/s	> 75 Mb/s	50 Mb/s	75 Mb/s
Technologie d'accès	OFDMA	OFDMA	OFDM, SC-FDMA	OFDMA
Technique avancée des antennes	MIMO	MIMO, beamforming	MIMO	MIMO, SDMA, beamforming
Bande Passante du canal	1.25 à 20 MHz	5 à 20 MHz	1.25 à 20 MHz	1.25 à 20 MHz
Mobilité supportée	120 Km/h	350 km/h	> 350 Km/h	> 300 km/h
Totale mobilité	Oui	Oui	Oui	Oui
Economie d'énergie	Oui	Oui	Oui	Oui
Couverture de la cellule (zone dense)	2-7 Km	1-7 Km	5 Km	1-5 Km
Capacité de cellule	100-200 utilisateurs	> 200	> 200 à 5 MHz > 400 pour une large BP	> 200
Héritage	IEEE 802.16a jusqu'à 802.16d	IEEE 802.16a jusqu'au e	GSM/GPRS/UMTS/ HSDPA	CDMA2000/ EV- DO
Mode de Duplexage	FDD + TDD	FDD + TDD	FDD + TDD	FDD
Efficacité Spectrale	3.75 Bit/Sec/Hz	8 Bit/Sec/Hz	5 Bit/Sec/Hz	5 Bit/Sec/Hz

Tableau 1. Comparaison entre 802.16e, 802.16m, LTE et UMB

1.3 Réseau WLAN

1.3.1 IEEE 802.11

IEEE 802.11 [30], [31] ou WIFI est un standard international décrivant les caractéristiques du réseau LAN sans fil (WLAN). Il connecte des ordinateurs portables, des équipements de bureau, des équipements personnels (PDA)... en créant un réseau sans fil couvrant un rayon de dizaines de mètres et tolérant une mobilité à très petite vitesse.

IEEE 802.11 définit deux technologies : le mode infrastructure divisé en deux architectures :

- **L'architecture BSS (Basic Service Set)** : composée d'une seule cellule couverte par un seul point d'accès (AP) qui est l'intermédiaire permettant l'échange d'informations entre plusieurs stations.

- **L'architecture ESS (Extended Service Set)** : composée de plusieurs points d'accès connectés par un système de distribution, et formant un large réseau composé de plusieurs cellules.

Le deuxième mode défini par le WIFI est le mode Ad-Hoc qui permet l'échange direct des informations entre les stations sans obligation de passage par le point d'accès.

L'architecture du mode infrastructure est illustrée dans la figure ci-dessous :

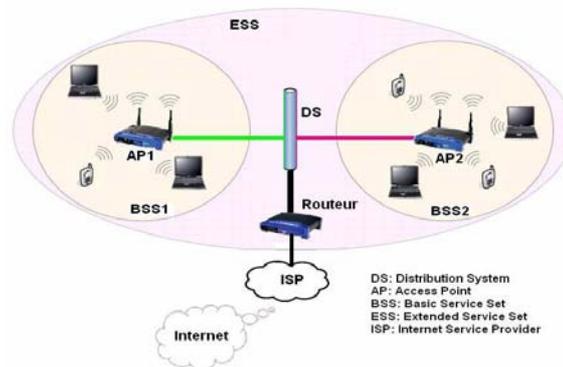


Figure 7. Mode Infrastructure du WIFI

1.3.2 IEEE 802.11e

IEEE 802.11e [32] est une version améliorée de l'IEEE 802.11 introduisant la QoS au niveau de la couche MAC pour le transport des trafics de type voix, audio et vidéo à travers le réseau WLAN.

Avec l'IEEE 802.11 [33], [34], la fonction de coordination distribuée (DCF Distributed Coordination Function) qui est une variante améliorée de la méthode d'accès CSMA/CA et qui permet d'éviter les collisions durant la transmission par le ralentissement aléatoire après chaque trame (backoff), présente quelques problèmes : elle ne prend en charge que le service Best-Effort, elle ne garantit pas le délai et la gigue, elle dégrade le débit quand la charge est grande.

Avec l'IEEE 802.11, la fonction PCF (Point Coordination Function) permettant l'accès au medium sans fil sans contrainte, présente également quelques problèmes: le schéma de Polling central est inefficace, un délai imprévisible du Beacon Frame due à la coopération incompatible entre les modes CP (Contention Period) et CFP (Contention Free Period), et enfin un temps de transmission des stations scrutées (Polled Stations) inconnue.

L'IEEE 802.11e définit plusieurs classes de service, et définit deux nouveaux mécanismes : EDCF (Enhanced DCF) qui définit différents paramètres pour différentes catégories de trafic et remplace DIFS (DCF Inter Frame Space) par AIFS (Arbitration IFS) (AIFS>DIFS), sachant que AIFS est plus court pour les trafics audio et vidéo.

Le deuxième mécanisme est le HCF (Hybrid CF) qui fournit le Policing, détermine l'accès au canal en contrôlant le canal à travers le HC (Hybrid Coordinator) et fonctionne avec les modes CFP et CP.

1.3.3 Comparaison entre 802.11e et 802.16e

Le tableau ci-dessous présente une comparaison entre IEEE 802.16e et IEEE 802.11e [35], [36].

	IEEE 802.11e	IEEE 802.16e
Déploiement	Courte couverture (locale)	Large couverture
Couverture	Jusqu'à 150 m à l'intérieur & Jusqu'à 500 m à l'extérieur	Jusqu'à 3.5 Km dans une zone urbaine (NLOS)
	Plus la distance augmente plus le débit diminue	
Bandes de fréquence	2.4 , 2.5 et 5 GHz	Entre 2 et 6 GHz (NLOS)
Débit (théorique)	Jusqu'à 54 Mb/s	Jusqu'à 30 Mb/s
	Dépend de la vitesse du mobile et la distance par rapport au BS/AP	
Type de mobilité supporté	Basse Mobilité	Basse, simple et pleine Mobilité
Réseau Cœur	IP	IP
Modulation	OFDM	Scalable OFDMA
Spectre	License-exempt	Licensed & License-exempt
Certification	WIFI alliance	WIMAX forum
Classes de service QoS		
	Voice Video Controlled load Excellent effort Best effort Background	UGS rt-PS nrt-PS BE
Mapping entre classes de QoS		
“VoIP”	Voice	UGS
“Video Conference”	Video	UGS
“Streaming”	Voice / Video	UGS
“Instant message, E-commerce & On-line Game”	Best effort / Video	rt-PS / nrt-PS
“Web Browsing”	Best effort	nrt-PS
“E-mail & File Transfer”	Background	BE

Tableau 2. Comparaison entre 802.16e et 802.11e

1.3.4 Conclusion

Le WIFI est un standard très à la mode actuellement, sa version 802.11e vient ajouter une certaine QoS pour les utilisateurs. Les inconvénients majeurs de cette technologie sont la courte portée, et le non prise en charge des utilisateurs mobiles. Une version plus évoluée du WIFI (IEEE 802.11s) est proposée récemment pour résoudre ces problèmes en proposant le mode MESH (Ad-Hoc), où les stations mobiles peuvent jouer eux-mêmes le rôle d'un point d'accès pour permettre plus de couverture aux utilisateurs. Elle prend en charge aussi une certaine mobilité des utilisateurs (faible ou moyenne vitesse).

1.4 Réseau 3G

1.4.1 L'UMTS

L'UMTS [37], [38] (Universal Mobile Telecommunication System) est un système de communication sans fil mobile exploitant une large bande passante, et utilisant un protocole de transfert de données en mode paquet, ce qui lui permet de prendre en charge beaucoup de services multimédias. UMTS est une amélioration des standards GSM et GPRS. Il définit l'UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) et l'UE (User Equipment). L'UE communique avec l'UTRAN via la technologie radio WCDMA. L'UMTS est composé d'entités logiques assurant chacune des fonctions spécifiques, ces entités sont groupées dans l'UTRAN qui est chargé des fonctions radio.

L'UE est composé du ME (Mobile Equipment) qui est le terminal radio employé pour la communication radio dans l'interface air WCDMA, et de l'USIM (UMTS Subscriber Identity Module) qui est la carte à puce qui conserve l'identité de l'abonné, exécute les algorithmes d'authentification, et stocke des informations requises par le terminal.

L'UTRAN introduit le NodeB et le RNC (Radio Network Controller). Il est formé d'un ou plusieurs RNS (Radio Network Systems), et chaque RNS est contrôlé par un RNC. Le RNC est connecté à un ou plusieurs NodeB, et chaque NodeB couvre une cellule.

Le NodeB convertit les signaux de l'interface radio en flux de données, et les transmet à RNC. Dans le sens contraire, le NodeB prépare les données parvenues de RNC pour les transporter dans l'interface radio.

Le RNC est le nœud central de l'UTRAN, il contrôle un ou plusieurs NodeB, et il est responsable du contrôle des ressources radio dans son domaine.

Le CN (Core Network), déjà défini pour les systèmes GSM et GPRS, est composé du PS (Packet Switching Network), CS (Circuit Switching Network) et HLR (Home location Register).

Le réseau PS est composé du SGSN (Serving GPRS Support Node) qui est responsable du routage des paquets, l'authentification, et l'encryptage pour les utilisateurs du réseau PS. Le GGSN (Gateway GPRS Support Node) est utilisé comme passerelle vers les réseaux externes fondés sur la commutation des paquets comme l'Internet...

Le réseau CS est composé du MSC/VLR (Mobile Service Switching / Visitor Location Register) qui joue le rôle d'un commutateur et une base de données de stockage. Le MSC est responsable de la signalisation. Le VLR est contrôlé par le MSC et employé dans le cas du Roaming des utilisateurs. Le CS est également composé du GMSC (Gateway MSC) qui est similaire au GGSN et sert de passerelle vers les réseaux externes reposant sur la commutation des circuits comme PSTN... Le CS comprend aussi le HLR (Home Location Register) qui est une base de données localisée dans le système géré par l'opérateur principal de l'utilisateur (user home system) ; le HLR conserve toutes les informations sur l'utilisateur. Il est composé aussi de l'AuC (Authentication Center) qui stocke les données (clés) permettant aux abonnés de s'authentifier avec confidentialité. Et finalement le CS est composé de l'EIR (Equipment Identity Register) qui est une base de données contenant les caractéristiques des mobiles.

L'architecture de l'UMTS est illustrée ci-dessous :

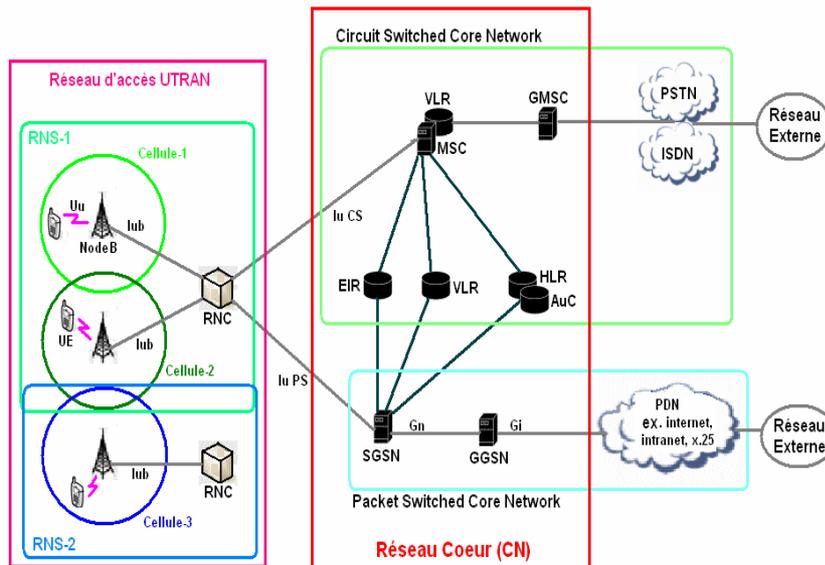


Figure 8. Architecture de l'UMTS

1.4.2 Comparaison entre UMTS et IEEE 802.16e

Le tableau ci-dessous présente une comparaison entre IEEE 802.16e et UMTS [39].

	UMTS	IEEE 802.16e
Déploiement	Large couverture	Large couverture
Couverture typique	Entre 1.5 et 7 km Pico-cellules: jusqu'à 50m Micro-cellules: jusqu'à 500m Macro-cellules: jusqu'à 7 km	Entre 1.5 et 5 km Jusqu'à 3.5 Km en zone dense (NLOS) et jusqu'à 15 km en zone rurale
	plus la distance augmente plus le débit diminue	
Bandes de fréquence	Environ 2 GHz (entre 1.8 et 2.1)	Entre 2 et 6 GHz
Débit (théorique)	Jusqu'à 2 Mb/s (et jusqu'à 10 Mb/s avec la technologie HSDPA)	Jusqu'à 15 Mb/s (voir plus)
	Dépend de la vitesse du mobile et la distance par rapport au NodeB/BS	
Type de mobilité supportée	Basse, simple et pleine Mobilité	Basse, simple et pleine Mobilité
Services supportés	Commutation de paquets et commutation de circuits	Commutation de paquets (basé sur IP)
Modulation	WCDMA	Scalable OFDMA
Mapping des classes de service QoS		
Ex: Voix	Conversation: Préserve le temps de relation (variation) entre entités d'information du Stream	Unsolicited Grant Service (UGS): pour transmettre les flux temps réel avec une taille fixe et des intervalles réguliers
Ex: Streaming Video	Streaming: flux continu	Real Time Variable Rate (Rt-PS): pour transmettre des flux temps réel avec tailles variables et intervalles régulier
Ex: Web Browsing	Interactive: Services avec un minimum d'erreurs et tolère les délais	No Real Time Polling Services (nrt-PS): pour transmettre des flux qui tolèrent les délais
Ex: E-mail	Background: Pas de contrainte de temps	Best Effort (BE): service sans aucune garantie

Tableau 3. Comparaison entre 802.16e et UMTS

1.4.3 Conclusion

L'UMTS est une technologie qualifiée de 3G et proposée par le 3GPP. Elle offre un certain niveau de QoS acceptable à un nombre limité d'utilisateurs. Cette technologie n'a pas connu le vrai succès que GSM ou encore GPRS ont connu, mais elle a été quand même déployée dans plusieurs zones.

1.5 Réseaux satellitaires

1.5.1 DVB-S

La communication par satellite est le seul moyen capable de fournir une large bande passante exactement où et quand elle est nécessaire, indépendamment de la géographie et de l'infrastructure locale.

Le DVB-S [40] (Digital Video Broadcast via Satellite) est un standard européen conçu pour la diffusion d'images et de sons numériques, et aussi que tout autre type d'informations numériques via un satellite géostationnaire. Il repose sur le standard MPEG2-TS (Moving Picture Experts Groupe 2 Transport Stream) [41] pour la compression et le codage des informations, la modulation du signal, le multiplexage des signaux audio et vidéo, et la synchronisation des informations.

Le DVB-S définit le mode de transmission du trafic multimédia par un lien unidirectionnel via le satellite vers les terminaux équipés avec des cartes DVB-S. Les données autres que les flux vidéo sont pris en charge. Il utilise la modulation QPSK et offre un débit de 40 Mb/s.

DVB-S propose une seule pile protocolaire pour le trafic vidéo de type MPEG2-TS avec une taille fixe de 188 Octets. Pour les autres types de trafics tel que IP, le standard propose d'encapsuler les paquets de données dans le protocole MPE (Multiple Protocol Encapsulation), et de les fragmenter ensuite par MPE en paquets MPEG2-TS prêts à être envoyés par la couche DVB.

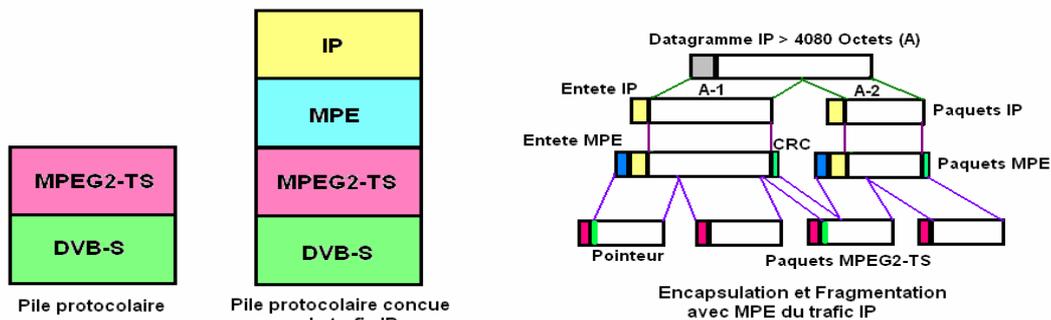


Figure 9. Piles protocolaires de DVB-S et mécanismes de fragmentation et d'encapsulation

Le système DVB-S est composé de trois segments distincts : le segment de l'opérateur composé du réseau cœur terrestre qui transmet différents flux vers une passerelle (Gateway) qui est la station centrale chargée d'envoyer vers le satellite les flux reçus par le réseau cœur, et composé aussi du NCC (Network Control Center) et du NMMC (Network and Mission Management Center) qui sont des entités de gestion du système (ils s'occupent de l'accès au système ainsi que de la signalisation) et qui peuvent être intégrés dans la passerelle.

Le segment spatial est composé d'un ou plusieurs satellites chargés de la diffusion du trafic reçu par la passerelle vers les utilisateurs. Le segment de l'utilisateur quant à lui, est composé des terminaux de réception (VSAT) situés dans la zone de collecte des flux diffusés par le satellite, et qui captent les signaux et les traitent pour les transformer en programmes de télévision pour l'utilisateur.

1.5.2 DVB-S et DVB-RCS

La norme DVB-RCS [42] (Digital Video Broadcast Return Channel via Satellite) définit un canal de retour à partir des utilisateurs vers le satellite. Couplé avec DVB-S ils offrent ensemble un système satellitaire bidirectionnel.

Le DVB-RCS propose un lien de retour avec un débit pouvant atteindre 2 Mb/s en utilisant la technique MF-TDMA (Multiple Frequency Time Division Multiple Access).

Contrairement au DVB-S, le DVB-RCS n'est pas fondé sur la délivrance de flux constants, mais sur la délivrance de Bursts utilisant un découpage temporel et fréquentiel (MF-TDMA). DVB-RCS offre deux méthodes d'encapsulation : une méthode utilisant les cellules ATM, et une autre fondée sur les paquets MPEG2-TS.

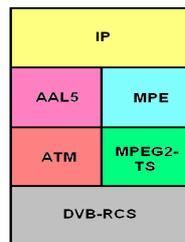


Figure 10. Piles protocolaires du DVB-RCS

L'architecture de l'union des systèmes DVB-S et DVB-RCS est illustrée ci-dessous :

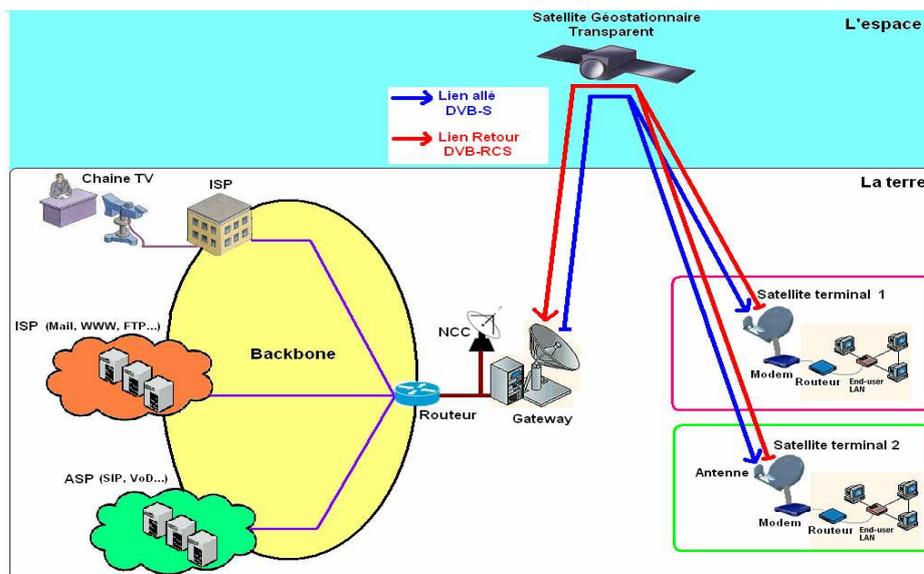


Figure 11. Architecture DVB-S/DVB-RCS

Un tableau comparatif ci-dessous présente quelques différences entre DVB-S et DVB-RCS :

	Canal allé (à partir de la passerelle)	Canal retour (à partir du terminal satellite)
Interface Air	MPEG2/DVB-S	DVB-RCS
Schéma d'accès multiple	TDM	MF-TDMA
Débit	Jusqu'à 45 Mb/s	Entre 144 kb/s et 2 Mb/s
Modulation	QPSK	QPSK
Codage	Concatenated convolution & Reed-Solomon	Turbo codes, Concatenated convolution & Reed-Solomon
Format des données	IP over MPEG	IP over ATM ou MPEG

Tableau 4. Comparaison entre DVB-S et DVB-RCS

1.5.3 DVB-S2

DVB-S2 [43], [44] est la plus récente norme de communication spatiale par satellite de la famille DVB. Elle a comme objectif d'améliorer la capacité de transmission de la vidéo par satellite. Pour cela elle propose d'utiliser les codes BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem) et LDPC (vérification de parité à faible densité) pour le codage canal. Elle définit aussi quatre modes de modulation : QPSK, 8PSK, 16APSK et 32APSK.

La norme est plus extensible à prendre en charge plusieurs types de trafics comme l'IP contrairement à l'ancienne norme DVB-S qui est dédiée au trafic de type MPEG2.

Le seul inconvénient de cette norme est toujours le même problème que rencontre toute nouvelle technologie : l'installation des nouveaux composants sachant que le DVB-S2 n'est pas compatible avec le premier.

Enfin, DVB-S2 propose la norme nouvelle norme de codage vidéo : H264/AVC [45] au lieu de MPEG2-TS dans le cas du DVB-S pour une QoS meilleure. Sachant que la norme H264/AVC vise à améliorer le gain en efficacité de codage d'un rapport au moins égal à 2 par rapport aux standards existants (MPEG-2, H.263 et MPEG-4 Part 2), et vise à créer une interface simple pour pouvoir adapter le Codec aux différents protocoles de transmission (commutation de paquets et de circuits).

1.5.4 IPoS

IPoS [46], [47] (IP over Satellite) est un standard qui a été développé par le groupe TR 34.1.7 de TIA (Telecommunications Industry Association). Il repose sur le système HNS'DIRECWAY, spécifiant des techniques pour le transport des paquets de type IP entre un terminal Hub central et les terminaux distants en utilisant le satellite géostationnaire.

IPoS opère dans la bande Ku, mais il peut s'étendre pour couvrir d'autres bandes de fréquences.

IPoS spécifie un point d'accès de service satellite indépendant (SI-SAP) qui crée une interface bien définie entre les fonctions dépendant du satellite et les couches d'applications, permettant ainsi l'activation d'une plate-forme de service ouverte.

La pile protocolaire proposée pour l'IPoS ainsi que la description des couches protocolaires sont présentés ci-dessous [46] :

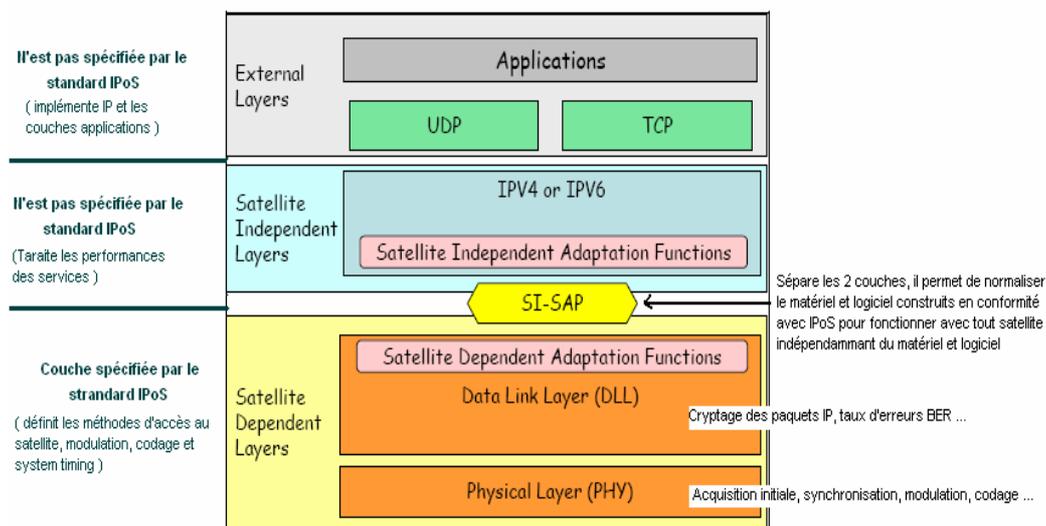


Figure 12. Pile protocolaire de IPoS

L'architecture de l'IPoS est divisée en trois segments :

- Segment Hub : il supporte l'accès Internet ou Intranet pour un grand nombre de terminaux à distance via le satellite. Il est composé d'un grand Hub terrestre et ses équipements relatifs à la transmission des flux de données vers le satellite.
- Segment spatial : il consiste au satellite géostationnaire qui permet la transmission dans les deux directions entre le Hub et les terminaux.
- Segment des terminaux à distance : il contient les terminaux des utilisateurs, usuellement composé de deux parties : Unité extérieure (Outdoor Unit ODU) et Unité intérieure (Indoor Unit IDU).

L'architecture de l'IPoS est composée aussi de trois interfaces :

- L'interface utilisateur : elle est située entre le terminal et l'équipement de l'utilisateur, c'est généralement l'interface LAN.
- L'interface IPoS : elle est entre le satellite et le Hub, et entre le satellite et les terminaux. Elle spécifie la transmission dans les deux directions : à partir du Hub vers les terminaux, et à partir des terminaux vers le Hub.
- L'interface terrestre du Hub : entre le Hub et les réseaux extérieurs à commutation de paquets.

1.5.5 Conclusion

La communication par satellite est une très bonne solution pour offrir une très large couverture de rayon de centaines de kilomètres pour les utilisateurs. L'inconvénient majeur de ce mode de communication est la grande latence qui n'est pas tolérée par certains types de trafic temps-réel. Cette latence est due à la large distance entre une passerelle terrestre, un terminal et le satellite situé dans l'espace et jouant le rôle d'intermédiaire entre les deux. Un autre inconvénient est que jusqu'à présent, le mode de communication par satellite n'offre pas une liaison vraiment adaptée au trafic IP très utilisé dans le monde actuellement.

2. Protocoles de mobilité

2.1 Handover

Le Handover ou le transfert intercellulaire est l'ensemble des fonctions et des opérations mises en œuvre entre une ou plusieurs stations de service et une station mobile, pour permettre à cette dernière de changer de cellule et de bénéficier des services d'une autre cellule au lieu de l'ancienne. La station mobile aura la possibilité de continuer sa communication en cours avec un minimum d'interruption, sachant que les deux cellules impliquées sont gérées par un ou plusieurs réseaux.

Le Handover intervient dans trois cas :

- Une station mobile en mouvement passe d'une cellule à une autre.
- Une indisponibilité signalée par la station de service, soit parce qu'elle est tombée en panne, ou qu'elle est trop chargée par d'autres mobiles en communication, ou bien encore que le signal d'une autre station de service devient meilleur que le sien. Dans l'un de ces cas, s'il existe d'autres stations de service voisines disponibles, le Handover sera établi.
- Beaucoup d'interférences entre les stations mobiles dans une même cellule. Dans ce cas un mobile décide de changer de cellule pour subir moins d'interférences.

Les types de Handover sont :

- Handover horizontal : entre deux cellules gérées par la même technologie (par exemple entre deux cellules WiMAX), il est divisé à son tour en deux types:

* Handover intra-domaine : entre deux cellules du même domaine réseau (par exemple entre deux cellules WiMAX couvertes par deux stations de base gérées par la même passerelle ASN-GW).

* Handover inter-domaine : entre deux cellules de domaines différents mais de la même technologie (par exemple entre deux cellules WiMAX couvertes par deux stations de base gérées par deux passerelles ASN-GW différentes).

- Handover diagonal : entre deux cellules gérées par deux technologies proposées par le même organisme (par exemple entre IEEE 802.11 et IEEE 802.16 ou encore entre 3GPP-UMTS et 3GPP-HSDPA).

- Handover vertical : entre deux cellules gérées par différentes technologies (par exemple entre WiMAX et UMTS).

2.2 Micro-Mobilité en utilisant des Protocoles de Niveau 2

2.2.1 Introduction

Les protocoles de mobilité interviennent généralement au cours du Handover.

Il existe plusieurs niveaux de mobilité faisant référence au modèle OSI. Le niveau de mobilité le plus bas, est le niveau 2 qui correspond à la couche liaison du modèle OSI. Ce niveau de mobilité est connu sous le nom Micro Mobilité. Par définition, la Micro Mobilité concerne le déplacement d'une station mobile entre deux points d'attachement situés sur le même réseau sans changement de son adresse IP courante.

Dans le WiMAX mobile, on parle de Micro Mobilité lorsqu'une station mobile effectue un transfert intercellulaire entre deux cellules gérées par la même passerelle (ASN-GW). Dans ce cas la station mobile ne change pas d'adresse IP et garde toujours son ancienne adresse.

Dans la suite nous allons présenter des mécanismes de Handover de niveau 2 utilisés par le standard IEEE 802.16e : Hard Handover et Soft Handover (MDHO et FBSS) [13], [48], [49], [50].

2.2.2 Hard Handover IEEE 802.16e

Le mécanisme du Hard Handover est appliqué généralement dans le cas d'une mobilité relativement lente ou moyenne. Durant le Handover, ce mécanisme oblige la station mobile à interrompre la connexion avec l'ancienne station de base avant d'établir la connexion avec la nouvelle station de base (mécanisme Break-Before-Make). Dans ce cas, le mobile ne peut communiquer qu'avec une seule station de base au cours d'une communication.

Ce mécanisme est bénéfique du point de vue de l'allocation des ressources, mais en cas d'échange du trafic temps-réel de volume important, ou dans le cas du déplacement du mobile avec une vitesse importante, ce mécanisme provoque une interruption de service au cours du Handover, ce qui n'est pas bon pour du trafic temps-réel.

Le fonctionnement du mécanisme Hard Handover est illustré dans la figure ci-dessous [13] :

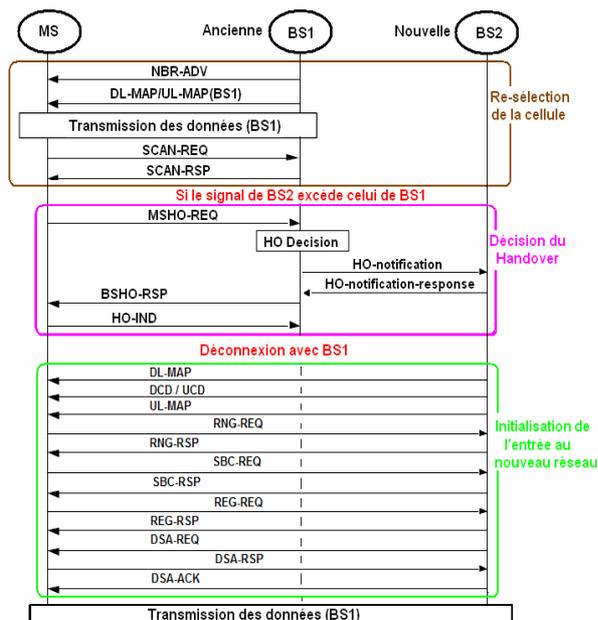


Figure 13. Fonctionnement du Hard Handover

Au début, la MS échange ses données avec la BS1 (ancienne BS), et en même temps elle scrute le réseau pour la détection des nouveaux signaux des BSs voisines. Quand elle détecte un signal d'une BS supérieur à celui de son ancienne BS, la MS passe à la procédure de la décision du Handover : elle informe son ancienne BS de sa décision, et cette dernière contacte la BS cible pour lui transmettre la demande de la MS. Si tout se passe bien, la BS cible va accepter la demande, ensuite la BS1 enverra une notification d'acceptation à la MS. La MS commencera alors la procédure de Handover en alertant l'ancienne BS. La MS va interrompre la connexion avec la BS1, et commencer une procédure d'échange des messages avec BS2 pour se connecter définitivement à cette dernière, et échanger ses données avec elle.

La description des messages illustrés dans la figure 13 est présentée ci-dessous [13] :

- * NBR-ADV : message d'avertissement des voisins.
- * DL-MAP / UL-MAP : messages de contrôle des liens montants et descendants.
- * SCAN-REQ / SCAN-RSP : requêtes et réponses du Scan des intervalles d'allocation.
- * MSHO-REQ : requête de demande de Handover par le mobile.
- * BSHO-RSP : réponse sur la requête de demande Handover par la BS.
- * HO-IND : message d'indication de Handover.
- * DCD / UCD : messages de contrôle sur la description du canal en liens montant/descendant.
- * RNG-REQ / RNG-RSP : requête et réponse sur la portée.
- * SBC-REQ / SBC-RSP : requête et réponse sur la capacité de base du mobile.
- * REG-REQ / REG-RSP : requête et réponse sur l'enregistrement du mobile.
- * DSA-REQ / DSA-RSP / DSA-ACK : requête, réponse et acquittement sur l'addition du service dynamique.

2.2.3 Soft Handover IEEE 802.16e

Le Soft Handover est appliqué dans le cas d'une mobilité importante. Il propose deux techniques : le MDHO et le FBSS.

2.2.3.1 MDHO

Durant le Handover, le MDHO (Macro Diversity Handover) permet à la MS de se connecter aux stations de base voisines appartenant à une liste de BSs (Diversity Set) maintenue par la MS avant d'interrompre la connexion avec l'ancienne station de base

(mécanisme Make-Before-Break). Dans ce cas le mobile communique avec plusieurs stations de base en même temps.

Contrairement au Hard Handover, ce mécanisme utilise beaucoup de ressources radio vu qu'il se connecte à plusieurs BSs en même temps, mais il permet d'éviter l'interruption du service au cours du Handover.

Une illustration du mécanisme MDHO est présentée dans la figure ci-dessous [13] :

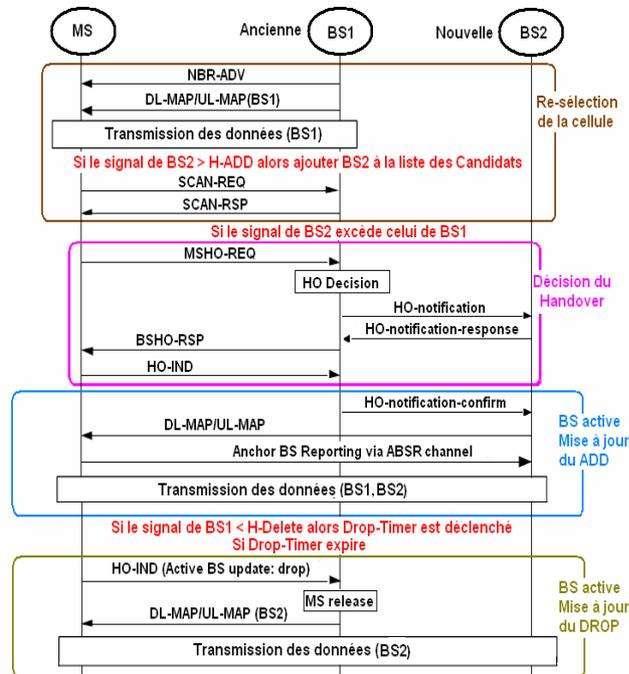


Figure 14. Fonctionnement du MDHO

Au début, comme avec le mécanisme Hard Handover, la MS communique ses données avec la BS1, et scrute en même temps le réseau à la recherche de nouveaux signaux. La différence à ce stade avec le Hard Handover, est que quand la MS détecte un signal de BS supérieur à un seuil déjà fixé (H-Add), elle ajoute cette BS à la liste des BSs candidats (Diversity Set). Ensuite, quand elle détecte un signal d'une BS qui est déjà dans sa liste de candidates avec une puissance supérieure à celle de son ancienne BS, elle décide de faire le Handover avec la nouvelle (BS2). L'accord sera accompli comme en Hard Handover, sauf que quand la MS recevra une notification de l'acceptation du Handover par la BS2, elle ne se déconnectera pas de l'ancienne BS. La MS poursuivra donc sa connexion avec la BS1, et se connectera aussi avec la BS2. Elle communiquera alors ses données avec les deux BSs en même temps. Par la suite, si le signal d'une BS avec laquelle elle est connectée devient inférieur à un autre seuil fixé (H-Delete) ; une temporisation sera déclenchée (Drop-Timer). Si elle expire et que le signal de la BS reste inférieur au seuil, la MS se déconnectera de cette BS, et poursuivra sa communication avec l'autre BS.

2.2.3.2 FBSS

Le FBSS (Fast Base Station Switching) est très proche du MDHO dans son principe (Make-Before-Break). Il ajoute une technique qui se résume dans le fait que le mobile peut choisir parmi les BSs avec lesquelles il est connecté une seule qui sera appelée BS ancre (Anchor BS). Il va échanger avec cette BS ancre tous ses données ainsi que les messages de signalisation. La MS aura le droit de changer de BS ancre quand elle le voudra, à condition qu'elle choisisse une nouvelle BS ancre parmi la liste des BSs appartenant à son Diversity Set

avec lesquelles elle est connectée. Généralement, la MS change de BS ancre quand cette dernière n'est plus disponible en nombre de connexions ou en ressources, ou bien encore quand le signal d'une autre BS candidate deviendra meilleur que celui de sa BS Ancre courante. Le mécanisme de FBSS est illustré ci-dessous :

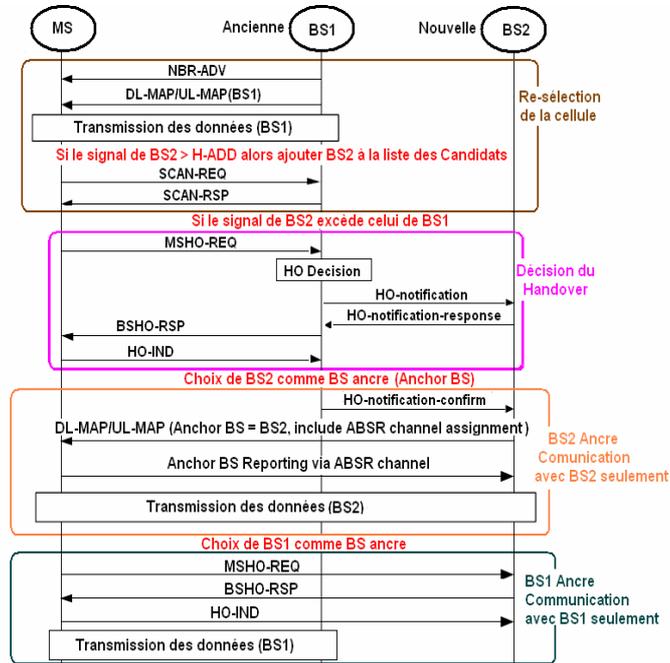


Figure 15. Fonctionnement du FBSS

Jusqu'à l'étape où la MS se connecte avec la nouvelle BS, le déroulement est identique à celui du MDHO. Ensuite, la MS choisit par exemple la nouvelle BS (BS2) comme BS ancre et échange ses données avec elle seule, tout en restant connectée avec l'ancienne BS (BS1) mais sans échange de données avec cette dernière. Si par exemple après un certains temps, la MS se re-déplace dans la direction de l'ancienne BS, et que le signal de cette dernière redevient meilleur que celui de la nouvelle BS, la MS peut re-choisir l'ancienne BS comme BS ancre. La procédure de déconnexion est semblable à celle de MDHO.

2.2.4 Conclusion

En général, le Handover de niveau 2 s'applique dans le cas où la station mobile change de services de la station émettrice (BS dans le cas de WiMAX) qui gère sa cellule courante à une autre qui gère une deuxième cellule chevauchée avec la première. La condition nécessaire au cours du Handover de niveau 2 est que les deux stations émettrices sont gérées par une même passerelle qui les lie avec le réseau cœur IP. Et dans ce cas on dit que les stations émettrices appartiennent au même domaine, sachant que la station mobile ne nécessite pas une mise à jour de son adresse IP courante.

Le Hard Handover est un protocole de niveau 2 très connu et très employé par les opérateurs. Son seul inconvénient c'est qu'il oblige la station mobile de rompre la connexion avec l'ancienne station émettrice avant de se connecter avec la nouvelle, et cela génère un délai important et des pertes de paquets qui ne sont pas acceptables par le trafic temps-réel.

Son grand avantage est qu'il n'est pas du tout gourmand en ressource vu que la station mobile n'a le droit de se connecter qu'avec une seule station émettrice à la fois.

Le Soft Handover, peu employé par les opérateurs vu qu'il consomme beaucoup de ressources, surtout avec le protocole MDHO qui autorise à la station mobile de communiquer avec toutes les stations émettrices au même temps. Le grand avantage du Soft Handover c'est

la continuité de la communication sans interruption au cours du Handover de niveau 2 par un utilisateur, ce qui permet de répondre aux exigences de trafics temps-réel. Mais l'utilisation du Soft Handover doit être soumise à des conditions de disponibilité des ressources...

Le FBSS qui est plus récent que le MDHO, utilise moins de ressources que le MDHO, et cela grâce à la technique qu'il emploie, et qui permet de communiquer avec une seule station émettrice élue tout en restant connecté avec les stations émettrices voisines.

En général le FBSS est très efficace dans le cas de mobilité à grande vitesse avec échange de trafic temps-réel sensible au délai.

2.3 Macro-Mobilité en utilisant des Protocoles de Niveau 3

2.3.1 Introduction

La mobilité de niveau réseau est connue également sous le nom Macro-Mobilité. Il s'agit de gérer le déplacement d'un utilisateur mobile entre deux domaines différents. Ce déplacement nécessitera 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.

La station mobile effectue dans ce cas un transfert intercellulaire entre deux cellules gérées par différentes passerelles. Par exemple dans le cas de l'IEEE 802.16e, le mobile passe entre deux cellules couvertes par deux stations de base gérées chacune par un ASN-GW différent. Dans ce cas, la station mobile doit mettre à jour son adresse IP courante pour s'adapter avec le nouveau réseau qui gère la deuxième cellule.

2.3.2 Mobile IPv4

Le protocole Mobile IPv4 [51], aussi nommé Client Mobile IP (CMIP) et proposé par un groupe de travail de l'IETF, vient ajouter des nouvelles extensions au protocole IP pour permettre la mobilité. Ce protocole est déjà fort ancien, et il n'a pas connu de succès en raison des délais induits. Il permet à l'utilisateur de s'enregistrer dans un réseau étranger, et de se connecter par le biais de son réseau mère via une combinaison de FA (Foreign Agent) et de HA (Home Agent).

Le principe de fonctionnement de MIP est décrit ci-dessous :

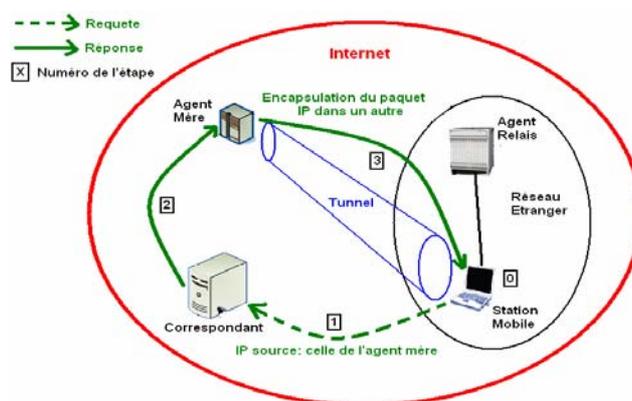


Figure 16. Fonctionnement de MIPv4

- 0) Quand une station mobile se déplace dans un réseau autre que son réseau mère, un routeur du réseau visité (FA) peut agir en tant qu'agent relais. Il diffuse périodiquement des paquets dans le réseau pour détecter les nouveaux venus. Il détecte alors l'arrivée de la nouvelle station mobile et l'ajoute au réseau étranger en lui attribuant une nouvelle

adresse IP temporaire (cette méthode nécessite une réserve d'adresses pour la gestion des mobiles).

- 1) Ensuite, quand le mobile décide de communiquer avec un correspondant depuis le nouveau réseau, il envoie une requête vers son correspondant grâce à sa nouvelle adresse IP. L'adresse source du paquet IP envoyé ne correspond pas à l'adresse IP courante du mobile, mais elle correspond à l'adresse de son agent mère (HA) du réseau de rattachement.
- 2) Le correspondant renverra sa réponse vers l'agent mère du réseau de rattachement.
- 3) L'agent mère crée alors un tunnel avec le mobile et envoie directement le paquet vers ce dernier.

2.3.3 Proxy Mobile IPv4

PMIP (Proxy Mobile IP) [52] est une version améliorée de CMIP ou MIP.

Les raisons pour lesquelles PMIP a été proposé sont les suivantes :

- Le protocole MIP est embarqué dans la station mobile, ce qui provoque plus de complexité au niveau de cette dernière.
- MIP est incompatible avec IP-sec sur lequel reposent les passerelles VPN (Virtual Private Network) et les passerelles NAT (Network Address Translator). Comme la station mobile est parfois obligée de passer par ces deux dernières composantes du réseau, il est primordial de corriger ce défaut.

Pour résoudre ces problèmes, le protocole PMIP a été proposé. Il introduit une entité fonctionnelle appelée Proxy MIP pour aider MIP à traverser les passerelles VPN et NAT et pour diminuer la complexité au niveau de la station mobile. Le Proxy est installé entre la station mobile et son correspondant HA et joue le rôle d'intermédiaire entre les deux.

PMIP ne nécessite pas un changement d'adresse au niveau du point d'attache quand le mobile se déplace, et le mobile n'est pas obligé d'implanter le protocole MIP.

Le fonctionnement de PMIP est présenté ci-dessous :

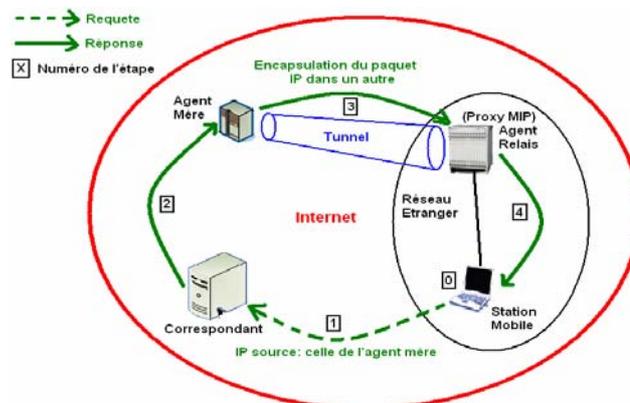


Figure 17. Fonctionnement de PMIPv4

Positionnons nous après l'étape 2) présentée avec MIP (section précédente). Avec PMIP, à l'étape 3) le HA crée un tunnel avec l'agent relais (FA) qui est en même temps un Proxy MIP (et pas directement avec la station mobile comme avec MIP) et lui envoie les paquets. A la fin à l'étape 4), le Proxy délivre les paquets vers la station mobile.

2.3.4 Mobile IPv6

Actuellement, la mobilité utilisant le protocole IPv4 avec les mécanismes MIPv4 et PMIPv4 souffre d'un problème important qui consiste à l'échange triangulaire au cours d'une

communication. Cette méthode oblige les paquets de passer par l'agent mère de l'utilisateur avant d'arriver au correspondant, ce qui augmente forcément le délai.

MIPv6 [53] a été proposé pour résoudre ce problème grâce à un système de correspondance d'adresses qui permet à l'agent mère de l'utilisateur en mobilité d'envoyer sa nouvelle adresse à son correspondant. Et son correspondant pourra le contacter directement grâce à cette adresse via un tunnel qu'il créera pour cela.

2.3.5 Conclusion

Le Handover de niveau 3 ou plus est relatif à la phase de changement de services d'une station émettrice (BS dans le cas de WiMAX) à une autre voisine par une station mobile. Deux cas sont possibles dans ce type de Handover : le premier est que les deux stations émettrices appartiennent au même réseau, mais chacune d'elles est gérée par une passerelle appart qui fait le lien avec le réseau cœur IP, donc on dit que les stations émettrices appartiennent à des domaines différents. Le deuxième cas est que chacune des deux stations émettrices appartient à un réseau différent carrément.

Dans les deux cas, une mise à jour de l'adresse IP courante de la station mobile est nécessaire. Le protocole MIP est l'un des plus anciens protocoles de mobilité de niveau 3, il permet à la station mobile après son Handover, de continuer sa communication avec son correspondant suivant une route triangulaire qui intègre l'agent mère de son réseau d'attachement. Ce mode de communication génère des délais très lourds et pas du tout acceptables par le trafic temps-réel. De plus, l'embarquement de ce protocole au niveau de la station mobile présente beaucoup de complexités de fonctionnement.

Le protocole PMIP, est une amélioration de MIP qui ajoute la composante Proxy entre un agent mère et la station mobile pour simplifier la complexité au niveau de l'utilisateur, en embarquant le protocole PMIP au niveau du Proxy.

Certes ce protocole est meilleur que MIP en performance, mais le délai qu'il génère au cours du Handover ne permet pas vraiment de dire qu'il est bon pour le trafic temps-réel.

Le protocole MIPv6 propose des options supplémentaires par rapport à MIP et PMIP pour éviter l'échange triangulaire avec l'agent mère, ce qui diminue considérablement le délai au cours du Handover. Le seul inconvénient de ce protocole c'est qu'il s'appuie sur l'IPv6 qui n'est pas encore déployé en grande échelle.

2.4 Macro-Mobilité en utilisant des Protocoles de Niveau 3+

2.4.1 HIP

IP pose de plus en plus de problèmes avec les nouveaux besoins de mobilité et de Multihoming (machine pouvant disposer de plusieurs adresses IP).

Le protocole HIP (Host Identity Protocol) [54], [55], [56], [57] est une solution récente proposée par l'IETF pour résoudre un certain nombre de problèmes rencontrés avec Internet. Il propose une nouvelle architecture qui sépare l'identité d'une machine en proposant un nouveau type d'identification : Host Identifier (HI), et le localisateur qui est l'adresse IP de la machine.

En se référant au modèle OSI, HIP nécessite une nouvelle couche de niveau 3.5 intercalée entre la couche réseau et la couche transport.

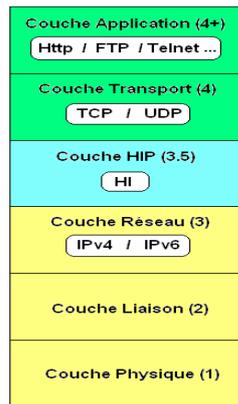


Figure 18. HIP dans le modèle OSI

Avec le protocole HIP, un système est identifié avec un HI unique. Au cours d'un échange de paquets entre deux systèmes, le HI sera crypté avec une fonction de hachage pour devenir un HIT (Host Identity Tag), et ce HIT servira à identifier les paquets échangés par les deux systèmes. Et dans ce cas, les adresses IP n'interviendront que pour le routage des paquets, ainsi, les nœuds HIP peuvent être mobiles et multi-domicilés. Pour l'échange d'identités de manière sécurisée entre deux nœuds HIP, ce dernier utilise le protocole IPsec.

2.4.2 MSCTP

2.4.2.1 Introduction

La mobilité de niveau transport est proposée comme un concurrent de la mobilité de niveau réseau pour mieux supporter l'intégration des services. La gestion de la mobilité dans le niveau transport est prise en charge exclusivement par le protocole SCTP (Stream Control Transmission Protocol) [58] et son extension DAR (Dynamic Address Reconfiguration) [59]. SCTP étendu avec DAR constitue le protocole MSCTP (Mobile SCTP) [60], [61], [62]. MSCTP est proposé dans le but d'éviter les interruptions des services observées avec TCP et UDP pendant le changement de l'adresse IP par le mobile. C'est un protocole de niveau transport similaire à TCP (Transmission Control Protocol). Il fournit une communication point à point orientée connexion entre différentes applications se déroulant sur les différentes machines.

La différence majeure avec TCP est le Multi-homing. Il gère plusieurs adresses IP au niveau des terminaux en conservant la connexion point à point intacte.

Une petite analogie entre SCTP et TCP est présentée dans la figure 19 : nous remarquons dans cette figure qu'avec le protocole SCTP nous pourrions ouvrir plusieurs sessions IP entre deux nœuds communicants, et dans chaque session les communicants peuvent échanger un type de trafic. Par contre avec TCP, les deux nœuds ne peuvent ouvrir qu'une seule session IP ; et pourtant TCP et SCTP sont tous les deux des protocoles de niveau transport.

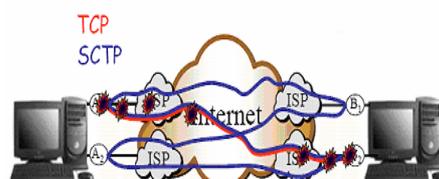


Figure 19. MSCTP vs TCP

2.4.2.2 *Fonctionnement*

Au début, dans son réseau mère, le terminal mobile implantant le protocole MSCTP, choisit une seule adresse IP comme adresse primaire utilisée pour l'échange des messages avec un correspondant. Les autres adresses IP que possède le mobile sont utilisées seulement pour les retransmissions.

L'extension DAR permet aux terminaux d'ajouter, de supprimer et de changer les adresses IP pendant une session SCTP entre les mobiles implantant les agents MSCTP, sans perturber l'établissement des connexions en utilisant les messages de configurations des adresses.

Durant une communication entre une MS et son correspondant localisé dans un réseau externe. Au cours du déplacement de la MS du réseau mère vers un réseau étranger, et en passant par la zone de Handover (dans le début de la zone de couverture du réseau étranger), le mobile reçoit une adresse IP du réseau étranger soit par le contact d'un serveur DHCP existant dans ce réseau, ou par la configuration automatique de l'adresse IPv4. Il poursuit sa communication avec son correspondant via son réseau mère.

La station mobile est maintenant capable d'établir la liaison avec son correspondant en utilisant sa deuxième adresse IP. Elle est devenue accessible depuis son réseau de rattachement et le réseau étranger dans lequel elle a eu sa deuxième adresse IP.

Ensuite, le mobile envoie à son correspondant via son réseau mère sa deuxième adresse IP pour l'informer de son existence. Le correspondant ajoute la nouvelle adresse IP à la liste des identifiants de la connexion avec la station mobile et répond avec un acquittement (le mobile poursuit sa communication avec son correspondant via son réseau mère).

Puis, quand le mobile commence à quitter la zone de couverture de son réseau domicile (à la fin de la zone de couverture du réseau domicile dans la zone du Handover où le service du réseau étranger devient meilleur que celui du réseau domicile), il notifie son correspondant d'assigner la nouvelle adresse IP (la deuxième) comme adresse IP primaire à la place de la première, ce que le correspondant l'approuve en répondant avec un acquittement, et la nouvelle adresse IP devient l'adresse de communication de base de la station mobile.

A partir de ce moment, le mobile et son correspondant échangent tous leurs messages à travers le réseau étranger et plus via le réseau domicile.

Et finalement, quand le mobile quitte définitivement la zone de couverture du réseau domicile vers la zone de couverture du réseau étranger (après la zone de Handover), il informe son correspondant de supprimer la première adresse IP de l'association ce que le correspondant confirme avec un acquittement. Il poursuit alors sa communication avec son correspondant à travers le réseau étranger.

2.4.3 *SIP*

SIP (Session Initiation Protocol) [63] est un protocole de signalisation de niveau application défini par l'IETF. Il permet l'établissement, la libération et la modification des sessions multimédias. Il s'appuie sur un modèle client/serveur et propose l'adressage URL SIP (Uniform Resource Locator) qui ressemble à une adresse E-mail. Donc un utilisateur du protocole SIP est joignable grâce sont URL SIP.

SIP a été étendu afin de prendre en charge de nombreux services tels que la présence, la messagerie instantanée (similaire au service SMS dans les réseaux mobiles), le transfert d'appel, la conférence, les services complémentaires de téléphonie, etc.

SIP a été retenu par le 3GPP pour l'architecture IMS (IP Multimedia Subsystem) comme protocole pour le contrôle de session et le contrôle de service. Il remplacera à terme les protocoles ISUP (utilisé pour le contrôle d'appel dans le Réseau Téléphonique Commuté) et INAP (utilisé pour le contrôle de service dans l'architecture Réseau Intelligent).

Le protocole SIP n'est qu'un protocole de signalisation. Une fois la session établie, les participants de la session s'échangent directement leur trafic audio/vidéo à travers le protocole RTP (Real-Time Transport Protocol).

Par ailleurs, SIP n'est pas un protocole de réservation de ressources, il ne peut donc pas assurer la QoS. Il s'agit d'un protocole de contrôle d'appel et non de contrôle du média.

SIP n'est pas non plus un protocole de transfert de fichier tel que FTP, utilisé afin de transporter de grands volumes de données. Il a été conçu pour transmettre des messages de signalisation courts afin d'établir, maintenir et libérer des sessions multimédia.

SIP définit deux types d'entités: le client et les serveurs. Les entités serveurs sont :

- Le serveur proxy (Proxy server) : reçoit des requêtes de clients qu'il traite lui-même ou qu'il achemine à d'autres serveurs après avoir éventuellement réalisé certaines modifications sur ces requêtes.
- Le serveur de redirection (Redirect server) : serveur qui accepte des requêtes SIP, traduit l'adresse SIP de destination en une ou plusieurs adresses réseau et les retourne au client.
- L'enregistreur (Registrar) : serveur qui accepte les requêtes d'enregistrement.

L'entité client est :

- L'agent utilisateur (UA, User Agent) : application installée sur l'équipement de l'utilisateur afin de permettre l'échange des requêtes SIP avec l'extérieur.

Au cours de la mobilité d'un utilisateur (MH: Mobile Host) partageant une communication SIP avec un nœud correspondant (CN), et quand le MH va changer de cellule à une autre, il doit obligatoirement mettre à jour sa session SIP avec le CN en changeant d'adresse IP. Pour cela, le MH doit contacter un proxy SIP (SIP Outbound Proxy) dans le réseau visité, et ce dernier lui attribuera une adresse IP selon les disponibilités. Et dans ce cas, le MH pourra continuer sa session SIP avec le CN.

2.4.4 Architecture de mobilité IEEE 802.21 (MIH)

L'architecture IEEE 802.21 [64], [65], [66], [67] connue aussi sous le nom MIH (Media Independent Handover) fournit des méthodes et des fonctionnalités pour aider la station mobile à détecter les réseaux disponibles dans son environnement et lui permettre d'initier le Handover vertical entre les réseaux détectés.

La norme permet simplement de fournir des informations qui aident à l'initiation du Handover, la sélection du réseau et l'activation de l'interface. L'exécution et la décision du Handover ne font pas partie de la norme.

MIH a conçu une nouvelle fonction qui fournit des nouveaux points d'accès de services : SAPs (Service Access Point) pour faire le lien entre les couches inférieures (1 et 2) et les couches supérieures (3+).

Le Handover exigera des algorithmes complexes. Ces derniers auront besoin d'informations spécifiques des couches inférieures que MIH fournira.

L'architecture protocolaire de MIH est présentée ci-dessous :

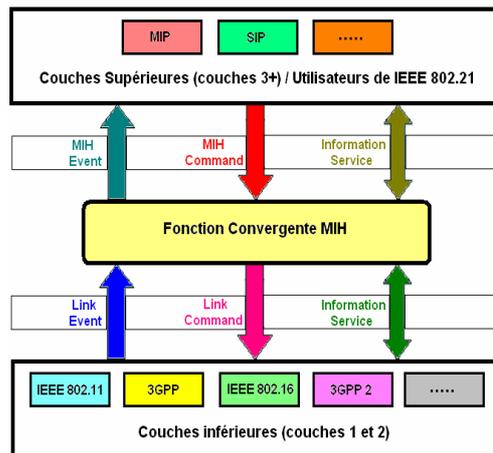


Figure 20. Architecture de MIH

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

Services MIH	Origine	Destination	Cas d'utilisations
Event (Evenement)	MIHF ou couches inférieures	MIHF ou couches supérieures Pile à distance ou Pile locale	link up/down/going down, transmissions status
Command (Commande)	MIHF ou couches supérieures	MIHF ou couches inférieures Pile à distance ou Pile locale	switch links, get status
Information (Information)	Couches inférieures ou couches supérieures	Couches inférieures ou supérieures Pile à distance ou Pile locale	information elements (IEs), neighbor reports

Tableau 5. Services MIH

Il y a trois types de points d'accès de service (SAPs) définies pour MIH : MIH_SAP pour l'accès des couches supérieures aux couches inférieures et au MIH, MIH_LINK_SAP pour relier la fonction de MIH et les couches inférieures, et MIH_NMS_SAP pour des fonctions de gestion.

2.4.5 Conclusion

Un Handover de niveau 3+ est employé dans les mêmes conditions que le Handover de niveau 3. Les protocoles de niveau 3+ sont généralement des technologies récentes qui permettent la mise à jour de l'adresse IP courante de la station mobile avec des options et des techniques qui permettent de minimiser le délai au cours du Handover pour permettre d'offrir un bon niveau de QoS à l'utilisateur du trafic temps-réel.

Le protocole HIP par exemple qui est fondé sur des mécanismes avancés de sécurité, et qui intervient au niveau de la couche 3.5 (entre la couche réseau et la couche transport) pour séparer l'identité de la machine et son adresse IP, permet avec cette séparation d'employer la technique du Multi-homing qui est efficace pour la continuation des services au cours du Handover.

Le MSCTP est un protocole de niveau 4 (transport), sa force réside dans son utilisation de la technique du Multi-Homing qui permet d'ouvrir plusieurs connections IP avec une même association MSCTP, et la technique du Multi-streaming qui se réfère à l'envoi de plusieurs types de streams en parallèle sur différentes connections IP de la même association MSCTP.

L'extension de mobilité DAR de ce protocole permet la gestion et le contrôle des sessions IP en cours.

MSCTP est peu employé actuellement vu qu'il est encore très récent, et vu qu'il nécessite une configuration au niveau des Softwares, surtout qu'il faut l'utiliser au lieu de TCP et UDP.

SIP est un protocole de niveau application plus dédié pour des utilisateurs fixes. Il peut gérer la mobilité des utilisateurs mais cela n'est pas vraiment son point fort.

Enfin, MIH est une architecture proposée par l'IEEE. Elle propose des modules qui s'installent au niveau des réseaux et des utilisateurs pour permettre l'échange rapide des informations sur le réseau avant le Handover. Cela facilite forcément la décision de l'utilisateur mobile.

En terme de pile protocolaire, MIH permet de faire le lien entre les couches basses et les couches supérieures à travers des SAP positionnés au niveau de la couche MIH.

Ce mécanisme semble intéressant, mais jusqu'à présent il n'a pas encore connu le succès attendu.

2.5 Conclusion du premier chapitre

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la présentation de l'étude bibliographique des entités clés qui seront utilisées dans les contributions que nous allons présenter dans le chapitre composé de deux sections qui va suivre.

La technologie de base candidate à une validation 4G que nous avons choisie et sur laquelle nous allons nous concentrer dans la première section du chapitre suivant est le WiMAX mobile (IEEE 802.16e). Nous allons traiter dans un premier temps la gestion de la mobilité dans le WiMAX mobile. Ensuite, nous passerons dans la deuxième section du chapitre à l'interconnexion et à l'interopérabilité entre les réseaux.

Chapitre II. GESTION DE LA MOBILITE DANS LE WIMAX MOBILE

Un réseau 4G devra être fondé sur une technologie qui résistera aux coupures causées par le déplacement d'un terminal mobile entre des cellules couvertes par cette technologie. Cela se passe de façon qu'un utilisateur en communication ne perde pas sa connexion en cours, tout en réduisant la latence causée par le Handover de manière à respecter les délais exigés par le trafic temps-réel. Dans ce contexte, ce chapitre traitera les problèmes de mobilité dans le WiMAX mobile dans un souci d'améliorer le niveau de QoS pour le trafic temps-réel. Tout d'abord, nous allons aborder le problème de QoS pour du trafic temps-réel dans le cas d'une mobilité à grande vitesse. Ce choix a été fait parce que les problèmes majeurs de coupures de la communication pendant le Handover proviennent quand la station se déplace à grande vitesse. Pour cela, nous allons simuler le cas du Handover de niveau 2 en appliquant le FBSS et le Hard Handover sur un modèle de mobilité composé d'une autoroute localisée dans une zone rurale. Dans la 2^{ème} partie, nous allons offrir un aperçu général sur le niveau de la QoS avec le WiMAX mobile dans une zone urbaine, en simulant plusieurs types de trafic, avec plusieurs niveaux de mobilité, et en appliquant le Hard Handover et le FBSS dans le cas du Handover de niveau 2, et MIP dans le cas du Handover de niveau 3. Nous complétons dans la 1^{ère} étude avec d'autres niveaux de mobilité (moyenne ou lente vitesse). Dans la 3^{ème} partie, nous proposerons d'utiliser le protocole MSCTP au lieu des protocoles MIP et PMIP dans le cas du Handover de niveau 3 dans le WiMAX mobile, pour améliorer la QoS des trafics temps-réel. Enfin, pour englober les trois travaux déjà effectués, dans la 4^{ème} partie nous proposerons un algorithme décisionnel fondé sur la logique floue. Cet algorithme fondé sur des paramètres d'entrées tirés des travaux précédents, permet à une station mobile d'effectuer un choix rapide et juste de la bonne technique durant le Handover suivant une table de règles.

1 Mobilité à grande vitesse dans une zone rurale

1.1 Introduction

Cette étude a comme but d'améliorer la QoS dans le WiMAX mobile, et de réduire l'interruption du service dans le cas de trafic sensible au délai durant le Handover de niveau 2 d'un mobile se déplaçant à grande vitesse. Pour rendre cette hypothèse réaliste, nous nous plaçons dans un contexte de zone rurale. Pour cela, un modèle composé d'une autoroute est mis en place dans une zone rurale située entre deux villes. Des stations mobiles circulant à grande vitesse dans les deux sens de l'autoroute communiquent au travers d'applications de type VoIP ou transfert vidéo de type Visioconférence. Notre but sera de prouver l'efficacité du mécanisme FBSS pour le moment peu déployé à grande échelle, en le comparant dans une telle situation avec le mécanisme fréquemment utilisé actuellement : le Hard Handover.

1.2 Modèle des simulations et scénarios de mobilité

1.2.1 Modèle des simulations

Le modèle proposé pour les simulations (illustré dans la figure 21) est fondé sur une autoroute d'une longueur égale à 75 km. L'autoroute est couverte par quatre stations de base (BSs) ayant chacune un rayon de couverture fixé à 10 km. Les diamètres des zones de Handover entre les cellules varient entre 1 et 3 km. Les deux premières stations de base

appartiennent au même ASN (Access Service Network), et les deux autres BSs appartiennent à un autre ASN ; les deux ASNs appartiennent au même CSN (Connectivity Service Network). Les véhicules portant les stations mobiles qui communiquent, se déplacent dans les deux sens de l'autoroute à grande vitesse. Le but général de cette étude est d'améliorer la QoS pour du trafic temps-réel de type vidéo (Visioconférence) et téléphonie (VoIP).

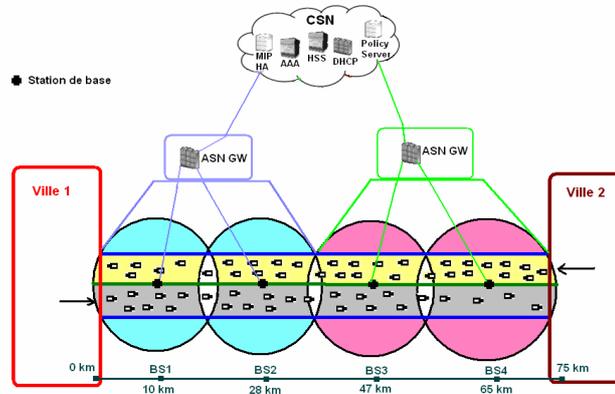


Figure 21. Modèle de mobilité

1.2.2 Scénarios de mobilité

Dans cette étude, nous allons considérer plusieurs scénarios de mobilité. Nous allons supposer au début de chaque scénario un nombre N de stations mobiles uniformément réparties sur l'autoroute de longueur L , et ces N mobiles (la moitié utilise du trafic VoIP l'autre du trafic Vidéo) vont se déplacer avec des vitesses différentes. L'idée est de ne pas démarrer avec une autoroute vide nos simulations de façon à gagner dans la convergence de nos estimations. Nous choisissons N proche du nombre moyen de véhicules sur l'autoroute. Ils sont répartis uniformément sur l'autoroute. Nous allons noter V_e la vitesse moyenne des véhicules que l'on injecte à l'entrée de l'autoroute. On prend des arrivées poissonniennes de véhicules de taux $\lambda = NV_e/L$. Les vitesses proposées pour les simulations sont calculées suivant les règles illustrées dans le tableau ci-dessous. Une fois qu'un véhicule est rentré sur l'autoroute, sa vitesse restera constante.

Les vitesses V suivront des lois normales tronquées selon les règles suivantes (nous n'avons pas fait varier la variance de ces lois et avons considérées des écarts-types de 2 km/h) :

Vitesse moyenne V_e en km/h à l'entrée de l'autoroute	Règles		
80	80% de véhicules qui se déplacent à une vitesse entre 70 et 80 km/h	16% de véhicules qui se déplacent à une vitesse entre 80 et 110 km/h	4% de véhicules qui se déplacent à une vitesse entre 110 et 130 km/h
90	60% de véhicules qui se déplacent à une vitesse entre 70 et 90 km/h	30% de véhicules qui se déplacent à une vitesse entre 90 et 110 km/h	10% de véhicules qui se déplacent à une vitesse entre 110 et 130 km/h
100	30% de véhicules qui se déplacent à une vitesse entre 70 et 90 km/h	40% de véhicules qui se déplacent à une vitesse entre 90 et 110 km/h	30% de véhicules qui se déplacent à une vitesse entre 110 et 130 km/h
110	30% de véhicules qui se déplacent à une vitesse entre 80 et 100 km/h	40% de véhicules qui se déplacent à une vitesse entre 100 et 120 km/h	30% de véhicules qui se déplacent à une vitesse entre 120 et 140 km/h
120	10% de véhicules qui se déplacent à une vitesse entre 80 et 100 km/h	30% de véhicules qui se déplacent à une vitesse entre 100 et 120 km/h	60% de véhicules qui se déplacent à une vitesse entre 120 et 140 km/h

130	4% de véhicules qui se déplacent à une vitesse entre 80 et 100 km/h	16% de véhicules qui se déplacent à une vitesse entre 100 et 130 km/h	80% de véhicules qui se déplacent à une vitesse entre 130 et 140 km/h
-----	---	---	---

Tableau 6. Vitesses

IEEE 802.16e prend en charge par secteur à peu près un nombre maximal d'utilisateurs de VoIP entre 100 et 200, et un nombre maximal d'utilisateurs de vidéo entre 100 et 150 en considérant une configuration normale de la station de base (Ces valeurs sont bien sur en fonction des paramètres de la station de base, des canaux montants et descendants, de la disponibilité du réseau cœur, du volume de trafic, etc...).

Nous ferons varier N entre 80 et 130 par pas de 10, en combinant ça aux vitesses moyennes considérées, cela nous conduit à 36 scénarios. En toute rigueur, si l'on souhaite déterminer le nombre moyen de véhicules sur l'autoroute, on applique simplement la loi de Little à la portion d'autoroute qui se comporte comme une file $M/G/\infty$: $E[N] = \lambda L E\left[\frac{1}{V}\right]$.

La vitesse des véhicules étant constante une fois qu'ils sont entrés sur l'autoroute.

Si maintenant on s'intéresse à la vitesse moyenne des véhicules V_m présents sur l'autoroute, on se rend compte que cette vitesse moyenne n'est pas égale à V_e car un véhicule lent restera plus longtemps qu'un véhicule rapide. Regardons le système pendant une durée T . On note $N(t)$, le nombre de véhicules présents à l'instant t et M_T le nombre de véhicules sortis de l'autoroute sur la durée T . La vitesse moyenne instantanée à l'instant t vaut alors :

$$\bar{V}(t) = \frac{1}{N(t)} \sum_{i=1}^{N(t)} V_i \text{ où } V_i \text{ est la vitesse (constante) du véhicule } i.$$

On pourrait penser estimer la vitesse moyenne sur la durée T en prenant simplement la moyenne temporelle : $\frac{1}{T} \int_{t=0}^T \bar{V}(t) dt$. Le problème avec cette définition provient du fait que parfois l'autoroute est vide et que l'on ne pondère pas cette vitesse moyenne par le nombre de

véhicules. Nous prenons donc :
$$\bar{V}_T = \frac{\int_{t=0}^T N(t) \bar{V}(t) dt}{\int_{t=0}^T N(t) dt}.$$

Chaque véhicule i ayant une vitesse constante une fois qu'il est rentré sur l'autoroute, il sera donc compté pendant une durée L/V_i pour V_i au numérateur et pour 1 au dénominateur. On

obtient alors :
$$\bar{V}_T = \frac{\sum_{i=1}^{M_T} V_i \frac{L}{V_i}}{\sum_{i=1}^{M_T} \frac{L}{V_i}} = \frac{M_T}{\sum_{i=1}^{M_T} \frac{1}{V_i}}.$$

Soit l'inverse de la moyenne arithmétique de l'inverse de la vitesse. En faisant tendre T vers l'infini, on obtient finalement :
$$V_m = \frac{1}{E[1/V]}.$$

Dans les cas que nous avons envisagés, nous obtenons des valeurs de V_m et de V_e peu différentes, mais pas une expression analytique de V_m . A titre d'exemple, pour la première ligne du tableau, nous obtenons $V_e = 80$ km/h et $V_m = 78.6$ km/h. Nous commencerons donc par regarder le nombre moyen de véhicules dans le système pour vérifier qu'il n'est pas très éloigné de N .

1.3 Paramètres des simulations et critères de performance

1.3.1 Paramètres des simulations

Toutes les simulations qui vont suivre ont été mises en œuvre à l'aide de l'outil NS2 [68]. Pour démarrer une simulation sous NS2, un ensemble de paramètres de la station mobile et du réseau doivent être fixés. Dans le tableau 7 nous présentons quelques paramètres ; certains sont définis par défaut dans le simulateur comme ceux de l'antenne émettrice et du canal, d'autres sont calculés suivant un modèle de propagation radio bien défini comme les seuils et le rayon de couverture.

Puissance du signal (P_t)	15 W
Seuil de réception (RXThresh)	7.59375e-15 W
Seuil de la porteuse d'envoi (CSThresh)	2.13841e-16 W
Rayon de couverture (Distance)	10 Km
Modèle de propagation radio	Two-Ray Ground [69] $P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4 L}$
Gain d'antenne d'émission (G_t)	1 dB
Gain d'antenne de réception (G_r)	1 dB
Perte du système (L)	1 dB
Hauteur d'antenne d'émission (h_t)	1.5 m
Hauteur d'antenne de réception (h_r)	1.5 m
Débit descendant (DL)	Maximum = 32 et Moyenne = 10 Mb/s
Débit montant (UL)	Maximum = 6 et Moyenne = 3 Mb/s
Modulation	OFDMA
Fréquence (Freq)	3.5 GHz
Multiplexage	TDD
Type de paquets vidéo et VoIP	CBR/UDP
Mode de partage de débit entre utilisateurs	En fonction de la charge de la cellule, du type de trafic et du privilège donné à chaque abonné

Tableau 7. Paramètres des simulations sous NS2

Le temps de simulation d'un seul scénario est fixé à 60 minutes de déplacement des mobiles dans l'autoroute. Et après chaque 5 minutes de simulation, nous présentons la moyenne des résultats calculés pour tous les mobiles répartis sur l'autoroute.

Les stations mobiles présentes dans le système sont à la fois des sources et des destinataires de flux. Concernant le trafic échangé : la taille d'un paquet vidéo sera fixée à 4960 octets, et la taille d'un paquet VoIP sera fixée à 160 octets (les tailles des paquets choisies ont été déjà adoptées par plusieurs exemples de programmes TCL codés et présentés par NIST [70], [71], et utilisés dans le cas du WiMAX sous le simulateur NS2).

1.3.2 Critères de performance

Pour évaluer la performance du mécanisme FBSS, des paramètres influant sur la QoS sont simulés, et un critère d'indication est calculé.

Le critère indicatif est :

- La variation du nombre des mobiles dans l'autoroute en fonction du temps.

Les critères fondés sur la QoS sont :

- La moyenne des délais de bout en bout; sachant que le délai de bout en bout est le temps que prend un paquet pour être transmis depuis une source vers une destination.
- La moyenne des gigue; sachant que la gigue est la variation du délai.
- La moyenne des taux de perte des paquets.

- La moyenne des débits; sachant que le débit est la quantité d'informations transmises via un canal de communication dans un intervalle de temps donné.

Au cours des 60 minutes de simulation décomposées en M tranches et pour chaque scénario, nous allons aussi établir les intervalles de confiance suivant la formule suivante [72]:

$\mu = \bar{X} \pm 2\sigma(\bar{X})$, où \bar{X} est la valeur moyenne calculée, $2\sigma(\bar{X})$ est l'intervalle de confiance adopté à 95%, $\sigma(\bar{X}) = \frac{\sigma(X_i)}{\sqrt{M}}$, $\sigma(X_i) = \sqrt{V(X_i)}$, et la Variance est estimée par la valeur

empirique $\sigma^2(X_i) = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (X_i - \bar{X})^2$, avec X_i est la valeur calculée pendant la $i^{\text{ème}}$ tranche de temps.

1.4 Résultats des simulations

Présentons en premier lieu quelques résultats de la variation du nombre des mobiles en fonction du temps de simulation et en fonction de V_e pour $N = 80$, $N = 90$, $N = 120$ et $N = 130$.

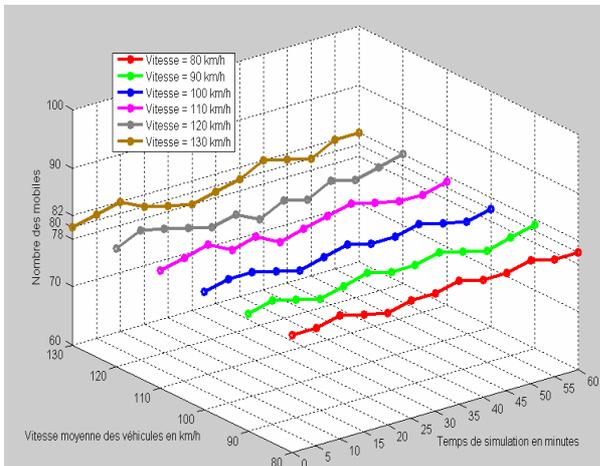


Figure 22. Variation de $N = 80$

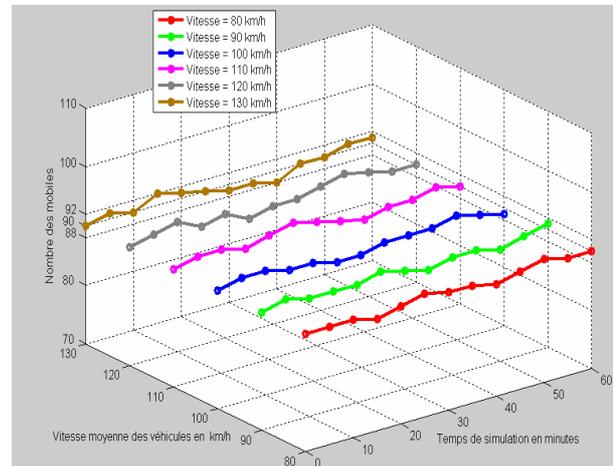


Figure 23. Variation de $N = 90$

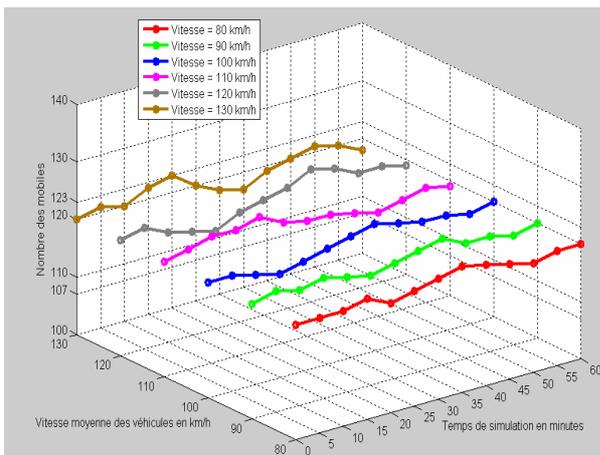


Figure 24. Variation de $N = 120$

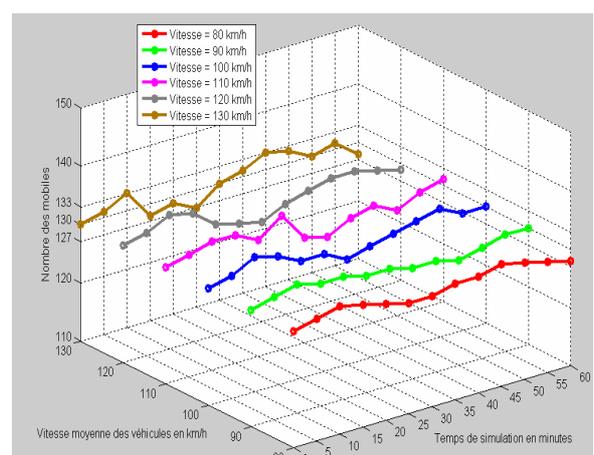


Figure 25. Variation de $N = 130$

Nous constatons que le nombre de véhicules varie relativement peu au cours de la simulation et que le nombre moyen de véhicules dans le système est très proche de N pour toutes les valeurs que nous avons envisagées (écart maximal de 1 MS).

En conclusion, le nombre moyen des mobiles est stable sur l'autoroute pendant une heure de simulation. Nous représenterons donc les courbes en fonction de N ou de V_e dans la suite du chapitre.

Nous présentons maintenant quelques résultats de la moyenne des délais de bout en bout, d'abord en 2D : en fonction de V_e pour $N = 90$ et $N = 120$; ensuite en 3D : en fonction de N et V_e pour le trafic Vidéo.

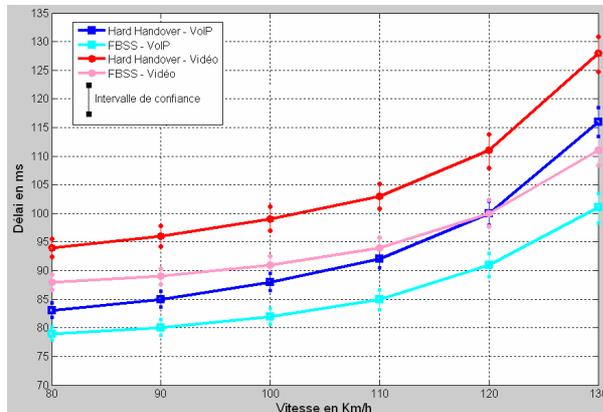


Figure 26. Délais moyens pour $N = 90$

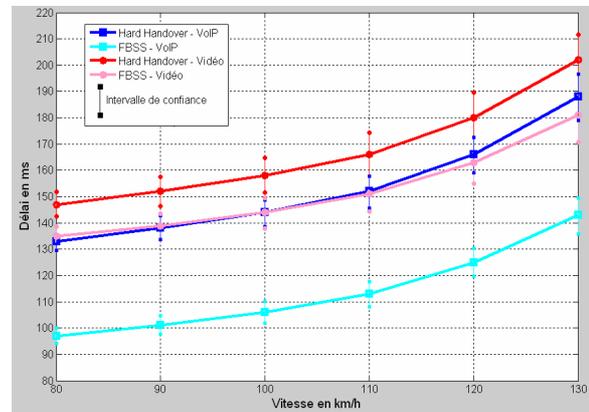


Figure 27. Délais moyens pour $N = 120$

Nous remarquons dans les figures 26 et 27, que les délais augmentent en fonction de V_e , et que les résultats obtenus avec une charge N de 90 mobiles sont meilleurs que ceux obtenus avec $N=120$, donc l'augmentation de N entraîne la dégradation des délais.

Les valeurs des délais obtenus avec FBSS sont toujours inférieures à ceux obtenus avec le Hard Handover.

Enfin, avec le Hard Handover, les délais se dégradent plus en fonction de V_e qu'avec le FBSS, la preuve en est qu'avec une charge N de 90, la courbe de FBSS/vidéo passe en dessous de la courbe Hard Handover/VoIP quand $V_e > 120$ km/h.

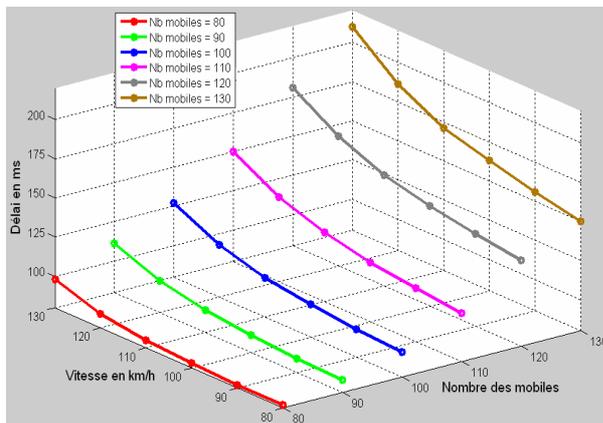


Figure 28. Délais moyens avec FBSS / vidéo

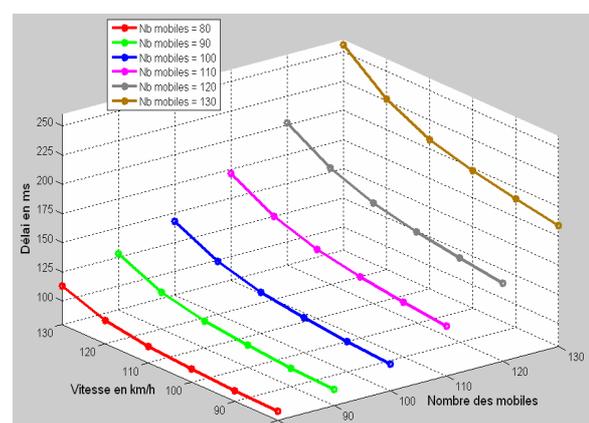


Figure 29. Délais moyens avec Hard HO / vidéo

Les deux figures en 3D : 28 et 29 permettent de comparer les résultats des délais obtenus avec le FBSS et le Hard Handover pour le trafic vidéo en fonction de N et V_e . Nous remarquons qu'avec le FBSS (figure 28), les valeurs des délais sont inférieures à celles obtenues avec le Hard Handover (figure 29).

Les deux figures montrent aussi comment les valeurs de délais se dégradent en fonction de l'augmentation de N et V_e .

Passons maintenant à la présentation de quelques résultats de la moyenne des giges, d'abord en 2D : en fonction de V_e pour $N = 100$ et avec les trafics VoIP et vidéo ; ensuite en 3D : en fonction de N et V_e pour le trafic VoIP.

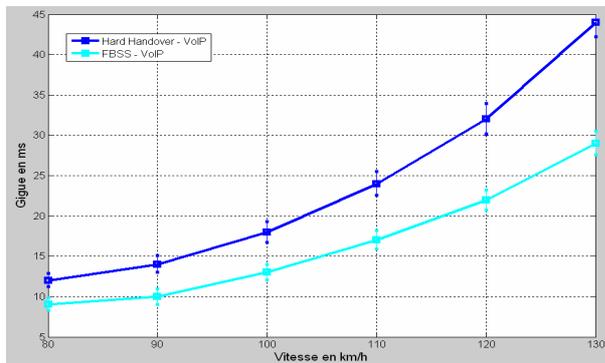


Figure 30. Giges moyennes / VoIP pour $N = 100$

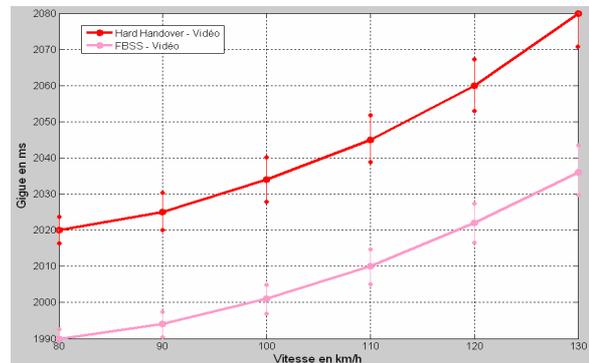


Figure 31. Giges moyennes / Vidéo pour $N = 100$

Nous remarquons dans les deux figures 30 et 31 et avec $N=100$, que les giges obtenues avec le FBSS sont inférieures à celles obtenues avec le Hard Handover pour les deux types de trafic. Les intervalles de confiance avec FBSS sont également un peu inférieurs à ceux avec le Hard Handover.

Nous remarquons aussi que la gigue obtenue avec la vidéo est bien supérieure à celle obtenue avec la VoIP et que les intervalles de confiance de la vidéo sont également supérieurs à ceux de la VoIP. Ce phénomène vraisemblablement une conséquence de la grande différence entre la taille d'un paquet de type VoIP et un paquet de type Visioconférence. Si nous avons le même nombre d'utilisateurs et le même nombre de paquets pour les deux types de trafic VoIP et Visioconférence, et si on multiplie la taille par le nombre des paquets, le volume des données Visioconférence sera beaucoup plus grand que celui de la VoIP ce qui génère une gigue plus importante.

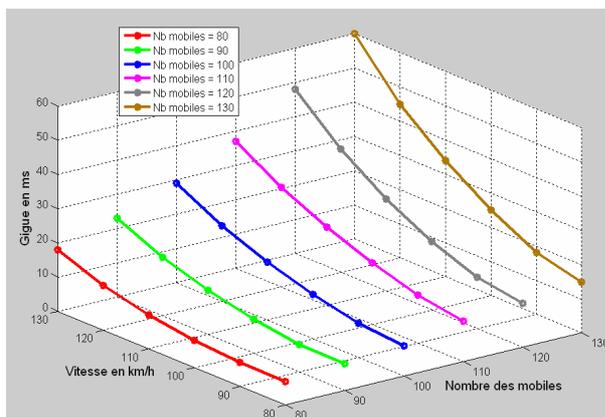


Figure 32. Giges moyennes avec FBSS / VoIP

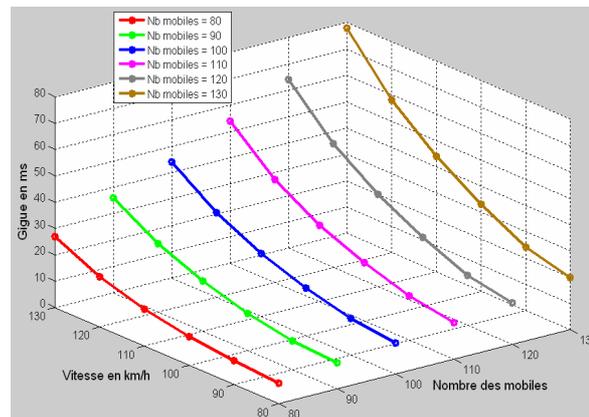


Figure 33. Giges moyennes avec Hard HO / VoIP

Comme pour le cas des délais, dans les figures 3D : 32 et 33, nous remarquons qu'avec le FBSS nous obtenons des giges inférieures à celles obtenues avec le Hard Handover, et que la gigue augmente en fonction de N et V_e .

Nous procédons maintenant à la présentation de quelques résultats de la moyenne des taux des paquets perdus, d'abord en 2D : en fonction de V_e pour $N = 80$ et $N = 110$; ensuite en 3D : en fonction de N et V_e pour le trafic Vidéo.

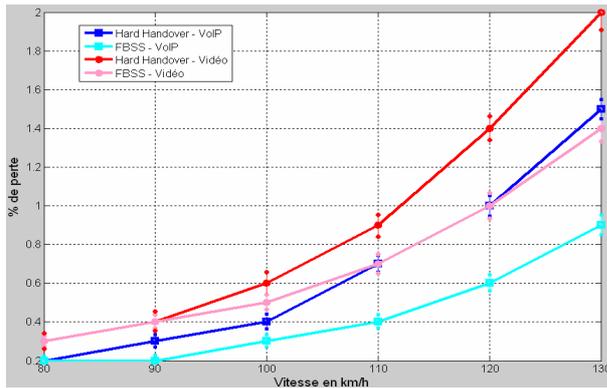


Figure 34. Pertes moyennes pour $N = 80$

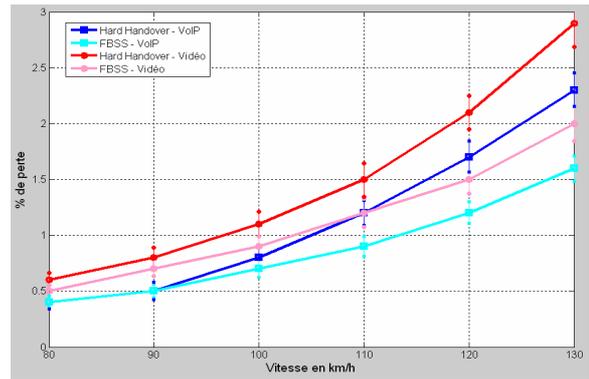


Figure 35. Pertes moyennes pour $N = 110$

Dans la figure 34, le maximum des pertes pour la VoIP avec le FBSS ne dépasse pas 1% contre 1.4% avec le Hard Handover. Le FBSS supporte mieux la vitesse que le Hard Handover. Le taux des paquets perdus augmente également avec V_e ou N . La perte des paquets se manifeste surtout au cours du HO : avec le FBSS il y a une coupure de service lorsque une MS change de BS, donc forcément il y a des pertes. Avec le FBSS il y a moins de perte parce que généralement il n'y a pas de coupure de service au cours de HO, mais parfois la BS peut être occupée ou surchargée, ou le volume de trafic envoyé dépasse un certain seuil qui déclenche la perte des paquets, ou encore si une MS se déplace à très grande vitesse.

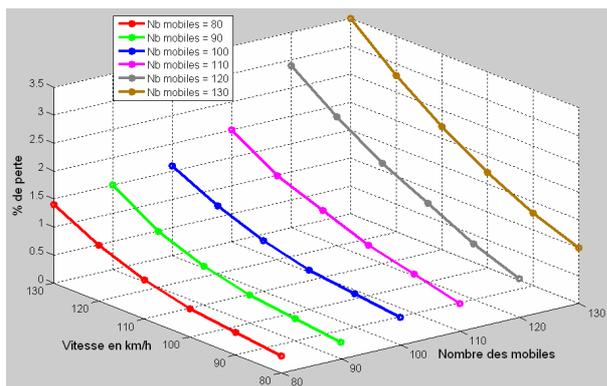


Figure 36. Pertes moyennes avec FBSS / vidéo

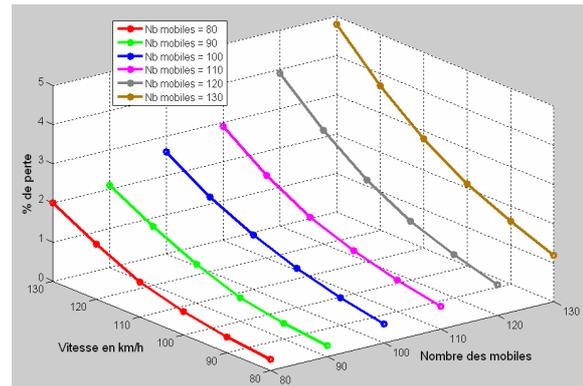


Figure 37. Pertes moyennes avec Hard HO / vidéo

Dans les figures 36 et 37, nous donnons un aperçu sur les taux des paquets perdus pour le trafic vidéo avec les deux techniques de Handover. Nous remarquons qu'avec le FBSS nous obtenons des taux de pertes inférieurs à ceux du Hard Handover.

Nous allons maintenant présenter quelques résultats de la moyenne des débits, d'abord en 2D : en fonction de V_e pour $N = 80$ et $N = 130$ avec le trafic VoIP; ensuite en 3D : en fonction de N et V_e pour le trafic VoIP.

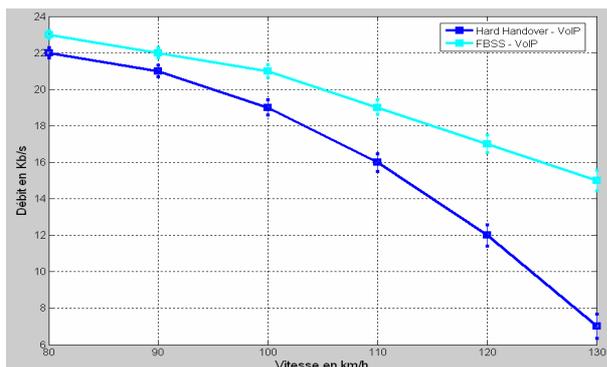


Figure 38. Débits moyens / VoIP pour $N = 80$

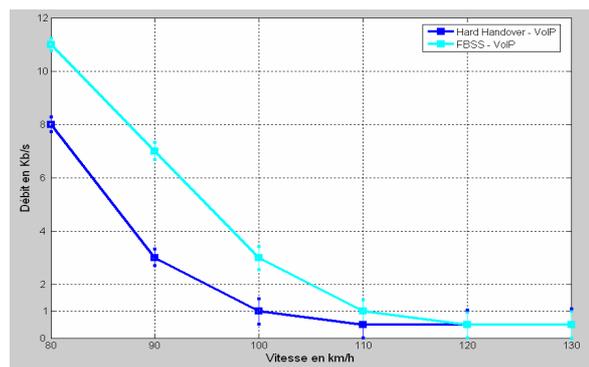


Figure 39. Débits moyens / VoIP pour $N = 130$

Dans la figure 38, et avec une charge $N=80$, nous remarquons que le niveau de QoS est acceptable avec les deux techniques, sauf qu'avec le FBSS, les valeurs des débits sont meilleures. Dans la figure 39, et avec une charge $N=130$, le débit se dégrade avec le Hard Handover quand $V_e > 85$ km/h, et avec le FBSS quand V_e dépasse 95 km/h.

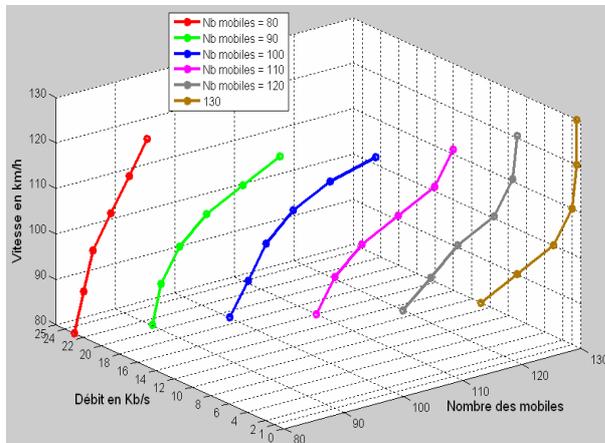


Figure 40. Débits moyens avec FBSS / VoIP

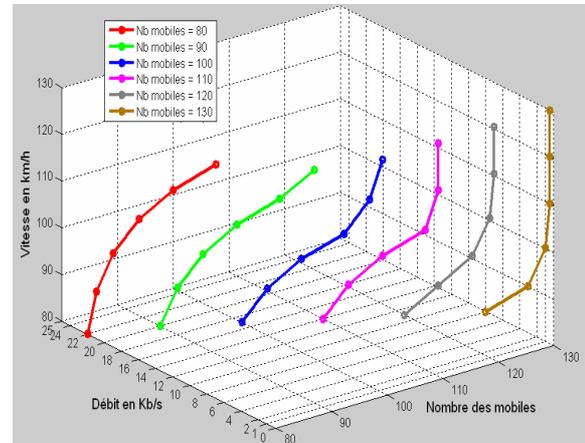


Figure 41. Débits moyens avec Hard HO/ VoIP

Concernant les débits pour le trafic VoIP, avec le FBSS, les valeurs de débits convergent moins vite vers zéro qu'avec le Hard Handover quand nous augmentons V_e et N .

Et pour finir cette étude, nous allons présenter les résultats obtenus par les délais d'une seule station mobile choisie parmi plusieurs autres qui se déplacent sur l'autoroute. Ces résultats sont calculés en fonction de la vitesse, et ce pour les trafics VoIP et Visioconférence.

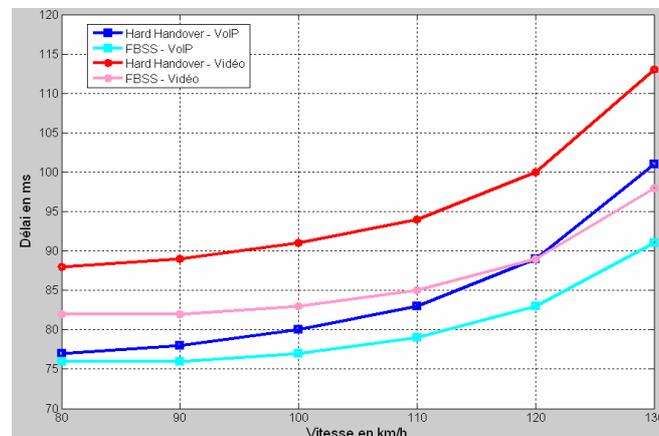


Figure 42. Délais d'une seule MS

Nous remarquons ici, que grâce à la technique Make-before-break utilisée par le FBSS, et en fonction de l'augmentation de la vitesse, les délais obtenus pour les deux types de trafic avec le FBSS sont inférieurs à ceux obtenus avec Hard Handover.

Nous remarquons aussi qu'en fonction de l'augmentation de la vitesse, les valeurs de délais augmentent plus rapidement avec Hard Handover qu'avec le FBSS. La preuve est que les résultats de délais de la courbe Hard Handover/VoIP deviennent supérieurs à ceux de la courbe FBSS/Vidéo quand la vitesse du mobile dépasse 120 km/h ; sachant qu'avant d'arriver à cette vitesse, ils étaient inférieurs.

Les délais obtenus avec la vidéo sont supérieurs à ceux de la VoIP, parce que la taille d'un paquet vidéo est plus grande qu'un paquet VoIP.

1.5 Conclusion

Le but principal de cette étude est de montrer l'efficacité du mécanisme de Handover de niveau 2 et plus particulièrement du FBSS par rapport au Hard Handover pour du trafic temps-réel dans le cas où les stations mobiles se déplacent à grande vitesse.

En se fondant sur la comparaison des résultats obtenus à travers les simulations des critères de QoS : délai, gigue, taux des pertes des paquets, et débit, le mécanisme FBSS a prouvé son efficacité dans un environnement rural contenant des véhicules qui se déplacent à grande vitesse.

Notons aussi que le niveau de QoS se dégrade en fonction de la charge de l'environnement par les stations mobiles, et en fonction des vitesses des mobiles (moins il y a de mobiles meilleure est la QoS, et moins la vitesse est grande meilleure est la QoS).

2 Mobilité avec différentes vitesses dans une zone urbaine

2.1 Introduction

Cette étude a comme but d'offrir un aperçu général sur le niveau de la QoS dans un environnement dense (peuplé) couvert par le WiMAX mobile. Pour cela nous allons simuler un modèle de mobilité illustrant une zone urbaine, avec différents niveaux de mobilité (grande, moyenne et faible) et différents types de trafic (multimédia et données).

Le modèle de mobilité proposé est composé de six cellules de différentes tailles, contenant des stations mobiles qui se déplacent dans toutes les directions avec des vitesses variables comprises entre 20 et 90 km/h, et qui utilisent des trafics VoIP, vidéo et données.

Dans le cas d'un Handover de niveau 2, nous allons appliquer deux techniques et comparer leurs résultats : Hard Handover et Soft Handover/FBSS. Dans le cas d'un Handover de niveau 3 nous allons appliquer le protocole MIP.

2.2 Modèle des simulations et scénarios de mobilité

2.2.1 Modèle des simulations

Le modèle qui a été fixé pour les simulations est composé d'une petite ville avec une surface près de 45 km², couverte par six stations de base de portées variables entre 1 et 3 km (voir la figure 43). Les surfaces des zones de Handover (entre les cellules) varient entre 300 et 700 m². Les quatre premières BSs appartiennent au même ASN, et les deux autres BSs appartiennent à un deuxième ASN. Les deux ASNs appartiennent au même CSN. Les stations mobiles se déplacent dans les cellules avec des vitesses variables. Dans les cellules de numéro 1 et 6, la vitesse maximale autorisée pour le déplacement est de 90 km/h. Dans les cellules de numéro 2 et 5, la vitesse maximale autorisée est de 70 km/h. Dans les cellules de numéro 3 et 4, la vitesse maximale autorisée pour le déplacement est de 50 km/h.

Notre but dans cette étude est d'offrir un aperçu général sur le niveau de la QoS dans une zone urbaine avec le WiMAX mobile pour plusieurs types de trafic. Donc, au cours de leurs déplacements, les mobiles vont échanger avec leurs correspondants plusieurs types de trafic (vidéo : Visioconférence, VoIP et données).

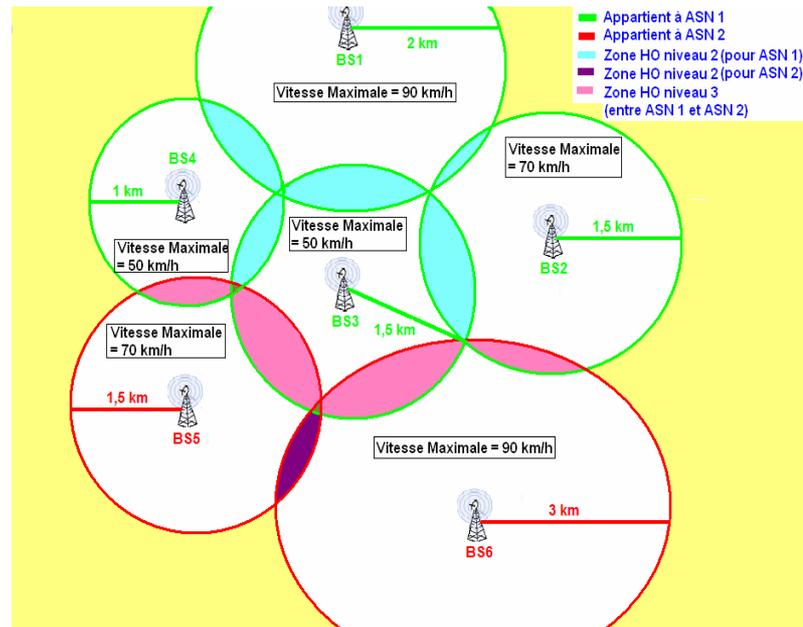


Figure 43. Modèle des simulations

2.2.2 Scénarios de la mobilité

Dans nos simulations, nous nous concentrerons sur le déplacement de dix mobiles choisis au hasard parmi plusieurs mobiles. Au début, nos 10 mobiles vont partir du même point localisé dans une entreprise située dans la cellule numéro 3 (les utilisateurs des mobiles sont des employés de l'entreprise). Ensuite chacun des dix mobiles va rejoindre une destination finale (maison, hôtel, salle de gym, marché...) en suivant un chemin spécifié.

Ces dix stations mobiles choisies vont communiquer durant tous leurs déplacements avec des correspondants situés dans des réseaux étrangers fixes. Les dix stations mobiles sont à la fois des sources et des destinataires de flux.

Les vitesses des mobiles dépendent de leur localisation par rapport aux cellules. Chaque cellule contient également un nombre d'utilisateurs fixes ou mobiles présentés dans la figure 43. Les vitesses sont choisies aléatoirement entre 20 et 90 km/h selon une loi uniforme.

Les mobiles de numéro 1, 4 et 8 vont échanger avec leurs correspondants un trafic de type vidéo. Les mobiles de numéro 2, 5, 7 et 9 vont utiliser un trafic VoIP, le reste des mobiles vont échanger du trafic Data.

Concernant le déplacement des mobiles dans la ville et leurs passages par des zones de Handover, les mobiles de numéro 1, 2, 8, 9 et 10 vont effectuer un seul Handover intra-ASN (L2 HO). Les mobiles de numéro 3, 4 et 6 vont effectuer un seul Handover inter-ASN (L3 HO). Le mobile de numéro 7 va effectuer deux Handovers (L2 et L3) au cours de son déplacement. Le mobile de numéro 5 ne va exécuter aucun Handover.

Les scénarios de mobilité sont présentés sur la figure 44 :

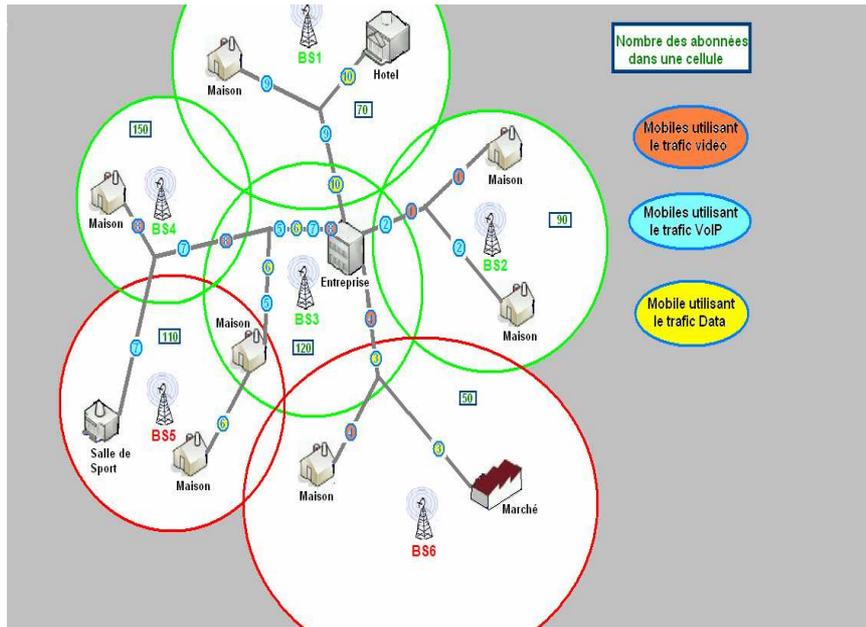


Figure 44. Scénarios de mobilité

2.3 Paramètres des simulations et critères de performance

2.3.1 Paramètres des simulations

Les paramètres fixés pour nos simulations sous NS2 sont illustrés dans le tableau ci-dessous :

	Cellule 1	Cellules 2,3 & 5	Cellule 4	Cellule 6
Puissance du signal (P_t)	15 W			
Seuil de réception (RXThresh_)	4.746e-12 W	1.5e-11	7.593e-11	9.375e-13
Seuil de la porteuse d'envoi (CSThresh_)	1.362e-12 W	8.75e-12	2.65e-11	5.761e-13
Rayon de couverture (Distance D)	2 km	1.5 km	1 km	3 km
Modèle de propagation radio	Two-Ray Ground [69] $P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4 L}$			
Gain d'antenne d'émission (G_t)	1 dB			
Gain d'antenne de réception (G_r)	1 dB			
Perte du système (L)	1 dB			
Hauteur d'antenne d'émission (h_t)	1.5 m			
Hauteur d'antenne de réception (h_r)	1.5 m			
Modulation	OFDMA			
Fréquence (Freq_)	3.5 GHz			
Multiplexage	TDD			
Type de paquets	CBR/UDP			

Tableau 8. Paramètres des simulations sous NS2

Le temps de la simulation est fixé à 24 minutes. Au cours de ce temps, les dix mobiles choisis se déplaceront suivant le modèle et les scénarios déjà décrits. Pendant la simulation, et au cours du processus de Handover, nous appliquerons les deux mécanismes FBSS et Hard Handover quand un mobile effectue un transfert intercellulaire de niveau 2 ; et nous appliquerons le mécanisme MIP quand l'un des dix mobiles effectue un transfert intercellulaire de niveau 3.

Les résultats seront calculés toutes les 3 minutes de la simulation.

La taille d'un paquet vidéo (Visioconférence) est fixée à 4960 octets, et la taille d'un paquet VoIP est fixée à 160 octets. Pour les données, la taille d'un paquet est fixée à 1000 octets.

2.3.2 Critères de performance

Les critères de performance fixés dans ce travail pour déterminer le niveau de la QoS sont : le délai de bout en bout, le taux des paquets perdus, le débit, et enfin l'occupation des ressources au niveau des BSs.

2.4 Résultats des simulations

Concernant les résultats des simulations, nous allons commencer par présenter les courbes des délais de bout en bout pour nos 10 mobiles en appliquant les mécanismes FBSS et Hard Handover sur les mêmes mobiles qui effectuent un Handover de niveau 2, et en appliquant MIP sur les mobiles qui effectuent un Handover de niveau 3.

Les deux premières figures présentent les résultats des délais pour les mobiles numéros 1, 2, 5, 8, 9 et 10 (qui vont effectuer un Handover de niveau 2) en appliquant le Hard Handover et le FBSS. La troisième figure présente les courbes pour les mobiles numéros 3, 4, 6 et 7 (qui vont effectuer un Handover de niveau 3) en appliquant MIP.

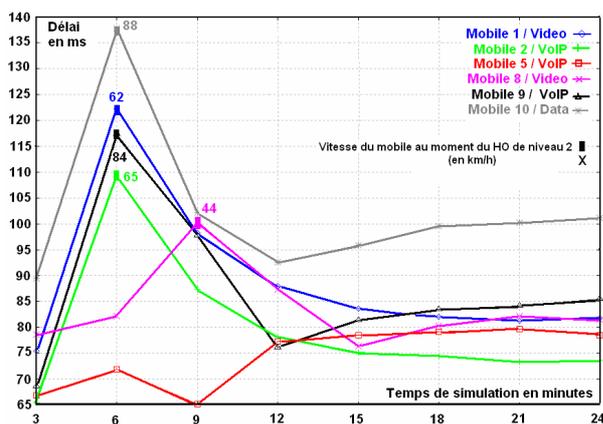


Figure 45. Délais avec le Hard Handover

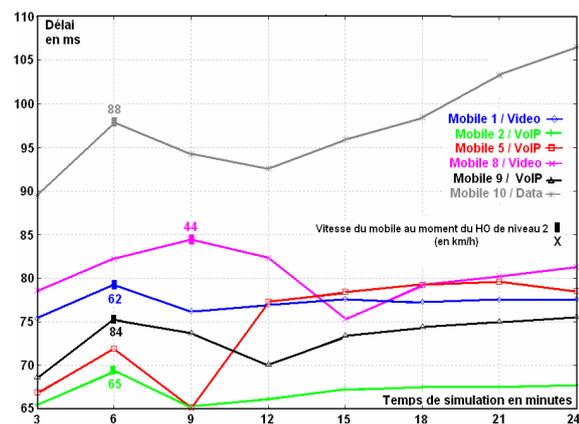


Figure 46. Délais avec le FBSS

Dans ces deux figures (FBSS et Hard Handover), la première différence que nous remarquons en comparant les résultats obtenus avec les deux mécanismes concerne les délais des mobiles durant le processus du HO. Le mécanisme FBSS diminue considérablement les délais pendant le Handover par rapport au Hard Handover. La raison est qu'il n'y a pas d'interruption de la communication durant le Handover avec le FBSS.

Notons aussi que si la vitesse d'un mobile est supérieure à 50 km/h, la QoS commence à se dégrader avec le Hard Handover (les valeurs des délais dépassent 100 ms) [73]. La QoS est considérée comme mauvaise dans ce cas, contrairement au cas du FBSS où les résultats ne dépassent pas les 100 ms, même durant le Handover.

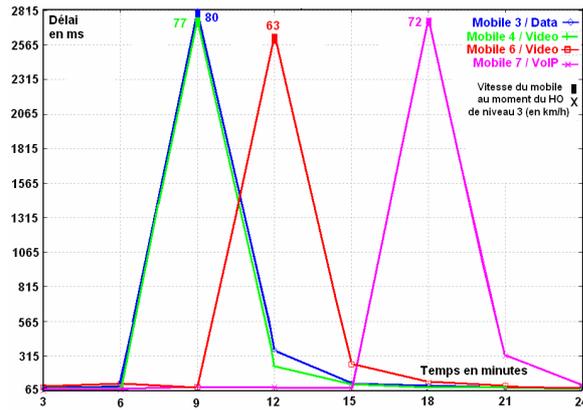


Figure 47. Délais avec MIP

Concernant les résultats obtenus avec MIP, nous remarquons que les délais obtenus sont sensiblement supérieurs à 100 ms [73] durant le Handover, ce qui n'est pas du tout acceptable pour du trafic temps-réel. Après le processus de Handover, les délais redeviennent normaux.

Nous allons présenter maintenant les résultats des taux de paquets perdus.

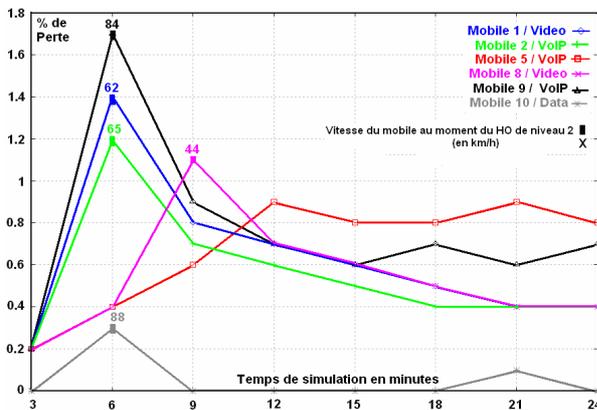


Figure 48. Taux des pertes avec Hard Handover

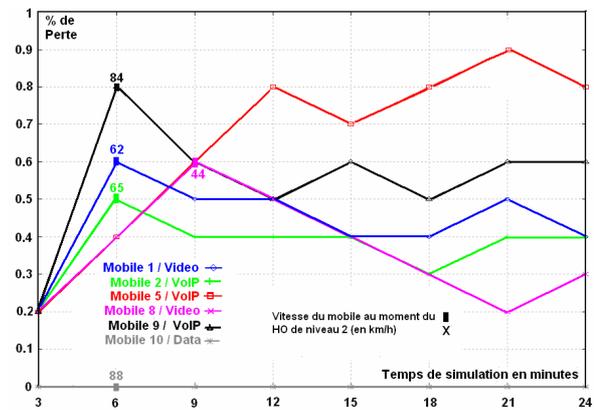


Figure 49. Taux des pertes avec FBSS

Comme pour les délais dans les figures 45 et 46, si la vitesse d'un mobile dépasse 50 km/h durant le Handover, le taux de perte des paquets dépasse 1% [73] avec le Hard Handover, ce qui n'est pas acceptable pour du trafic temps-réel. Par contre, si nous regardons les résultats obtenus avec le FBSS, les taux de pertes ne dépassent pas 1% même pendant le Handover.

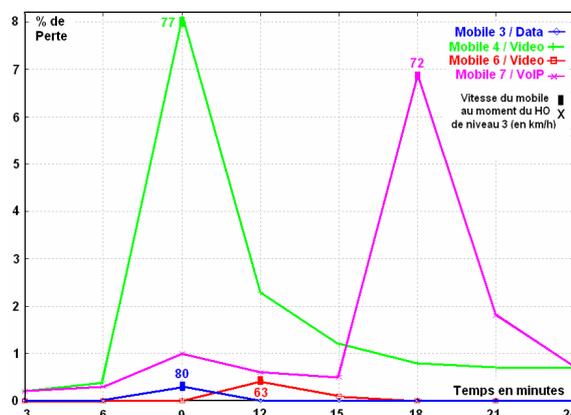


Figure 50. Taux des pertes avec MIP

Concernant la figure 50 avec MIP, nous remarquons d'abord que WiMAX ne traite pas le trafic de la même façon. Chaque trafic est traité d'une manière spécifique. Par exemple ici, les vitesses des mobiles numéro 3 et numéro 4 sont très proches, et pourtant, pendant le Handover, le mobile numéro 3 qui utilise le trafic Data perd 0.3% de ses paquets alors que le mobile numéro 4 qui utilise le trafic vidéo perd 8.2% de ses paquets. Pendant le Handover avec MIP, la QoS se dégrade et devient alors inacceptable.

Nous allons présenter maintenant dans les deux figures qui suivent : les débits observés des mobiles qui utilisent le trafic vidéo, et les débits des mobiles qui échangent du trafic VoIP :

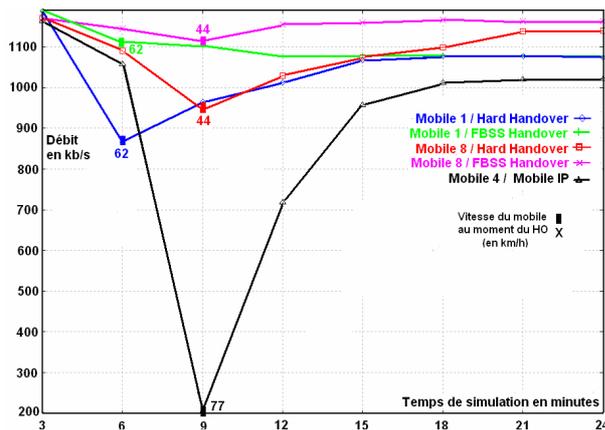


Figure 51. Débits des mobiles utilisant la vidéo

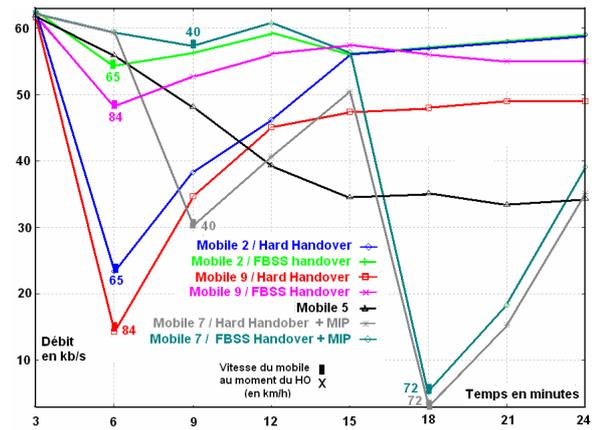


Figure 52. Débits des mobiles utilisant la VoIP

Dans la figure 51, il est clair que seule la technique de Handover qui garde le débit stable même pendant le Handover est le FBSS.

Concernant la figure 52 traitant la VoIP, le FBSS est toujours le meilleur.

Enfin, nous allons présenter les charges calculées au niveau des stations de base numéro 1 et 3 en appliquant les deux mécanismes FBSS et Hard Handover, sachant que dans nos simulations seuls les 10 mobiles déjà cités effectuent un passage entre les cellules.

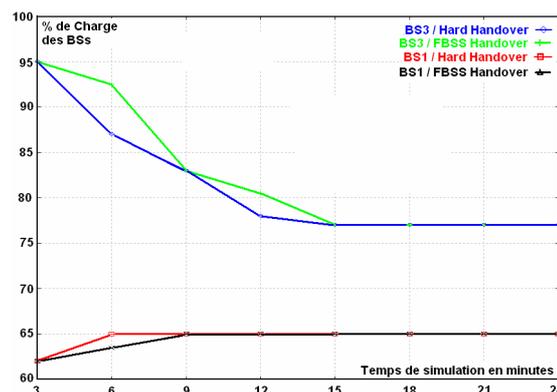


Figure 53. Charges de BS1 et BS3 avec Hard Handover et FBSS

Jusqu'à présent, et à travers les simulations des paramètres de QoS, le mécanisme FBSS est acceptable pour un bon niveau de QoS pour du trafic temps-réel, mais à travers cette dernière simulation on voit que le FBSS présente aussi des désavantages.

En regardant la figure 53, nous remarquons que le Hard Handover utilise moins de ressources que le FBSS. Cela est normal parce que avec le FBSS, le mobile se connecte avec plusieurs BSs en même temps contrairement au Hard Handover où le mobile ne communique qu'avec une seule BS.

Notons aussi que dans ces simulations, on a utilisé seulement 9 mobiles qui effectuent le Handover. Si ce nombre augmente au moment du Handover, l'occupation des ressources atteindra vite son maximum au niveau des BSs avec FBSS contrairement au cas du Hard Handover.

2.5 Conclusion

Les résultats de simulations dans le cas de figure que nous avons retenu nous permettent de conclure qu'avec le Hard Handover, le niveau de QoS est acceptable pour du trafic temps-réel avec une vitesse de déplacement allant jusqu'à 50 km/h. Le mécanisme FBSS donne de très bons résultats surtout pour les trafics temps-réel émanant des mobiles se déplaçant à grande vitesse durant le Handover. Tout se passe sans interruption des services. Mais, avant d'appliquer le FBSS, il est nécessaire de vérifier le niveau d'occupation des ressources dans les BSs.

Dans ce contexte, on peut fixer par exemple un seuil décisif pour l'utilisation ou non du FBSS en fonction des ressources.

Il est également important de signaler la large latence obtenue quand nous appliquons le MIP dans le Handover de niveau 3, ce qui agit très négativement sur le niveau de la QoS pour du trafic temps-réel. Cela va nous amener dans la section suivante à proposer une solution pour diminuer au maximum la latence durant le Handover.

3 Transfert intercellulaire de niveau 3 en utilisant MSCTP

3.1 Introduction

Dans cette partie, nous proposons de remplacer les deux mécanismes de Handover de niveau 3 définis pour l'IEEE 802.16e : le protocole Client-MIP (ou MIP) et le protocole Proxy-MIP (PMIP), par un nouveau mécanisme de Handover de niveau 4 conçu spécialement pour éviter les interruptions durant une communication. Ce protocole est Mobile SCTP : MSCTP qui a la particularité de permettre plusieurs sessions IP en même temps.

Le but principal de ce travail est de réduire le délai durant le Handover au maximum, et d'éviter l'interruption des services pendant le changement de l'adresse IP d'un mobile en déplacement. Nous allons donc comparer les résultats des simulations obtenus en appliquant CMIP, PMIP et enfin MSCTP sur un modèle de mobilité que nous allons présenter dans la section suivante.

3.2 Comparaison entre MIP, PMIP et MSCTP

Le tableau ci-dessous présente une comparaison synthétique des protocoles utilisés dans ce travail dans le cas du Handover de niveau 3 :

Protocole	CMIP/PMIP v4	MSCTP
Couche protocolaire	Réseau	Transport
Protocole de transport utilisé	TCP ou UDP	SCTP
Gestion de localisation	Oui	Non
Optimisation des routes	Non	Oui
Déploiement	Deux agents : HA & FA	Pas de dispositifs
Association	Une seule adresse IP	Plusieurs adresses IP
Technique utilisée durant le Handover	Break-before-make	Make-before-break

Tableau 9. Comparaison entre MIP, PMIP et MSCTP

3.3 Modèle des simulations et scénario de mobilité

3.3.1 Modèle des simulations

Le modèle des simulations est composé de deux cellules WiMAX avec une couverture d'un rayon de 3 km et une surface de 28 km² pour chaque cellule.

Chaque cellule appartient à un ASN différent, et les deux BSs sont connectées au même CSN via différents ASN-GW. La zone commune de Handover entre les deux cellules est d'une surface de 3 km² environ.

Le nombre de mobiles circulant aléatoirement dans chaque cellule a été fixé à 50.

3.3.2 Scénario de la mobilité

Dans ce travail, un seul scénario de mobilité est défini avec deux différentes vitesses : 50 et 100 km/h. Durant la simulation, nous allons étudier le mouvement d'une station mobile localisée au début dans la zone de couverture de la première cellule, en train de communiquer avec un serveur distant localisé dans un réseau étranger. Durant la communication, le trafic échangé de type vidéo (Visioconférence) passe par la BS et l'ASN-GW de la 1^{ère} cellule, ensuite par le CSN, puis par le réseau Internet, pour parvenir à la fin au serveur distant. (Nous avons voulu simuler un trafic temps-réel dans cette étude, donc notre choix de trafic s'est fixé sur la Visioconférence).

La MS se déplacera alors vers la deuxième cellule, en continuant sa communication avec son correspondant. Pendant le déplacement de la MS et son passage par la zone de Handover, nous allons établir une comparaison en appliquant les deux protocoles de niveau 3 proposés par l'IEEE 802.16e : CMIP et PMIP qui ne peuvent gérer qu'une seule adresse IP à la fois, et le protocole MSCTP qui utilise la technique du Multi-Homing pour permettre à la MS de maintenir plusieurs sessions IP en même temps.

A la fin, la MS va quitter définitivement la zone de Handover et la zone de couverture de la première cellule pour rejoindre la deuxième cellule. A ce moment là, la communication ne va plus passer par les composants qui gèrent la première cellule, mais va passer par la BS et l'ASN-GW de la deuxième cellule, le CSN, et enfin l'Internet pour arriver à la destination finale.

Pour exécuter le Handover avec CMIP, c'est la MS qui doit implanter le module MIP. Avec PMIP, c'est l'ASN-GW qui doit implanter le module MIP. Avec MSCTP, c'est la MS et le serveur distant qui doivent implanter le protocole MSCTP.

Le modèle de simulation fondé sur le MSCTP, ainsi que le scénario de mobilité sont illustrés dans la figure ci-dessous :

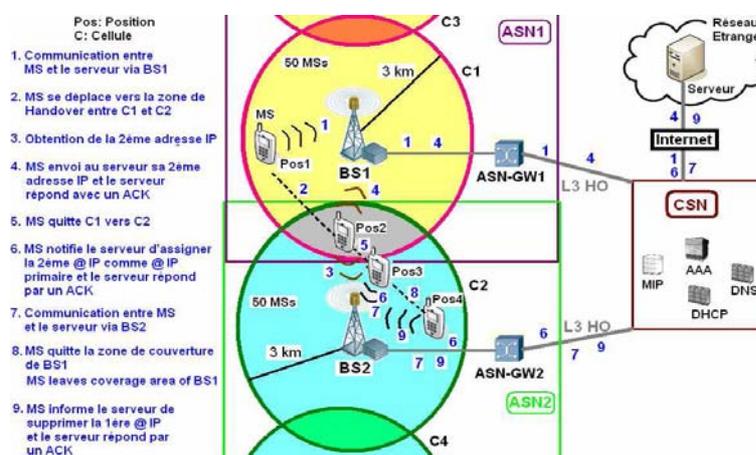


Figure 54. Modèle des simulations et scénario de mobilité

3.4 Paramètres des simulations et critères de performance

3.4.1 Paramètres des simulations

Les paramètres des simulations proposés pour les deux cellules dans le NS2 sont décrits dans le tableau ci-dessous :

Puissance du signal (P_t)	15 W
Seuil de réception (RXThresh)	9.375-13 W
Seuil de la porteuse d'envoi (CSThresh)	1.34219e-14 W
Rayon de couverture (Distance D)	3 km
Modèle de propagation radio	Two-Ray Ground [69] $P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4 L}$
Gain d'antenne d'émission (G_t)	1 dB
Gain d'antenne de réception (G_r)	1 dB
Perte du système (L)	1 dB
Hauteur d'antenne d'émission (h_t)	1.5 m
Hauteur d'antenne de réception (h_r)	1.5 m
Modulation	OFDMA
Fréquence (Freq)	3.5 GHz
Type de paquets pour les protocoles CMIP et PMIP	CBR/UDP
Type de paquets pour le protocole MSCTP	CBR/SCTP

Tableau 10. Paramètres des simulations sous NS2

La durée de la simulation a été fixée à 250 secondes, et les résultats de chaque critère de QoS sont calculés chaque 20 secondes hors de la zone de Handover, et chaque 5 secondes dans la zone de Handover. Les types de trafic utilisés dans NS2 sont : CBR / UDP quand nous appliquons CMIP et PMIP et CBR / SCTP dans le cas de MSCTP, pour générer du trafic vidéo (Visioconférence) dont la taille d'un paquet est fixé à 4960 octets.

3.4.2 Critères de performance

Les critères de performance pris en compte dans nos simulations pour établir la comparaison entre CMIP, PMIP et MSCTP sont : le délai de bout en bout, la gigue, le taux de perte des paquets, et le débit.

3.5 Résultats des simulations

Commençons par présenter les résultats des délais et des giges obtenus durant la simulation en appliquant les trois protocoles dans la phase du Handover, et en testant avec les deux vitesses : 50 et 100 km/h (faible et forte mobilité).

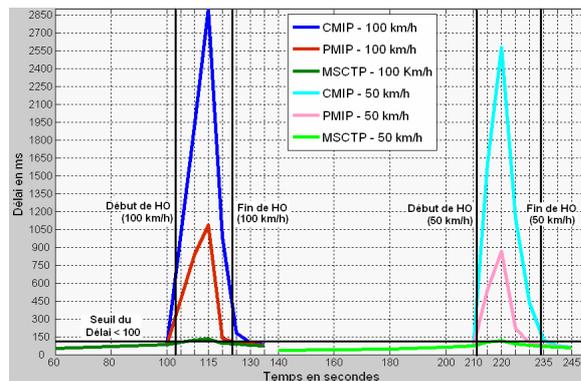


Figure 55. Les délais

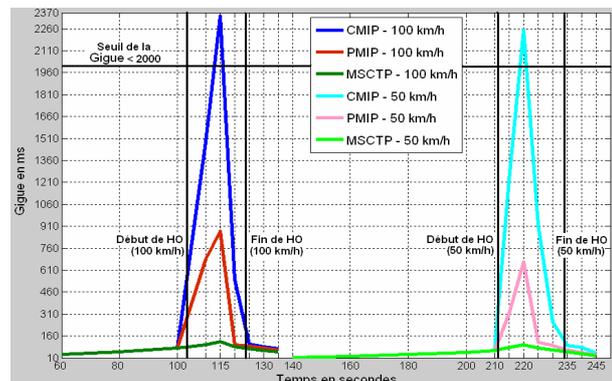


Figure 56. Les giges

Dans la figure 55, nous remarquons que le seul mécanisme qui respecte le seuil fixé pour un niveau de QoS acceptable [73] dans le cas d'un trafic vidéo pendant le Handover, est MSCTP. Grâce à la technique du Multi-Homing, MSCTP fournit des résultats meilleurs que CMIP ou encore PMIP. Nous notons aussi que les deux techniques CMIP et PMIP excèdent largement le seuil des 100 ms [73], mais PMIP produit quant à lui des résultats sensiblement meilleurs que CMIP.

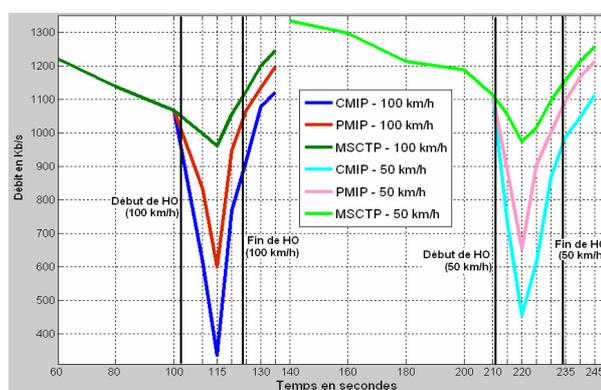
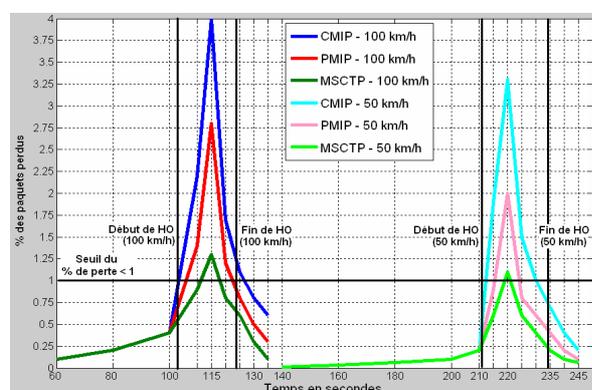
A une vitesse de 100 km/h, et en appliquant MSCTP, les délais durant le Handover excèdent légèrement le seuil. A une vitesse de 50 Km/h, les résultats sont meilleurs.

Concernant la gigue (variation du délai), nous constatons dans la deuxième figure que seules les techniques MSCTP et PMIP respectent le seuil équivalent à 2000 ms [73]. Les résultats obtenus avec MSCTP sont meilleurs que ceux obtenus avec PMIP.

Les gignes obtenues avec CMIP ne sont pas acceptables parce qu'elles dépassent le seuil.

Notons aussi que les résultats obtenus avec une vitesse moyenne de 50 km/h sont meilleurs que ceux obtenus avec une grande vitesse : 100 km/h.

Observons maintenant les courbes des taux des paquets perdus et des débits :



Dans la figure 57, et dans le contexte de mobilité moyenne, seul le mécanisme MSCTP n'excède pas le seuil fixé pour le taux de perte des paquets concernant le trafic vidéo [73]. Avec la mobilité à grande vitesse (100 km/h), et en appliquant le protocole MSCTP, les résultats excèdent légèrement le seuil.

Les résultats obtenus avec CMIP et PMIP ne sont pas acceptables durant le Handover en les comparant avec le seuil.

Dans la figure 58, et dans le contexte de la simple mobilité, MSCTP est parfait pour la métrique débit du trafic vidéo.

Dans le cas de la mobilité en grande vitesse, les résultats excèdent très légèrement le seuil fixé pour le débit des vidéos.

3.6 Conclusion

Dans le domaine des réseaux sans fil, la mobilité d'un réseau à un autre est un enjeu important. CMIP et PMIP souffrent de limitations dans le cas des applications multimédia sensibles au délai, parce que le routage triangulaire ajoute du délai, et les entêtes ajoutés dans le cadre du tunnelling augmentent la taille des paquets. Pour résoudre le problème de déplacement d'un mobile entre les réseaux sans interruption de la communication courante, le protocole MSCTP a été implanté. Dans ce travail, MSCTP est proposé comme alternative à CMIP et PMIP dans le cadre du réseau IEEE 802.16e pour du trafic multimédia.

Pendant le Handover, les utilisateurs finaux implantant le protocole MSCTP, utilisent deux interfaces adaptées. Quand une interface est déconnectée, l'autre devient disponible pour l'association. Cette technique de make-before-break peut réduire le temps de latence pendant le Handover et améliorer la QoS. De plus MSCTP est fondé sur le protocole SCTP qui est plus performant que TCP et UDP, et qui pourrait parfois les remplacer avantageusement. Enfin MSCTP ne nécessite aucun élément intermédiaire.

La seule nécessité de MSCTP est que les utilisateurs finaux doivent implanter ce protocole.

Finalement, en se référant aux résultats des simulations obtenus avec les deux vitesses du mobile, la seule technique capable de conduire à un niveau acceptable de QoS en utilisant la vidéo est MSCTP.

4 Mécanisme décisionnel flou pour la gestion du HO dans 802.16e

4.1 Introduction

Après avoir traité les problèmes de mobilité de niveau 2 et 3, en testant plusieurs protocoles de mobilité sur des scénarios proposés, et avec la variété des types de trafic (trafic temps-réel ou non) et la variété des vitesses de mobilité des utilisateurs (faible ou grande vitesse), il est important de prendre en compte tous ces paramètres et les englober dans un système, en proposant un algorithme modélisé qui gèrera ce système et permettra de décider rapidement en fonction de l'existant d'exécuter ou pas le Handover, et si oui, le protocole de mobilité à choisir au cours du Handover.

Dans cette partie, une approche fondée sur la logique floue sera présentée dans le but de gérer la mobilité et le Handover dans le réseau IEEE 802.16e. Pour cela, nous allons proposer un algorithme décisionnel qui aidera à la sélection rapide de la bonne BS et de la bonne technique à mettre en œuvre lors du Handover.

L'algorithme utilise des critères tels que : la puissance du signal reçu, la charge de la station de base, la vitesse du mobile, et des attributs tel que : le type de Handover (niveau 2 ou 3) et le type de trafic utilisé par le mobile (Visioconférence, VoIP, données).

Après la mesure des valeurs des critères et la fixation des attributs, les résultats obtenus seront comparés à une base des règles pour la décision du choix de la BS et la technique de mobilité correspondante durant le Handover.

Pour montrer l'efficacité de notre algorithme, nous allons effectuer des simulations en appliquant l'algorithme proposé et l'algorithme classique sur un modèle de mobilité composé de plusieurs cellules couvrant deux villes, et une autoroute située entre les deux villes ; sachant que la mobilité dans les deux villes est faible ou moyenne, et la mobilité sur l'autoroute est importante.

4.2 La logique floue

4.2.1 Introduction

La logique floue [74], [75] peut être vue comme une théorie qui fait face à l'incertitude des systèmes complexes, et comme une théorie approximative.

Elle a comme objectif de développer des méthodes qui peuvent effectuer le raisonnement et la résolution des problèmes qui requièrent de l'intelligence humaine. Elle permet aussi d'explorer une procédure efficace entre la précision et le coût de l'élaboration d'un modèle approché d'un système complexe.

4.2.2 Système d'inférence floue

L'inférence est le processus qui conduit à des conclusions à partir d'un ensemble de faits en utilisant un ensemble de règles.

Le système d'inférence floue est un cadre de calcul fondé sur les concepts de la théorie des ensembles flous : les règles floues « Si-Alors », et le raisonnement flou. Deux types de systèmes d'inférence floue peuvent être mis en œuvre : le type *Mamdani* et le type *Sugeno* [76]. Les différences entre ces systèmes d'inférence floue se trouvent dans les conséquents de leurs règles floues. Leurs agrégations et les processus de défuzzification diffèrent en conséquence.

Un système d'inférence floue Mamdani est composé des blocs fonctionnels suivants:

- Fuzzifier : le fuzzifier transforme les valeurs d'entrée en degrés de correspondance avec des valeurs linguistiques. Le fuzzifier trace un point net, $\underline{x} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]^T \in U$, dans un ensemble flou $A = \{(x_1, \mu_A(x_1)), (x_2, \mu_A(x_2)), \dots, (x_n, \mu_A(x_n))\}$ dans U où $\mu_A : U \rightarrow [0,1]$ est la fonction d'appartenance de l'ensemble flou A et $\mu_A(x_i)$ est le degré d'appartenance de x_i dans A .
- Base des règles floues : elle contient un nombre de règles floues « Si-Alors ». Si le système flou a n entrées et une seule sortie, ses règles floues R_j sont de la forme générale : Si x_i est A_{1j} et x_2 est A_{2j} et ... et x_n est A_{nj} , Alors y est B_j .

A_{1j} et B_j sont des ensembles flous dans $U_i \subset R$ et $V \subset R$, respectivement.

Les variables $\underline{x} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]^T \in U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$ et $y \in V$ sont appelées les variables linguistiques d'entrée et de sortie, respectivement.

- Moteur d'inférence floue : le moteur d'inférence floue effectue les opérations d'inférence sur les règles floues. Les principes de la logique floue sont utilisés pour combiner les règles floues « Si-Alors » dans la base des règles, et les ensembles flous dans $U = U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$ sont mappées dans des ensembles flous dans V . Soit $A \in U$ l'entrée du moteur d'inférence floue, et soit la règle floue représentée comme l'implication floue $R = R_{1j} \times R_{2j} \times R_{3j} \times \dots \times R_{nj} \rightarrow G_j = C$ dans $U \times V$, chaque règle floue « Si-Alors » détermine l'ensemble flou $D = B_j \in V$ utilisant la composition:

$$\mu_D(u, w) = \sup_{\underline{x} \in U} [\mu_{R \rightarrow C}(\underline{x}, y) \Delta \mu_A(\underline{x})].$$

- Défuzzifier : le défuzzifier transforme les résultats de l'inférence floue en sortie nette. Il met en correspondance les ensembles flous dans V en sortie nette $y \in V$. Une méthode de défuzzification populaire est le barycentre de calcul qui renvoie le centre de l'aire sous la courbe donnée par : $y = \frac{\sum \mu_B(y)}{\sum (\mu_B(y))}$ où y est le centre de l'ensemble flou C . D'autres méthodes de défuzzification existent dans la littérature. Le système d'inférence floue est présenté dans la figure 59, où l'entrée et la sortie du système flou sont : $\underline{x} \in R^N$ et $y \in R$, respectivement.

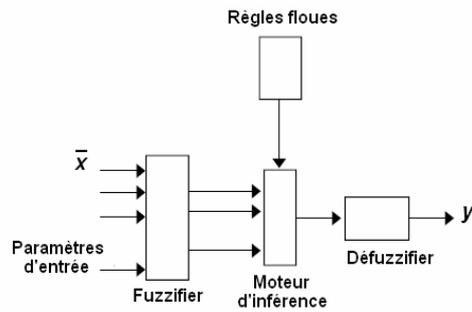


Figure 59. Système d'inférence floue

4.3 Algorithme décisionnel fondé sur la logique floue

Un algorithme de Handover doit être capable de prendre la décision finale du Handover en se référant à des paramètres d'entrée. Nous étudions dans cette section un algorithme adaptatif multi-critères multi-attributs pour la décision du Handover. Il intègre la logique floue en raison de la capacité inhérente de cette méthode de modélisation à résoudre des problèmes présentant l'imprécision et le fait que de nombreux termes utilisés pour décrire les signaux radio sont flous par nature [77], [78]. L'algorithme donne aux utilisateurs la possibilité d'influencer le résultat du Handover en spécifiant les préférences des utilisateurs telles que : les préférences des usagers du réseau sans fil et la QoS requise. La logique floue peut être exploitée pour développer des solutions approximatives qui sont à la fois rentables et très utiles.

4.3.1 Paramètres d'entrée

Plusieurs paramètres d'entrée sont définis dans ce travail, ils sont divisés en deux classes : les attributs et les critères.

4.3.1.1 Les attributs

Type de Handover : c'est le type de Handover qui sera exécuté par la station mobile lors de son passage entre deux cellules WiMAX. Le type peut être de niveau 3 (changement d'adresse IP) ou de niveau 2 (pas de changement de l'adresse IP).

Type de Trafic : c'est le type de trafic échangé entre une station mobile et sa correspondante pendant le Handover. Dans ce travail nous avons considéré 3 types de trafic : Vidéo (Visioconférence), VoIP et Data.

4.3.1.2 Les critères

Meilleur signal reçu : avant le processus du Handover, la MS va détecter un ou plusieurs signaux provenant des BSs situées en voisinage. Le signal le plus puissant reçu est le meilleur choisi par le mobile.

Charge de la station de base : c'est le taux d'occupation de ressources appartenant à la station de base candidate durant le Handover.

Timer : il est intégré dans la MS. Son rôle est d'accorder un certain temps au mobile pour qu'il puisse réessayer de se reconnecter à une BS après sa première tentative de connexion négative qui indique que la BS est occupée.

Vitesse : c'est la vitesse de la MS en déplacement durant le Handover.

Autre signal reçu et autre charge de BS : dans le cas où le type de Handover entre les deux cellules est de niveau 2, la vitesse du mobile en déplacement est élevée, et le trafic est sensible au délai. Nous décidons d'utiliser, à ce moment là, le mécanisme FBSS durant le Handover. Grâce à ce mécanisme, le mobile peut se connecter avec plusieurs stations de base en même temps. Donc les deux paramètres : autre signal reçu et autre charge de BS, seront ceux de ces stations de base ajoutées dans le Diversity Set.

4.3.2 Algorithme proposé

Dans cette section, nous présentons l'algorithme proposé pour le Handover qui repose sur la logique floue. La figure 60 synthétise cet algorithme.

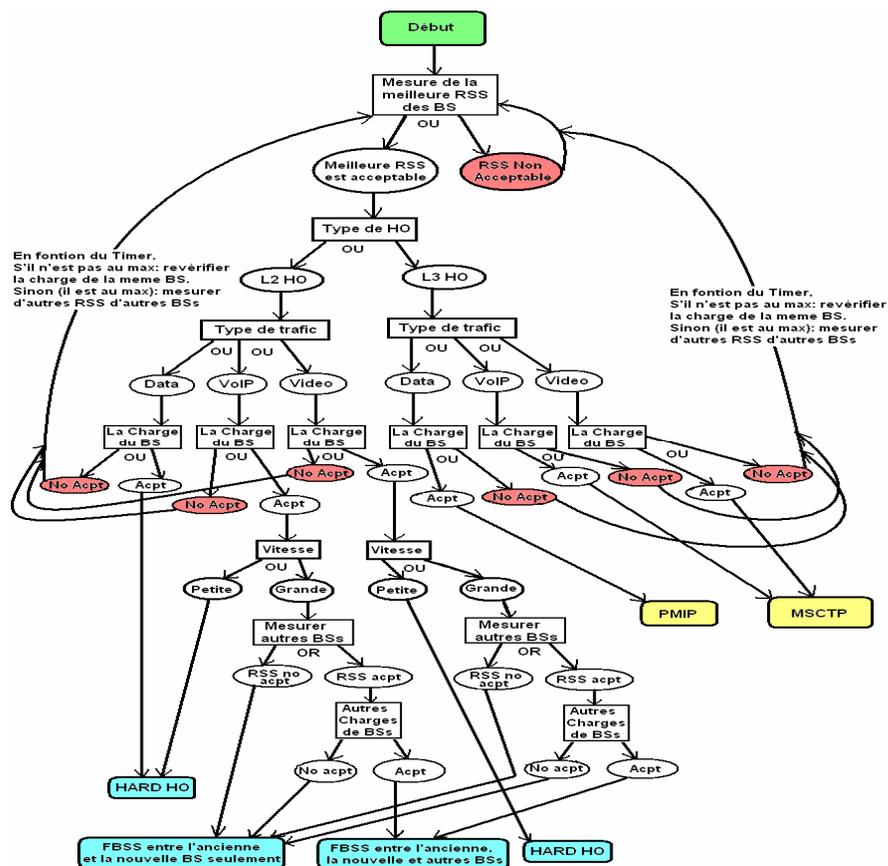


Figure 60. Algorithme de Handover proposé

Au début, quand la MS va exécuter un Handover, elle mesure d'abord les puissances des signaux reçus (RSS) des BSs voisines, et choisit la BS ayant le meilleur RSS. Si le niveau du meilleur signal choisi n'est pas acceptable, le mobile va reprendre les mesures des signaux. Sinon, si le niveau du signal est acceptable, nous allons vérifier le type de Handover, ensuite le type de trafic utilisé, et enfin la charge de la BS.

Si le pourcentage de la charge de la BS n'est pas acceptable, alors un Timer sera déclenché pour permettre à la MS de re-vérifier la disponibilité de la BS. Si le Timer expire et que la BS n'est toujours pas disponible, la MS va procéder de nouveau à la première étape de la mesure des signaux. Sinon, si la BS sera disponible avant l'expiration du Timer ou même avant son déclenchement, nous passerons à l'étape suivante de l'algorithme : découverte du type de Handover.

Lors de l'étape de découverte du type de Handover, si le choix est fixé sur un Handover de niveau 3, alors après la vérification de la charge de la BS, la MS peut décider d'exécuter le

Handover avec le protocole PMIP ou MSCTP. Et supposons que la MS décide d'appliquer MSCTP lors du Handover, alors qu'elle est en train d'échanger avec son correspondant par exemple un trafic IP temps réel contrôlé avec un autre protocole que SCTP (par exemple TCP). Dans ce cas, et avant le Handover, la MS doit prévenir son correspondant (qui doit implémenter obligatoirement lui aussi le protocole MSCTP) de sa décision, et elle le prévient aussi qu'ils vont échanger le même trafic IP en cours, mais contrôlé avec MSCTP au lieu de l'autre protocole de transport. Et avec la confirmation du correspondant, le Handover avec MSCTP pourra être exécuté.

Mais, si lors de l'étape de découverte du type de Handover, le choix sera fixé sur un Handover de niveau 2 et que la charge de la BS est acceptable, nous allons, en plus, vérifier la vitesse du mobile. Si la vitesse est faible, ou le type de trafic est Data, alors nous déciderons d'exécuter le Hard Handover. En revanche si la vitesse est élevée et que le trafic est de type vidéo ou VoIP, alors la MS va mesurer la RSS et la charge des BSs voisines. Si ces deux dernières métriques sont acceptables, nous déciderons d'appliquer le FBSS entre les BSs concernées par le Handover.

4.3.3 Fuzzification

L'étape de fuzzification transforme les valeurs d'entrée en noms de fonctions d'appartenance, et en degrés d'appartenance dans les fonctions.

Les critères d'entrée: RSS, charge de BS, Timer, et vitesse, sont fuzzifiés en utilisant les fonctions d'appartenance prédéfinies et illustrées dans les figures qui vont suivre (figures 61 à 68).

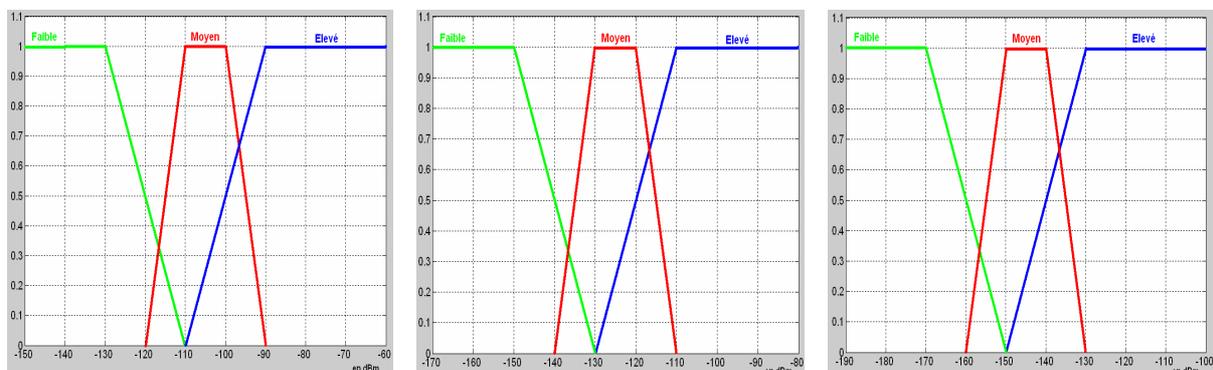
Chaque fonction d'appartenance est assignée à plusieurs ensembles flous, par exemple les valeurs de la fonction *vitesse* consistent aux termes linguistiques : «Elevé», «Moyen» et «Faible». Ces ensembles sont mis en correspondance avec des fonctions d'appartenance gaussiennes correspondantes.

Le modèle de mobilité proposé est composé de plusieurs cellules avec différents rayons variant entre 1 et 10 km en fonction de la nature de l'espace couvert (pour plus de détails voir le modèle de mobilité en section 4.4.1). Donc, pour la variable RSS, nous allons définir trois fonctions d'appartenance pour les couvertures de rayon respectivement égaux à 1, 3 et 10 km, et chacune des fonctions est assignée à trois ensembles flous.

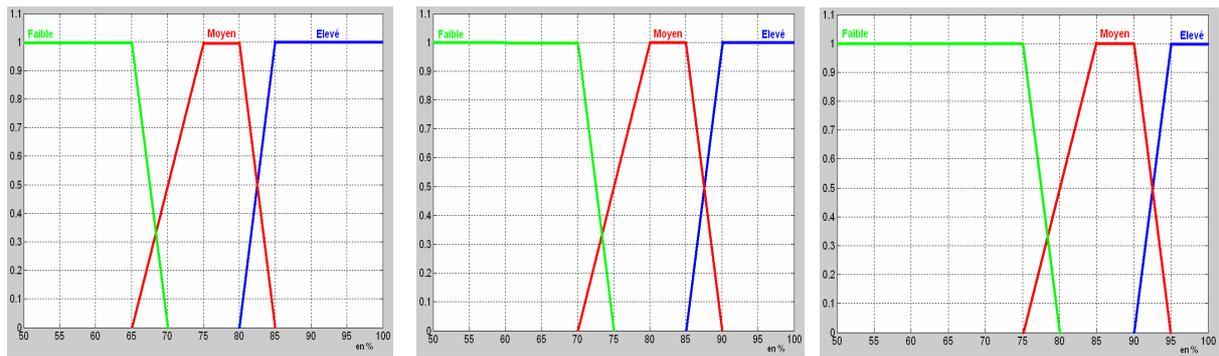
Pour le trafic, nous utilisons trois types, donc pour la variable charge de BS, nous définissons trois fonctions d'appartenance pour les trois types, avec trois ensembles flous pour chaque fonction.

Ensuite pour la variable Timer nous définissons une seule fonction d'appartenance attribuée à deux ensembles flous.

Enfin pour la variable vitesse nous définissons une seule fonction d'appartenance.



Figures 61, 62 et 63. Fonctions d'appartenance RSS pour un rayon de couverture de BS = 1, 3 et 10 km



Figures 64, 65 et 66. Fonctions d'appartenance charge de BS pour les trafics: Vidéo, VoIP et Data

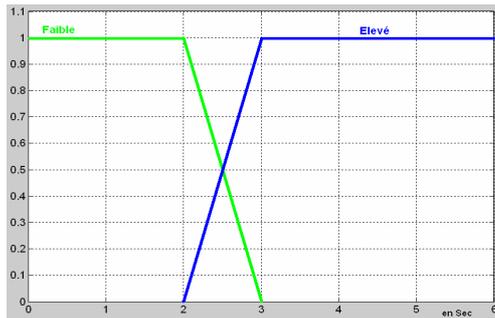


Figure 67. Fonction d'appartenance Timer

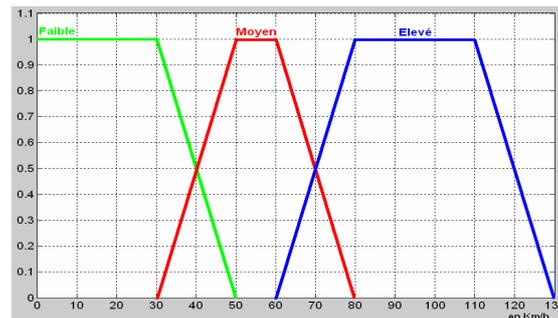


Figure 68. Fonction d'appartenance Vitesse

Un récapitulatif décrivant les fonctions d'appartenance et les limites des ensembles flous correspondants est illustré dans le tableau ci-dessous, sachant que tous les valeurs proposées sont inspirées des simulations et des résultats obtenus des travaux déjà effectués dans le cadre de la mobilité dans le WiMAX mobile. (Sections 1.1, 1.2 et 1.3 dans ce même chapitre).

Nom de fonction	Limites de la variable	Limites de l'ensemble flou Elevé	Maximum d'appartenance à Elevé	Limites de Moyen	Max app à Moyen	Limites de Faible	Max app à Faible
RSS en dBm (1 km)	entre -150 et -60	entre -110 et -60	entre -90 et -60	entre -120 et -90	entre -110 et -100	entre -150 et -110	entre -150 et -130
RSS en dBm (3 km)	entre -170 et -80	entre -130 et -80	entre -110 et -80	entre -140 et -110	entre -130 et -120	entre -170 et -130	entre -170 et -150
RSS en dBm (10 km)	entre -190 et -100	entre -150 et -100	entre -130 et -100	entre -160 et -130	entre -150 et -140	entre -190 et -150	entre -190 et -170
Charge BS en % (vidéo)	entre 50 et 100	entre 80 et 100	entre 85 et 100	entre 65 et 85	entre 75 et 80	entre 50 et 70	entre 50 et 65
Charge BS en % (VoIP)	entre 50 et 100	entre 85 et 100	entre 90 et 100	entre 70 et 90	entre 80 et 85	entre 50 et 75	entre 50 et 70
Charge BS en % (Data)	entre 50 et 100	entre 90 et 100	entre 95 et 100	entre 75 et 95	entre 85 et 90	entre 50 et 80	entre 50 et 75
Timer en sec	entre 0 et 6	entre 2 et 6	entre 3 et 6			entre 0 et 3	entre 0 et 2
Vitesse en km/h	entre 0 et 130	entre 60 et 130	entre 80 et 110	entre 30 et 80	entre 50 et 60	entre 0 et 50	entre 0 et 30

Tableau 11. Fonctions d'appartenance et ensembles flous

4.3.4 Evaluation des règles

Les valeurs d'entrée fuzzifiées sont utilisées pour évaluer les règles et obtenir la décision du Handover flou (Fuzzy Handover Decision : FHD).

Puisque nous avons huit paramètres d'entrée répartis comme suit : six avec trois ensembles flous pour chacun, et deux (type de Handover et Timer) avec deux ensembles flous pour chacun, alors le nombre maximal possible des règles dans notre base des règles sera :

$3^6 * 2^2 = 2916$. (Si on n'applique pas FBSS le nombre maximal va diminuer à $3^4 * 2^2 = 324$).

La base des règles floues contient des règles « Si-Alors », et règles les plus importantes sont présentées sur la table 3 dans l'annexe.

4.3.5 Défuzzification

La troisième et dernière étape est la défuzzification. La valeur de la FHD est déterminée en

se référant sur la formule suivante : Probabilité du Handover = $\frac{\sum M_i \times W_i}{\sum M_i}$ (1)

M_i est le degré d'appartenance dans la sortie de singleton i et W_i est la valeur du poids de la probabilité de Handover pour la sortie de singleton i .

Probabilité du Handover	Oui	Probablement Oui	Probablement Non	Non
Poids	1	0.7	0.4	0.1

Tableau 12. Poids de la probabilité de Handover

La probabilité de Handover nette calculée après la défuzzification est utilisée pour décider de l'exécution du Handover :

Si La probabilité de Handover > 0.6, **alors** initier le Handover, **sinon** ne rien faire.

4.3.6 Exemple pratique

Pour mieux comprendre les étapes à suivre en appliquant notre algorithme fondé sur la logique floue, un exemple pratique est présenté dans l'annexe.

4.4 Modèle des simulations et scénarios de mobilité

4.4.1 Modèle des simulations

Le modèle de mobilité proposé pour les simulations est le suivant : son infrastructure est composée de deux villes, et chacune est composée de six cellules. Les deux villes sont reliées par une autoroute composée de quatre cellules. L'autoroute est localisée dans une zone rurale, donc les quatre cellules de l'autoroute sont couvertes par des stations de base avec une portée de 10 km de rayon pour chaque cellule.

Les six cellules localisées dans chaque ville classée zone urbaine, sont de rayon de couverture variant entre 1 et 3 km.

Dans ce modèle, nous proposons quatre ASNs : les cellules avec la même couleur (voir la figure 69 ci-dessous) appartiennent au même ASN, et les deux ASNs appartiennent au même CSN (nous proposons deux CSNs dans ce modèle). Le Handover entre deux cellules de même couleur est de niveau 2, et le Handover entre deux cellules de couleurs différentes est de niveau 3. Les véhicules transportant les abonnés mobiles au WiMAX traversent l'autoroute en grande vitesse, et circulent dans les deux villes en faible ou moyenne vitesse.

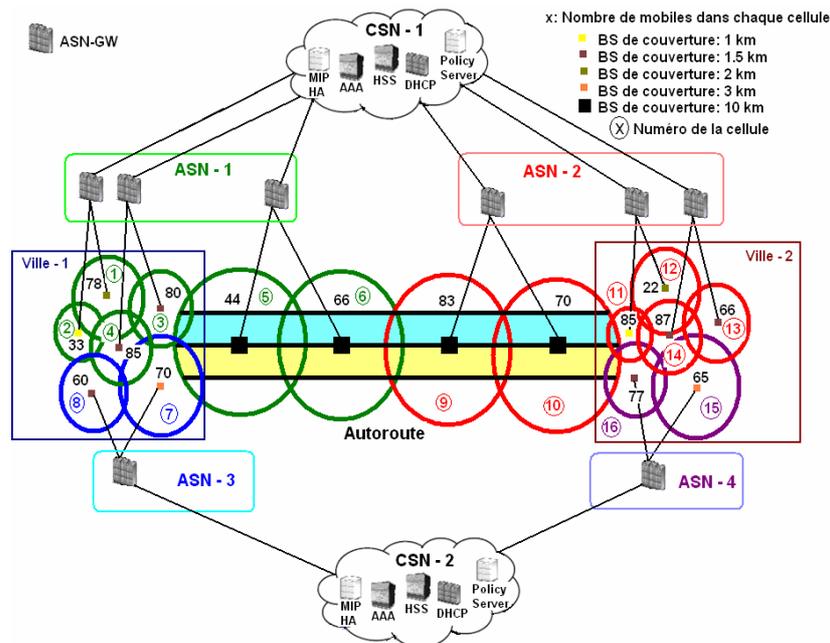


Figure 69. Topologie du modèle des simulations

4.4.2 Scénarios de la mobilité

Dans nos simulations, deux scénarios de mobilité sont choisis pour deux stations mobiles en mouvement (voir la figure 70 ci-dessous pour suivre les deux chemins de mobilité). Et nous allons tester chaque type de trafic dans chaque scénario de mobilité. Nous allons aussi comparer le niveau de QoS obtenu par notre algorithme avec celui du Handover classique avec l'IEEE 802.16e.

La description détaillée des scénarios de mobilité est résumée dans les deux tables 1 et 2 illustrés dans l'annexe (notons que C_i représente la cellule numéro i , les numéros des cellules sont illustrés dans la figure 69).

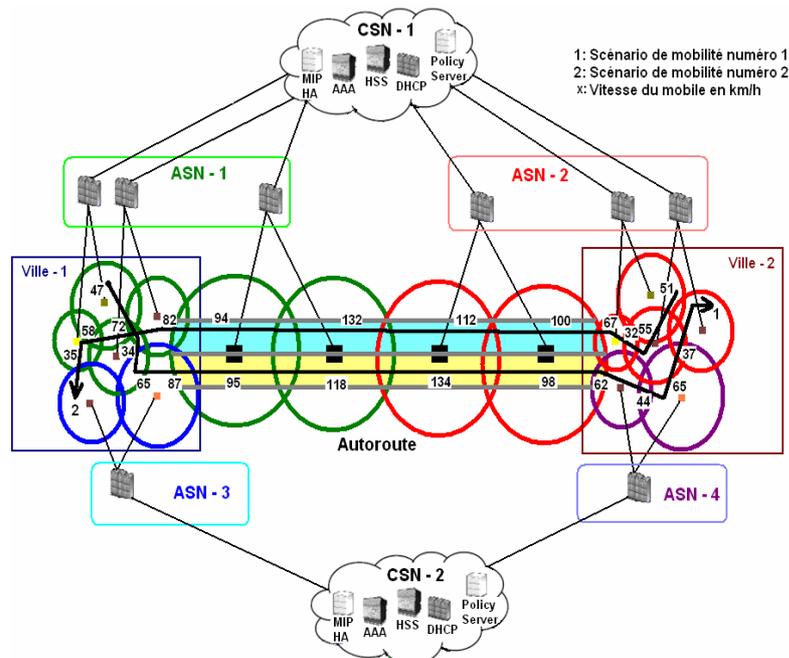


Figure 70. Scénarios

4.5 Paramètres des simulations et critères de performance

4.5.1 Paramètres des simulations

Les paramètres des simulations adoptés sous le simulateur NS2 sont illustrés dans les deux tableaux ci-dessous :

Type de trafic	VoIP	Video	Data
Taille d'un paquet en octets	160	2480	1240
Modèle de trafic avec le protocole MSCTP	CBR / SCTP		
Modèle de trafic avec autres protocoles que MSCTP	CBR / UDP		

Tableau 13. Paramètres du trafic

Rayon de couverture des BSs en km	1	1.5	2	3	10
Puissance du signal (Pt _t)	15 W				
Seuil de réception (RXThresh _t)	7.593e-11 W	1.5e-11 W	4.746e-12 W	9.375e-13 W	7.593e-15 W
Seuil de la porteuse d'envoi (CSThresh _t)	2.65e-11 W	8.75e-12 W	1.362e-12 W	5.761e-13 W	2.138e-16 W
Modèle de propagation radio	Two-Ray Ground [69] $P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4 L}$				
Gain d'antenne d'émission (Gt _t)	1 dB				
Gain d'antenne de réception (Gr _t)	1 dB				
Perte du système (L _t)	1 dB				
Hauteur d'antenne d'émission (ht _t)	1.5 m				
Hauteur d'antenne de réception (hr _t)	1.5 m				
Modulation	OFDMA				
Fréquence (Freq _t)	3.5 Ghz				

Tableau 14. Paramètres des simulations sous NS2

4.5.2 Critères de performance

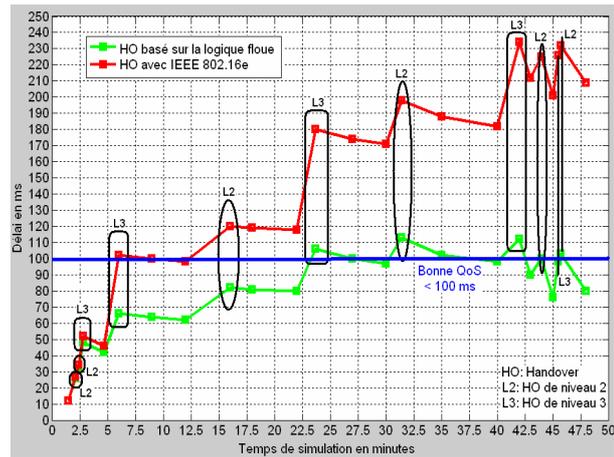
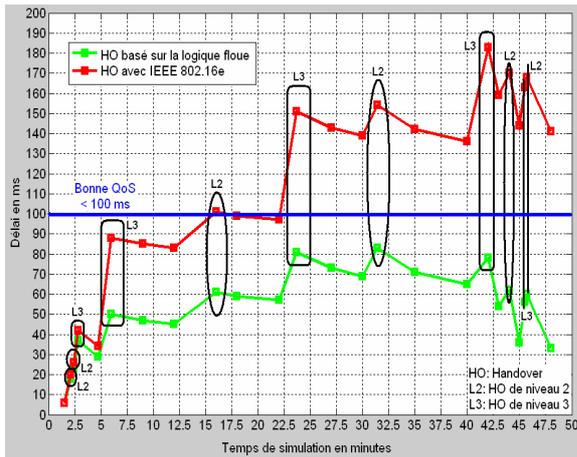
Les critères de performance adoptés dans ce travail sont : le délai de bout en bout, le taux des paquets perdus, et le débit.

4.6 Résultats des simulations

4.6.1 Les délais

Nous présentons dans cette partie les résultats de la comparaison entre le Handover classique dans le WiMAX mobile et l'algorithme fondé sur la logique floue. Nous commençons avec le premier scénario de déplacement en testant chaque fois un des trois types de trafic.

* Premier scénario :



Figures 71 et 72. Délais du 1^{er} scénario avec le trafic VoIP et le trafic Vidéo

La figure 71 illustre les délais mesurés durant le déplacement du mobile et son passage à travers des zones de Handover de niveau 2 et 3. Le trafic échangé dans ce cas est la VoIP. Un seuil a été fixé dans cette simulation à 100 ms [73] pour pouvoir évaluer le degré de la QoS pour du trafic VoIP. Si la valeur de délai est supérieure à 100 ms alors la QoS n'est pas acceptable, sinon la QoS est acceptable.

En général dans la figure, l'algorithme proposé ne dépasse pas le seuil fixé, ce qui reflète un bon niveau de QoS pour le trafic VoIP. En regardant la courbe tracée pour le Handover classique avec le WiMAX mobile, entre 0 et 22.3 minutes le niveau de QoS est acceptable, mais après, le niveau de la QoS commence à se dégrader en excédant le seuil pour devenir inacceptable.

Notons aussi que la différence entre les valeurs des délais des deux courbes durant le Handover de niveau 2 est inférieure à celle du Handover de niveau 3. En effet avec le Handover de niveau 2 nous utilisons dans l'algorithme proposé les mêmes techniques que le Handover classique. Pour le Handover de niveau 3, nous utilisons au contraire des techniques différentes (MSCTP pour le trafic temps-réel).

Dans la figure 72, le seuil fixé pour le trafic vidéo dans le but d'évaluer le niveau de QoS est aussi égal à 100 ms [73]. Nous remarquons ici que l'algorithme proposé donne des résultats meilleurs que l'autre. La courbe de l'algorithme proposé dépasse parfois très légèrement le seuil, contrairement à la courbe présentant le Handover classique qui excède largement le seuil après 12 minutes de simulation.

Notons ici que le trafic vidéo subit un délai plus important que le trafic VoIP, et cela parce que la taille d'un paquet vidéo est supérieure à celle d'un paquet VoIP.

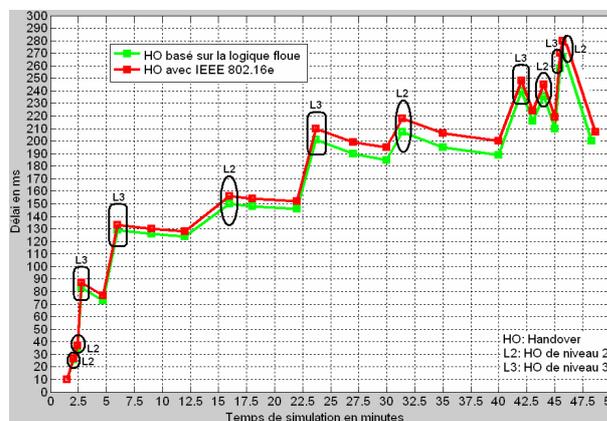
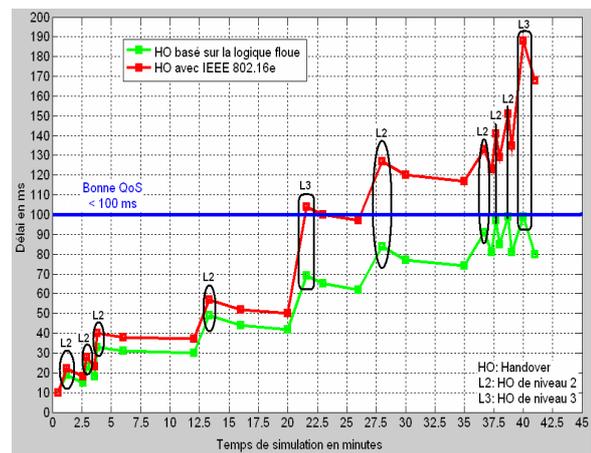
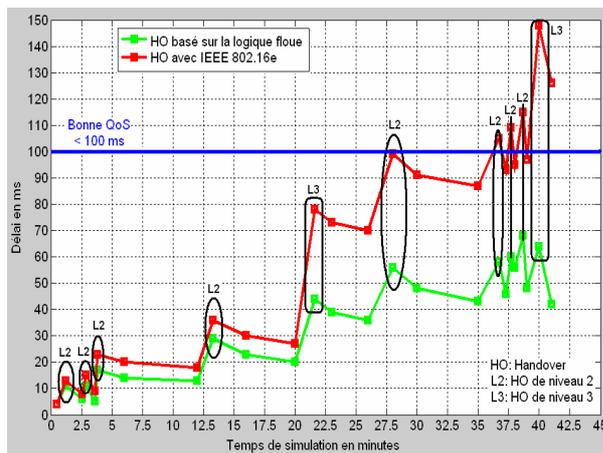


Figure 73. Délais du 1^{er} scénario avec le trafic Data

Avec le trafic Data, la différence entre les deux courbes est très légère, parce que nous utilisons les mêmes techniques de Handover. Donc, cette légère différence est due à la rapidité de traitement et de décision entre l'algorithme proposé et le Handover dans IEEE 802.16e.

Notons ici que la QoS du trafic Data n'est pas influencé par le paramètre délai de bout en bout [73].

* Deuxième scénario :



Figures 74 et 75. Délais de 2^{ème} scénario avec le trafic VoIP et le trafic Vidéo

Dans la figure 74, contrairement au cas de la figure 69 (délais du 1^{er} scénario avec le trafic VoIP) ; avec le 2^{ème} scénario, la courbe du Handover classique excède le seuil seulement à la fin de la simulation (après 37 minutes) [73]. Avec le deuxième scénario, le mobile exécute durant son déplacement moins de Handovers en général et moins de Handovers de niveau 3 que dans le premier scénario. Notons aussi qu'avec le scénario 2, les résultats de la courbe de l'algorithme proposé sont meilleurs que ceux de 1^{er} scénario.

Dans la figure 75, contrairement aux résultats obtenus précédemment ; avec le deuxième scénario, la courbe de l'algorithme proposé ne dépasse jamais le seuil, et la courbe du Handover classique commence à dépasser le seuil au milieu de la simulation (après 27 minutes contre 12 minutes dans le premier scénario).

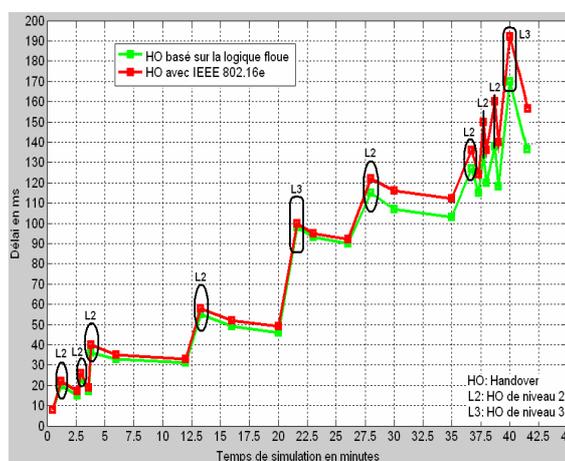


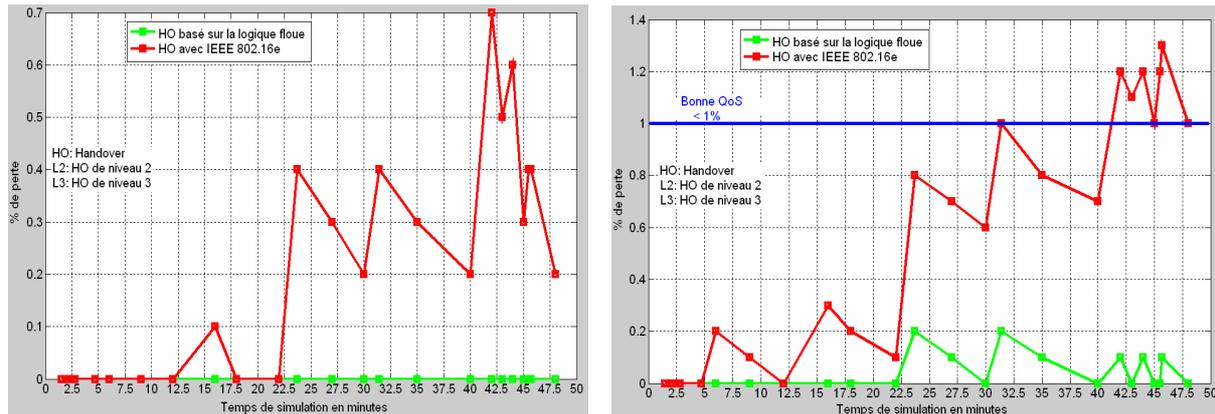
Figure 76. Délais du 2^{ème} scénario avec le trafic Data

Comme pour le premier scénario, avec le 2^{ème} scénario, la différence entre les deux courbes est très faible, mais les valeurs obtenues dans le 2^{ème} scénario sont meilleures qu'avec le premier scénario.

4.6.2 Les taux des paquets perdus

Nous présentons dans cette partie les résultats de la comparaison entre l'algorithme proposé et le Handover dans le WiMAX mobile pour le taux de paquets perdus.

* Premier scénario :



Figures 77 et 78. Taux des paquets perdus du 1^{er} scénario avec le trafic VoIP et le trafic Vidéo

Dans la figure 77, nous remarquons qu'avec l'algorithme proposé, il n'y a pas de paquets perdus durant toute la simulation. Avec le Handover classique, il y a des paquets perdus variant entre 0 et 0.7%, ce qui est acceptable pour du trafic VoIP, le seuil qui évalue le niveau de QoS est fixé à 1% [73] (si les valeurs sont supérieures à ce seuil la QoS n'est pas acceptable).

En utilisant le trafic vidéo dans la figure 78, les résultats de perte sont supérieurs à ceux obtenus avec la VoIP. La courbe de l'algorithme proposé n'excède pas 0.2% de perte, mais la courbe du Handover classique excède à la fin de la simulation le seuil (entre 42 et 47.5 minutes) [73].

La différence est due à l'utilisation du protocole MSCTP dans les Handovers de niveau 3, parce que ce protocole utilise la technique de multihoming, contrairement à PMIP qui ne peut ouvrir qu'une session IP au cours d'une connexion.

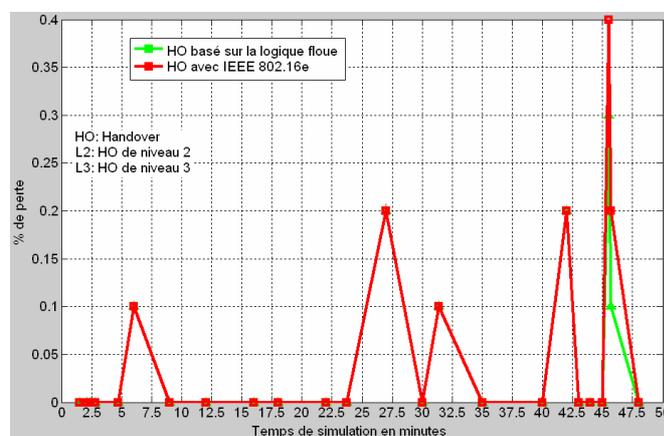
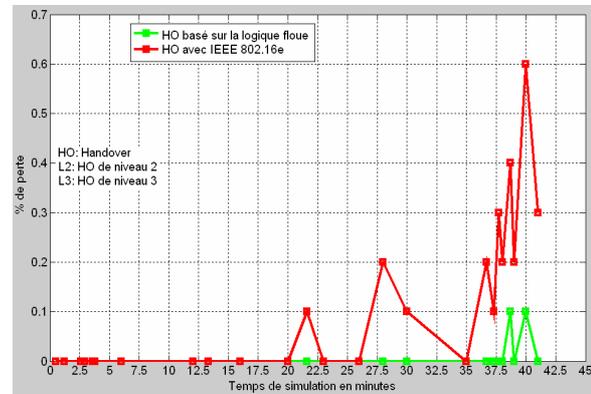
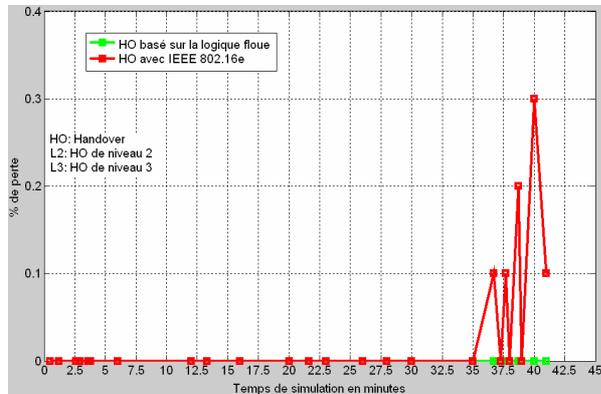


Figure 79. Taux des paquets perdus du 1^{er} scénario avec le trafic Data

Avec le trafic Data, les courbes sont très similaires, parce que les deux algorithmes utilisent les mêmes techniques durant le Handover. Le maximum des pertes est de 0.4%, et les maxima des pics apparaissent lors des Handovers de niveau 3.

* Deuxième scénario :



Figures 80 et 81. Taux des paquets perdus du 2^{ème} scénario avec le trafic VoIP et le trafic Vidéo

Dans la figure 80, comme pour le premier scénario, la courbe de l'algorithme proposé est toujours nulle. La valeur maximale obtenue avec l'autre courbe est de 0.3%. Les résultats obtenus avec le deuxième scénario sont meilleurs que ceux obtenus avec le premier scénario, parce que il y a moins de Handovers de niveau 2 dans le 2^{ème} scénario que dans le 1^{er}.

Dans la figure 81, les résultats obtenus pour le trafic vidéo avec le 2^{ème} scénario sont acceptables pour les deux algorithmes, parce qu'ils n'excèdent pas le seuil fixé à 1% [73].

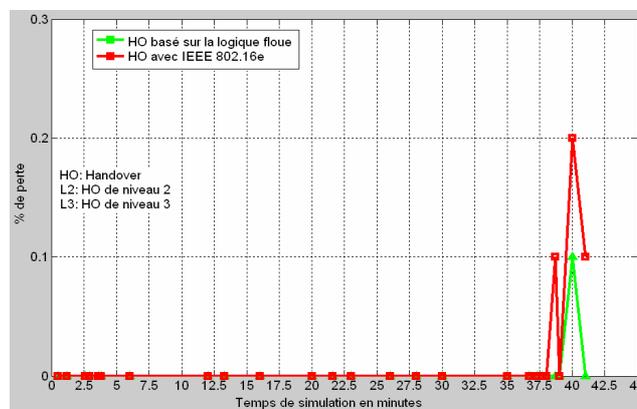


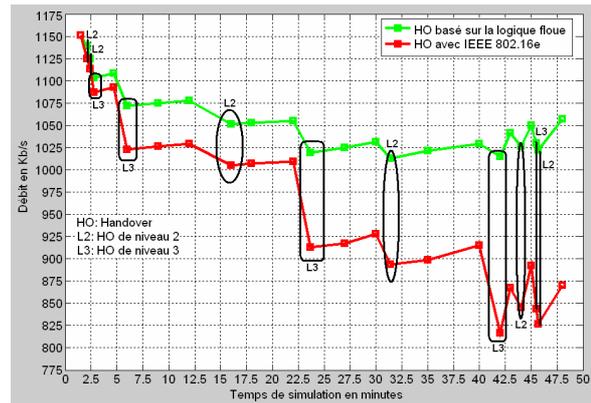
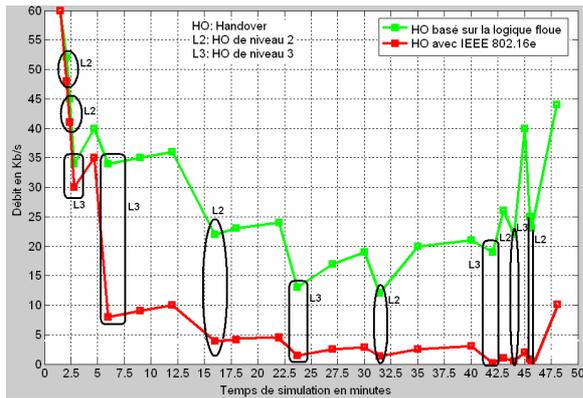
Figure 82. Taux des paquets perdus du 2^{ème} scénario avec le trafic Data

Cette figure présente le minimum des paquets perdus obtenu de tous les cas précédents. La valeur maximale obtenue avec l'algorithme proposé est de 0.1%, et avec le Handover classique est de 0.2%.

4.6.3 Les débits

Dans cette partie nous présentons finalement les résultats de comparaison entre les deux algorithmes pour le paramètre débit.

* Premier scénario :



Figures 83 et 84. Débits du 1^{er} scénario avec le trafic VoIP et le trafic Vidéo

Dans la figure 83, la courbe de l’algorithme proposé reflète de bons résultats pour le paramètre débit.

Avec le premier scénario utilisant le trafic vidéo dans la figure 84, la courbe de l’algorithme proposé reflète un niveau acceptable de QoS.

Durant le Handover de niveau 3, les valeurs de l’algorithme classique diminuent plus qu’avec l’algorithme proposé.

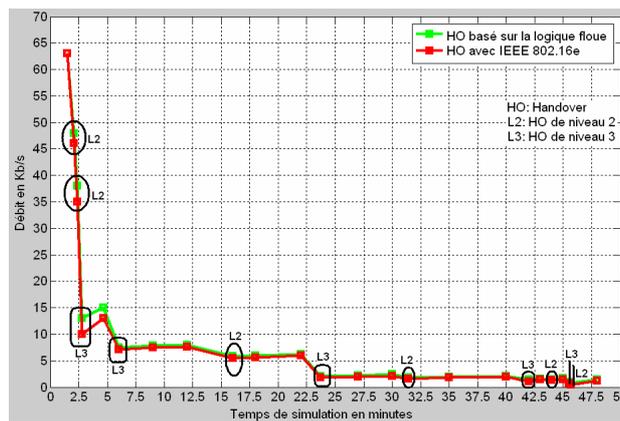
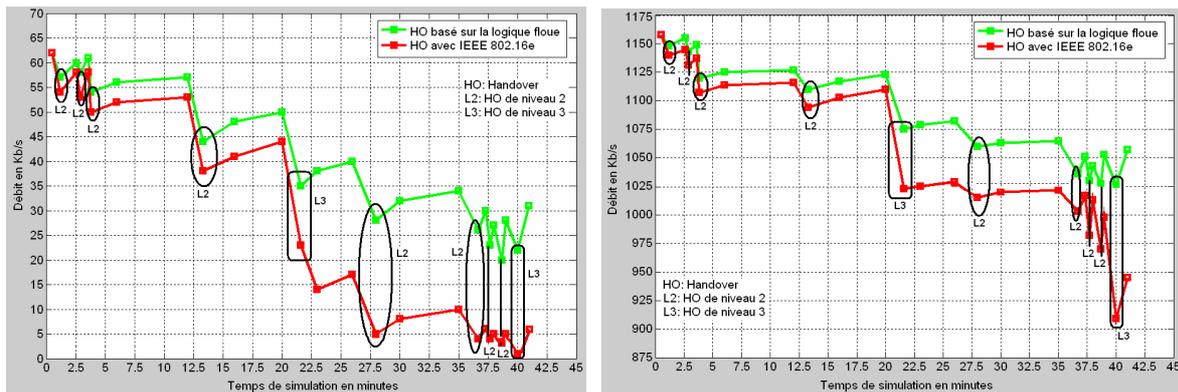


Figure 85. Débit du 1^{er} scénario avec le trafic Data

Dans la figure 85, les deux courbes sont presque similaires. Durant le Handover, les valeurs diminuent, et après le Handover (durant la communication dans les cellules) les débits augmentent.

Finalement, nous allons présenter les résultats du deuxième scénario avec les trois types de trafic.

* Deuxième scénario :



Figures 86 et 87. Débits du 2^{ème} scénario avec le trafic VoIP et le trafic Vidéo

Dans la figure 86, le 2^{ème} scénario qui contient moins de Handovers et de Handovers de niveau 3 que le premier scénario, produit des résultats meilleurs que le premier scénario. Les deux courbes sont acceptables dans cette figure.

Avec le trafic vidéo dans la figure 87, seule la courbe de l’algorithme proposé reflète un niveau de QoS acceptable. La courbe du Handover classique commence à se dégrader après 35 minutes de simulation.

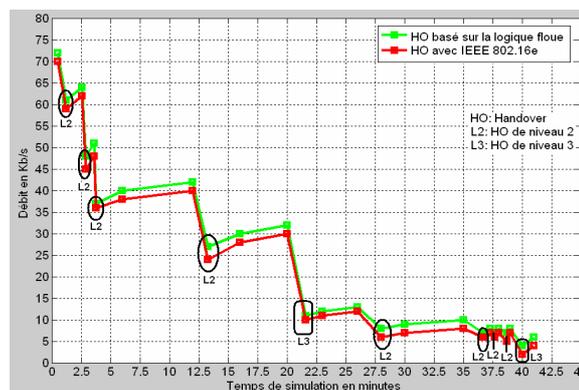


Figure 88. Débit du 2^{ème} scénario avec le trafic Data

Finalement, avec le trafic Data, les deux courbes sont presque similaires

4.7 Conclusion

Dans ce travail, nous avons essayé d’améliorer la QoS durant le Handover pour les trafics temps-réel dans l’IEEE 802.16e. Pour cela, nous avons proposé un algorithme décisionnel modélisé avec la logique floue et fondé sur plusieurs paramètres d’entrée qui s’appliquent à des tables de règles pour aider le mobile à prendre une bonne et rapide décision en choisissant la meilleure technique durant le Handover. Ensuite, nous avons simulé l’algorithme proposé (sous NS2) en se reposant sur plusieurs paramètres de QoS, et en comparant ses résultats avec ceux que nous obtenons en simulant le Handover classique avec l’IEEE 802.16e.

En conclusion, les résultats de notre algorithme sont acceptables et conformes au niveau de QoS requis pour chaque type de trafic. Ils sont, en plus, meilleurs que ceux obtenus avec la technique du Handover classique.

Dan ce chapitre, le travail s’est focalisé sur la mobilité dans IEEE 802.16e. Dans le chapitre qui va suivre, les travaux vont converger vers l’interconnexion et l’interopérabilité du WiMAX mobile avec d’autres technologies toujours en prenant compte de la mobilité des utilisateurs.

Chapitre III. INTERCONNEXION DU 802.16e AVEC LES RESEAUX

Après avoir traité le problème de la mobilité horizontale au sein d'une seule technologie, qui a été dans notre cas le WiMAX mobile, nous allons nous intéresser aux problèmes de la mobilité diagonale (entre deux technologies de même famille) et à la mobilité verticale (entre deux technologies différentes). L'intérêt principal d'une telle problématique est de réaliser l'un des buts de la 4G qui se résume sur l'interopérabilité et le passage transparent entre différentes technologies. Pour cela nous allons proposer des modèles d'interconnexion entre le WiMAX mobile (technologie candidate à la 4G) et d'autres technologies de communication à la fois différentes et très utilisées actuellement.

Donc, nous allons proposer dans cette partie des modèles d'interconnexion et d'interopérabilité entre le WiMAX mobile et quelques réseaux connus. Ces modèles sont fondés sur des mécanismes de Handover vertical permettant le passage d'une station mobile entre les deux réseaux avec un minimum d'interruption de service.

Les réseaux proposés pour établir leur interconnexion avec l'IEEE 802.16e sont respectivement l'IEEE 802.11e (WLAN), l'UMTS (3G), le DVB-S/RCS (communication par satellite) et le LTE (3G+).

1 Interconnexion du WiMAX mobile avec le WLAN (802.11e)

1.1 Introduction

Le but de cette étude est d'établir l'interconnexion entre le WiMAX mobile et la version du WIFI dédiée à la QoS: IEEE 802.11e. Pour cela, nous allons proposer deux modèles d'interconnexion, le premier est fondé sur le protocole de mobilité MSCTP, et le deuxième sur l'architecture de mobilité: IEEE 802.21.

Ensuite, nous allons comparer les niveaux de la QoS des deux modèles proposés, en se référant aux simulations d'une station mobile en mouvement relativement lent (vu que le WLAN ne supporte pas la mobilité) entre les deux réseaux, et en train d'échanger du trafic VoIP au cours de sa communication (nous avons voulu choisir un trafic temps-réel à simuler, pour pouvoir remarquer s'il y a une amélioration au niveau de la QoS puisque ce type de trafic exige un niveau minimal de QoS, donc notre choix a été fixé sur un trafic VoIP).

1.2 Modèles d'interconnexion et scénarios de mobilité

1.2.1 Modèle et scénarios communs

Le modèle commun entre les deux modèles qui seront proposés dans les deux prochaines sections, est composé d'une cellule WiMAX avec un rayon de couverture de 1 km et une cellule WIFI d'un rayon de couverture de 300 m.

Les deux cellules forment une zone commune de Handover avec une distance maximale de 180 m entre les limites des deux cellules.

La cellule WiMAX est couverte par une BS connectée à un ASN-GW qui est lié à son tour via le réseau IP au CSN (Fournisseur d'accès WiMAX).

La cellule WIFI est couverte par un AP (point d'accès) connecté à un routeur qui est lié à son tour via le réseau IP au fournisseur d'accès WIFI (CSN WIFI).

Les deux CSNs sont connectés tous les deux et liés au correspondant externe de la station mobile via le réseau Internet.

Deux scénarios de mobilité seront adoptés par les deux modèles qui seront présentés dans les deux prochaines sections. Le premier scénario présente le cas où la MS se déplace depuis la cellule WiMAX vers la cellule WIFI ; et le deuxième scénario présente le sens contraire. Dans les deux scénarios, la MS traverse dans l'une des cellules une distance de 200 m, et traverse dans la zone de Handover une distance de 100 m.

Dans cette étude, il n'y a que l'IEEE 802.16e qui permet la mobilité. L'IEEE 802.11e ne supporte que la mobilité très faible de type piéton. Nous proposons donc de simuler deux vitesses de mobilité pour voir l'impact de l'augmentation de la vitesse par rapport aux résultats. Nous allons considérer une vitesse de 2 m/s = 7.2 km/h, et une vitesse de 5 m/s = 18 km/h.

1.2.2 Modèle d'interconnexion fondé sur MSCTP

En reprenant le modèle commun déjà présenté dans la section précédente, nous ajoutons au modèle d'interconnexion bâti sur le protocole MSCTP à la condition que les deux utilisateurs finaux : la station mobile et son correspondant doivent implanter le protocole MSCTP comme couche supérieure.

L'architecture d'interconnexion proposée entre WiMAX et WIFI en utilisant MSCTP est présentée dans la figure ci-dessous :

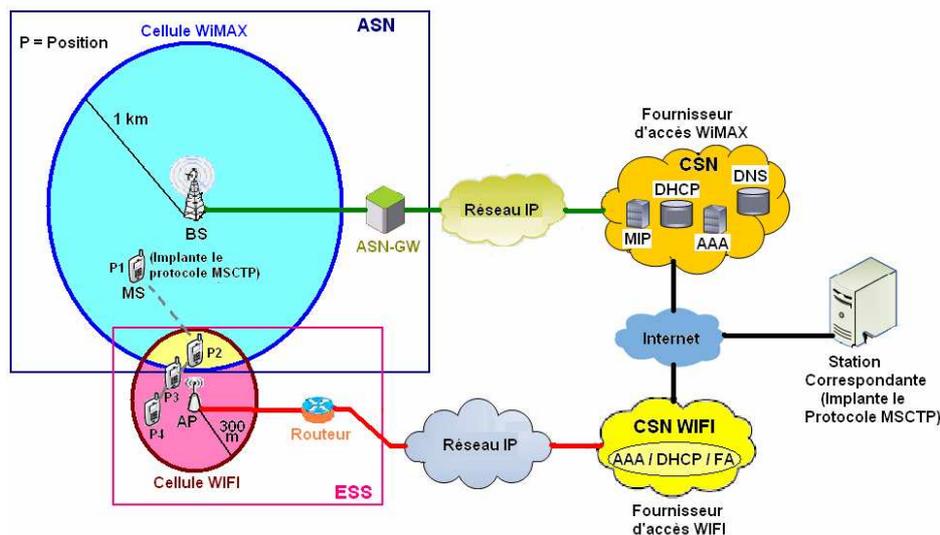


Figure 89. Modèle d'interconnexion fondé sur MSCTP

L'échange des messages entre la station mobile et son correspondant (CN) durant sa mobilité entre les réseaux WiMAX mobile et le WIFI, en utilisant le protocole MSCTP est présenté dans la figure ci-dessous :

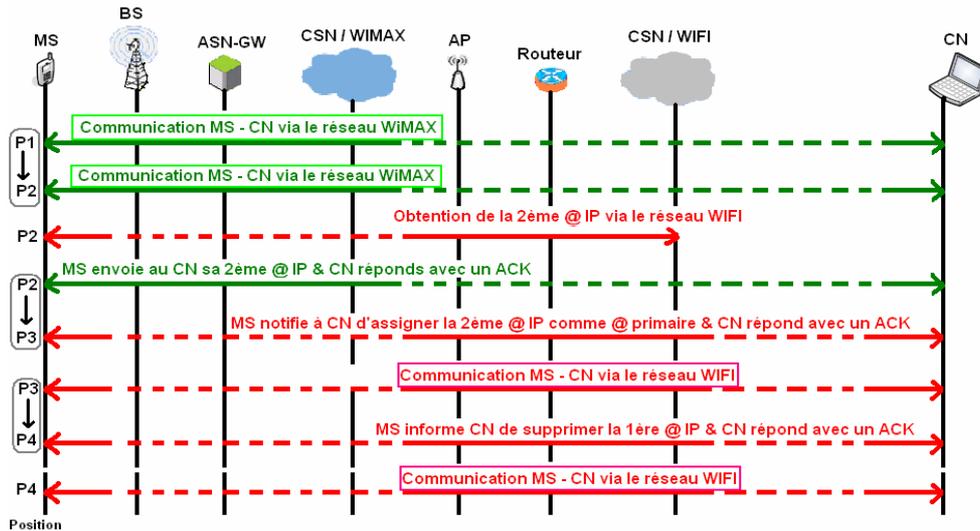


Figure 90. Echange des messages durant le Handover avec MSCTP

1.2.3 Modèle d'interconnexion fondé sur IEEE 802.21

En utilisant le modèle commun déjà présenté dans la section 2.1.2.1, nous ajoutons au modèle d'interconnexion fondé sur l'architecture IEEE 802.21 les conditions d'installer un serveur MIH entre les deux CSNs des deux réseaux, et d'implanter deux modules MIH au niveau des deux CSNs, et un module MIH au niveau de la station mobile.

L'architecture d'interconnexion proposée entre WiMAX et WIFI en se reposant sur le l'architecture IEEE 802.21 est présentée dans la figure ci-dessous :

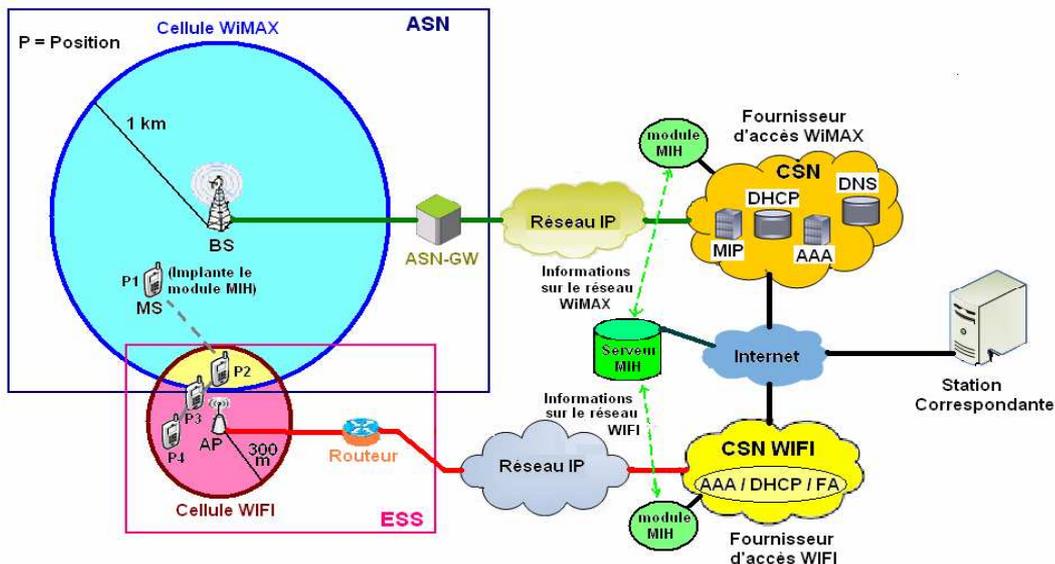


Figure 91. Modèle d'interconnexion fondé sur MIH

L'échange des messages entre la station mobile et son correspondant durant sa mobilité entre les réseaux WiMAX mobile et WIFI en se fondant sur l'architecture MIH, est présenté dans la figure ci-dessous :

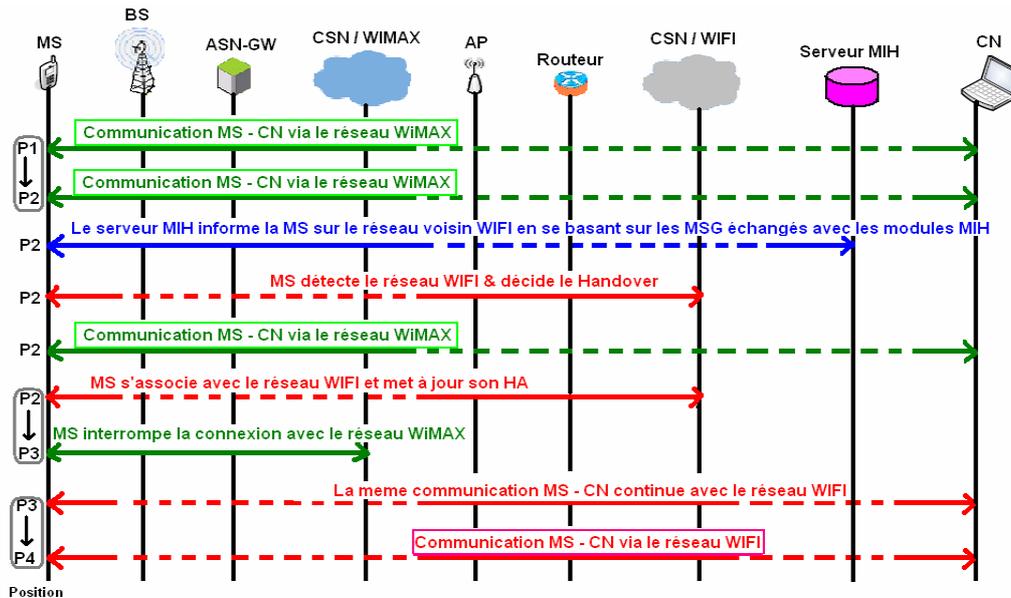


Figure 92. Echange des messages durant le Handover avec MIH

Au cours des simulations, nous allons choisir d'utiliser le protocole PMIP comme protocole de niveau 3 au sein de l'architecture MIH.

1.3 Paramètres des simulations et critères de performance

1.3.1 Paramètres des simulations

Les paramètres des simulations adoptés pour cette étude sous le simulateur NS2 sont illustrés dans le tableau ci-dessous :

	IEEE 802.16e	IEEE 802.11e
Puissance du signal (P_t)	15 W	0.2818 W
Seuil de réception ($RXThresh$)	7.59375e-11 W	1.76148 ^e -10 W
Seuil de la porteuse d'envoi ($CSThresh$)	4.34219e-12 W	3.32874 ^e -11 W
Rayon de couverture	1 km	300 m
Modèle de propagation radio	Two-Ray Ground [69] $P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4 L}$	
Gain d'antenne d'émission (G_t)	1 dB	
Gain d'antenne de réception (G_r)	1 dB	
Perte du système (L)	1 dB	
Hauteur d'antenne d'émission (h_t)	1.5 m	
Hauteur d'antenne de réception (h_r)	1.5 m	
Modulation	OFDMA	OFDM
Fréquence (Freq)	3.5 GHz	2.4 GHz

Tableau 15. Paramètres des simulations sous NS2

Durant une simulation, le trafic échangé par la station mobile avec son correspondant est la VoIP. La taille d'un paquet VoIP est fixée à 160 octets. En utilisant le protocole MSCTP, le type de trafic VoIP sous NS2 sera le CBR/SCTP ; et en utilisant MIH, le type de trafic VoIP généré sous NS2 est le CBR/UDP.

La durée d'une simulation pour un scénario est fixée à 250 secondes, et les résultats sont calculés chaque 20 secondes quand le mobile est situé dans l'une des cellules WiMAX ou WIFI ; et chaque 10 secondes quand le mobile est situé en zone de Handover.

1.3.2 Critères de performance

Les critères de performance simulés dans ce travail pour comparer les deux modèles proposés sont : le délai de bout en bout, le taux des paquets perdus, et le débit.

1.4 Résultats des simulations

1.4.1 Délai de bout en bout

Dans cette section nous allons calculer les délais des paquets durant les simulations, pour les deux vitesses proposées : 2 et 5 m/s, avec les deux techniques du Handover vertical: MSCTP et MIH, et en appliquant les deux scénarios : Handover depuis WiMAX vers WIFI, et le Handover depuis WIFI vers WiMAX.

Les résultats obtenus sont présentés par les courbes tracées dans la figure ci-dessous :

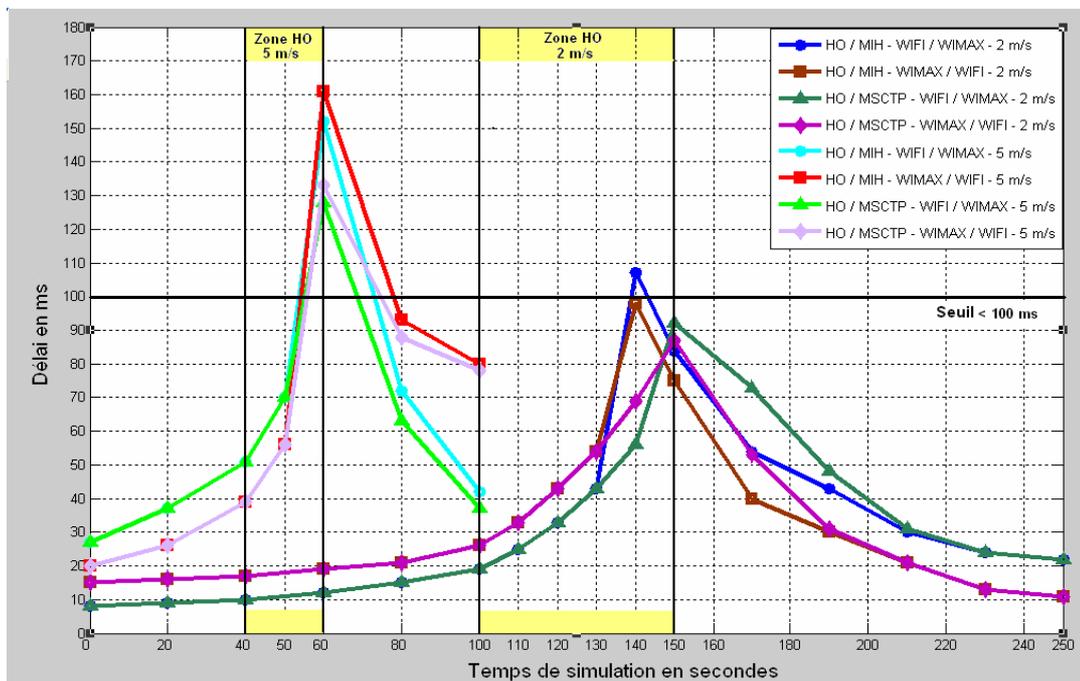


Figure 93. Les délais

Avec une vitesse égale à 2 m/s, la seule courbe qui excède légèrement le seuil des délais fixé à 100 ms [73] pour évaluer le niveau de la QoS pour le trafic VoIP, est la courbe représentant le Handover depuis WIFI vers WiMAX en utilisant le MIH.

Les trois autres courbes reflètent un bon niveau de QoS parce qu'elles ne dépassent pas le seuil. Nous remarquons aussi qu'en appliquant MIH, le processus du Handover est exécuté temporairement avant le cas où nous appliquons MSCTP. Les délais obtenus avec MSCTP sont légèrement inférieurs à ceux obtenus avec MIH.

Le Handover depuis WiMAX vers WIFI produit des résultats meilleurs que ceux du cas contraire. Les délais dans les zones hors Handover sont également meilleurs dans la cellule WIFI que dans la cellule WiMAX.

Pour conclure avec la vitesse de 2 m/s, et avec la configuration que nous avons proposée, les résultats des délais obtenus avec les deux techniques de Handover vertical sont acceptables.

Dans les zones hors Handover, les délais sont meilleurs dans le réseau WIFI, et sont meilleurs quand le mobile exécute un Handover en passant depuis la cellule WiMAX vers la cellule WIFI et en utilisant le protocole MSCTP.

Quand la vitesse du mobile est égale à 5 m/s, les délais se dégradent dans la cellule WIFI puisque ce dernier ne supporte que la mobilité à vitesse très faible.

Ensuite, les quatre courbes obtenues excèdent toutes durant le processus du Handover le seuil fixé à 100 ms pour évaluer un niveau de la QoS acceptable pour du trafic VoIP. MSCTP produit toujours des résultats légèrement meilleurs que ceux obtenus avec MIH.

Nous devons noter aussi qu'avec une vitesse de 5 m/s, contrairement au cas où la vitesse est égale à 2 m/s, les délais obtenus dans la cellule WiMAX sont inférieurs à ceux obtenus dans la cellule WIFI. De même, le Handover depuis WIFI vers WiMAX produit des délais meilleurs que ceux obtenus dans le sens contraire parce que WiMAX mobile contrairement au WIFI supporte la faible ou la forte mobilité.

En résumé, dans le cas d'une très faible mobilité, les résultats sont meilleurs, et le cas parfait avec cette condition est quand le Handover est mis en oeuvre depuis WiMAX vers WIFI en utilisant le protocole MSCTP ; mais les autres cas présentés aussi dans la figure 94 avec une vitesse très faible sont acceptables également.

Avec une vitesse de 5 m/s, les résultats ne sont pas acceptables durant le Handover avec les deux techniques ; et le meilleur cas obtenu est celui où le mobile effectue un Handover depuis WIFI vers le WiMAX en utilisant le protocole MSCTP.

1.4.2 Taux des paquets perdus

Nous calculons dans cette section les pourcentages des paquets perdus, en considérant les mêmes conditions de la section précédente ; et nous fixons un seuil proposé pour évaluer le niveau de QoS pour du trafic VoIP à 1% [73].

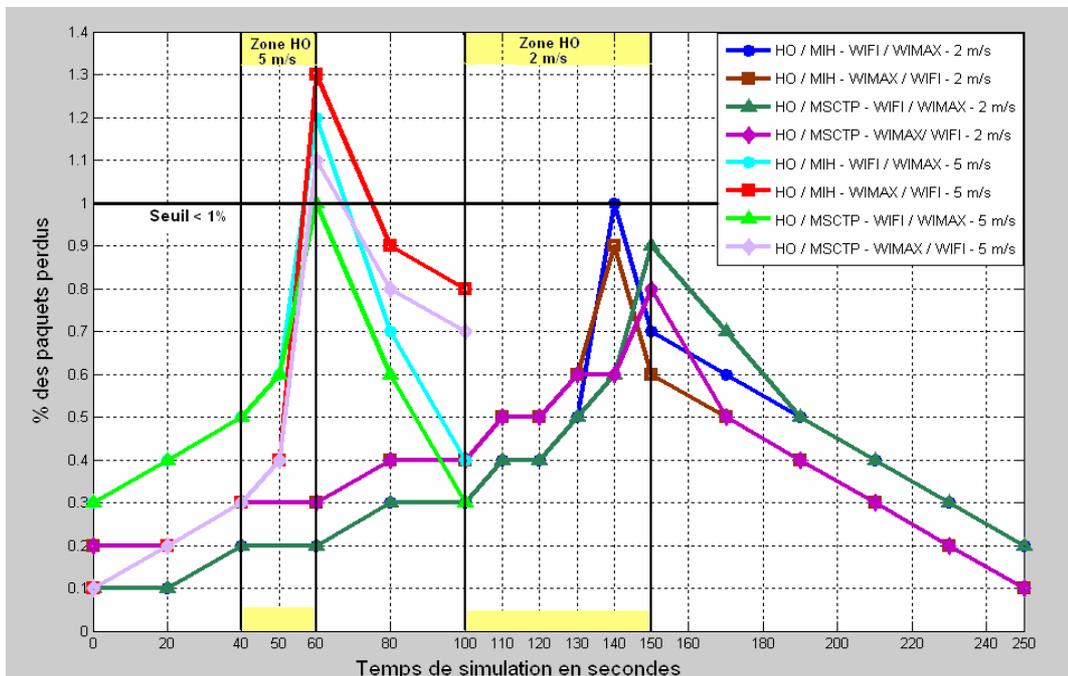


Figure 94. Les taux des paquets perdus

Dans cette figure, avec une vitesse du mobile égale à 2 m/s, tous les courbes reflètent de bons résultats. Le pire pourcentage de paquets perdus durant le Handover à cette vitesse est de 1% dans le cas du Handover depuis WIFI vers WiMAX en utilisant MIH. Les résultats obtenus dans le cas du Handover depuis le WiMAX vers le WIFI en utilisant MSCTP sont

satisfaisants pour le trafic VoIP ; et la valeur maximale obtenue dans ce cas est de 0.8% de pertes.

Avec une vitesse de 5 m/s, similairement aux résultats des délais, les taux des paquets perdus durant le Handover excèdent tous le seuil fixé à 1% [73].

Comme dans la section précédente, avec une vitesse très faible, la QoS est meilleure dans le réseau WIFI ; et meilleure quand le Handover est depuis WiMAX vers WIFI. Quand la vitesse est de 5 m/s, la QoS est meilleure dans le WiMAX mobile, et meilleure quand le Handover est depuis WIFI vers WiMAX.

Finalement, MSCTP offre une QoS légèrement meilleure à celle de MIH.

1.4.3 Débits

Finalement, dans cette section nous évaluerons les débits détectés au niveau du mobile selon les conditions déjà présentées dans la section 1.4.1.

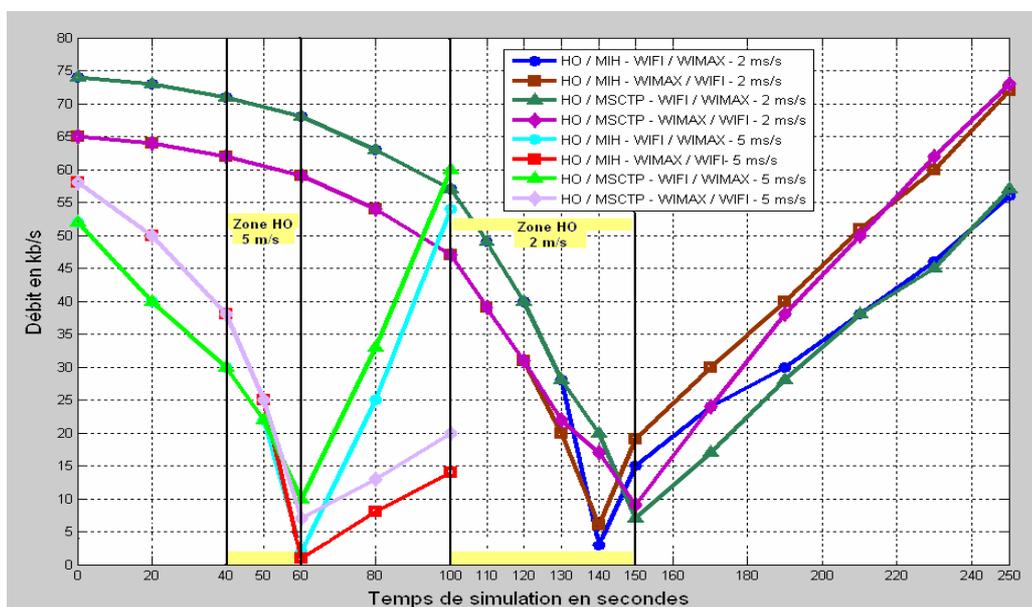


Figure 95. Les débits

Dans cette figure, nous voyons encore que le protocole MSCTP produit des résultats légèrement meilleurs que ceux obtenus avec MIH. Aussi, avec une vitesse fixée à 2 m/s, tous les résultats sont acceptables avec MSCTP et MIH, et dans les deux sens du Handover.

Avec une vitesse de 5 m/s, les résultats requièrent une révision, parce que durant le Handover le niveau de QoS n'est pas acceptable.

Le meilleur cas ici est quand la vitesse du mobile est égale à 2 m/s, avec l'utilisation du protocole MSCTP, sachant que le Handover se déroule depuis WiMAX vers WIFI. La valeur minimale de débit obtenue dans ce cas est égale à 9 kb/s.

Le plus mauvais cas est quand la vitesse est égale à 5 m/s, en utilisant MIH, et le Handover est depuis WiMAX vers WIFI, le minimum obtenu dans ce cas est égal à 2 kb/s.

1.5 Conclusion

Notre étude s'est focalisée sur l'interconnexion entre deux réseaux de la famille IEEE (802.11e et 80.16e), et nous nous sommes concentrés sur l'aspect de la QoS pour le trafic VoIP, spécialement durant le Handover diagonal.

Nous avons proposé et comparé deux modèles d'interconnexion fondés sur deux techniques de Handover entre technologies différentes.

En regardant les résultats, nous concluons qu'avec une très faible mobilité, les deux techniques de Handover représentent une bonne solution pour le problème d'interruption des services au cours du Handover vertical. Notons qu'avec MSCTP nous obtenons des résultats légèrement meilleurs que ceux obtenus avec MIH.

De plus le Handover depuis WIFI vers WiMAX, génère des résultats meilleurs que le cas contraire quand la mobilité est très faible. Avec une vitesse moyenne, nous obtenons le résultat contraire, parce que IEEE 802.16e tolère l'augmentation de la vitesse. En général avec une vitesse moyenne, les résultats ne sont toutefois pas acceptables en les comparant avec le niveau de QoS requis par la VoIP.

Dans les sections qui suivent, nous allons nous concentrer sur l'interconnexion entre des réseaux de familles différentes, par exemple mixer un réseau du monde informatique avec un réseau du monde télécommunications.

2 Interconnexion du WiMAX mobile avec la 3G (UMTS)

2.1 Introduction

Plusieurs travaux de recherche [79], [80], [81], [82], [83], [84] ont été présentés dans le cadre de l'interopérabilité entre WiMAX mobile et UMTS, mais la majorité de ces travaux traite seulement le problème d'interconnexion, et les autres travaux qui traitent le Handover proposent un seul mécanisme de mobilité.

Le but principal de cette étude sera de proposer un modèle d'interconnexion entre WiMAX mobile et UMTS. Le modèle proposé reposera sur une combinaison de deux mécanismes de Handover vertical, permettant d'améliorer la QoS lors du Handover vertical entre WiMAX mobile et UMTS.

La combinaison proposée est le résultat de l'intégration du protocole MSCTP connu pour sa technique de Multihoming, dans la pile protocolaire de l'architecture IEEE 802.21 capable de fournir des données sur les réseaux voisins lors du Handover.

Pour évaluer l'efficacité de notre proposition, nous allons comparer à travers des simulations de quelques paramètres de QoS, les résultats obtenus avec la combinaison des deux mécanismes, et les résultats obtenus de chaque mécanisme seul.

2.2 Pile protocolaire fondée sur MIH et MSCTP

Cette section est consacrée à la présentation de la pile protocolaire résultante de l'implantation des réseaux WiMAX mobile et UMTS dans l'architecture IEEE 802.21, et de l'intégration du protocole MSCTP au sein de cette architecture.

L'architecture protocolaire du WiMAX mobile est composée d'une couche physique et de trois couches MAC. Le lien entre la couche physique et la sous couches MAC est assuré par le PHY_SAP (Physique SAP) ; entre les sous couches MAC, le lien est assuré par le MAC_SAP ; et finalement le transfert des paquets provenant/sortant de l'extérieur/des autres sous couches MAC est assuré par le CS_SAP (Convergence Sublayer SAP).

Pour établir le lien entre le réseau WiMAX et MIH [85], [86], [87], ce dernier définit de nouveaux points d'accès au service SAP (Service Access Point) : le M_SAP (Management SAP) pour le plan de gestion, et le C_SAP (Control SAP) pour le plan de contrôle.

Le M_SAP spécifie l'interface entre le MIHF (MIH Function) et le plan de gestion. Il permet à la charge utile MIHF d'être encapsulée dans des messages de gestion. Les primitives spécifiées par M_SAP sont utilisées par une MS pour transférer les paquets vers une BS, à la fois avant et après qu'elle a achevé les procédures d'entrée dans le réseau.

Le C_SAP spécifie l'interface entre le MIHF et le plan de contrôle. Il fournit des services avant l'entrée au réseau, alors que CS_SAP fournit des services dans le plan de données après

l'entrée dans le réseau. Cet SAP est utilisé pour les échanges MIH entre MIHF et les couches inférieures du plan de gestion.

M_SAP et C_SAP sont communs à MIHF et au NCMS (Network Control and Management System) qui est une extension qui prend en charge les primitives MIH délivrées à MIHF.

Le réseau qui gère et contrôle le périphérique 802.16 est abstraite au niveau du NCMS qui s'interface avec les BS. Le NCMS est composé de plusieurs entités fonctionnelles qui peuvent être centralisées ou distribuées sur le réseau. La fonctionnalité exacte de ces entités est en dehors du champ d'application de la spécification 802.16. Toute la coordination nécessaire entre les BS est assurée par le NCMS.

Ensuite, le NCMS est lié via le MIH_SME_SAP (MIH Station Management Entity SAP) au MIHF (MIH Function) qui joue le rôle d'intermédiaire entre les réseaux et les couches supérieures comme IP.

Le MIH_SME_SAP est l'interface par laquelle les paramètres de configuration sont échangés. Il définit l'interface MIH avec le système, et est utilisé pour la configuration et le fonctionnement du MIH.

L'architecture protocolaire de l'UMTS est composée d'une couche physique, une couche MAC, une couche RLC et une couche RRC. Comme couches supérieures l'UMTS est composé de la couche GMM (GPRS Mobility Management) et de la couche SM (Session Management).

L'IEEE 802.21 définit un nouveau SAP [85], [86], [87] : MIH_3GLINK_SAP pour établir le lien entre le MIHF et le réseau UMTS.

MIH_3GLINK_SAP est divisé en deux SAP : le MIH_MGMT_SAP (MIH Management SAP) pour établir le lien entre le MIHF et le GMM, et le RRC_SAP pour établir le lien entre le MIHF et la couche RRC.

Enfin, le MIH_SAP a été défini pour établir le lien entre la couche MIHF et les couches supérieures.

Dans notre travail nous proposons la couche IP en dessus de la couche MIHF, et la couche MSCTP en dessus de la couche IP. La couche application relative dans ce cas à l'application VoIP, et enfin la couche utilisateur MIH.

Cette pile protocolaire va nous permettre d'exécuter le Handover vertical entre WiMAX mobile et UMTS, en utilisant conjointement l'architecture MIH et le protocole MSCTP.

La pile protocolaire décrite est présentée dans la figure ci-dessous :

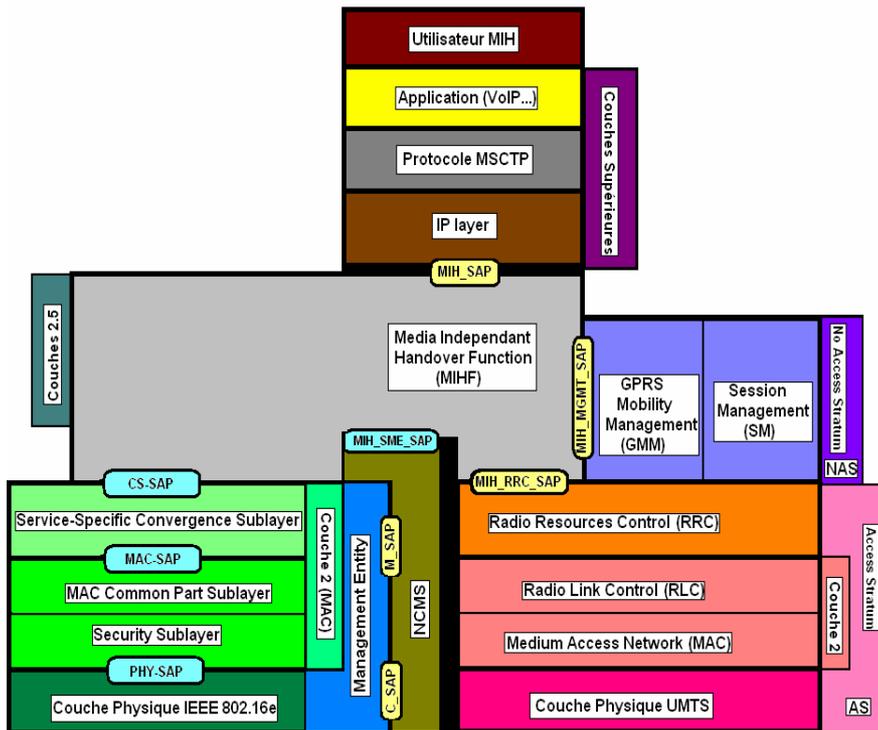


Figure 96. Pile protocolaire MIH+MSCTP

2.3 Modèle de mobilité et schéma du Handover

2.3.1 Modèle d'interconnexion et scénarios de mobilité

Cette partie décrit le modèle d'interconnexion entre WiMAX mobile et UMTS fondé sur MIH + MSCTP, et les scénarios de mobilité entre les deux réseaux.

Nous proposons une cellule WiMAX avec un rayon de couverture de 3 km, et une cellule UMTS de même rayon de couverture. Les deux cellules forment une zone commune de Handover, d'une surface de 3 km².

La MS choisie pour établir les scénarios de mobilité doit pouvoir opérer avec les deux réseaux.

Concernant le mobile WiMAX, la BS est connectée à un ASN-GW lié à son tour via le réseau IP au CSN. Dans le réseau UMTS, le NodeB est connecté au RNC qui est lié au SGSN qui est lié à son tour au GGSN, et ce dernier permettra l'accès au réseau PDN (Packet Data Network).

L'interconnexion entre les deux réseaux est assurée par deux passerelles localisées entre les deux réseaux : WAG (WiMAX Access Gateway) et PDG (Packet Data Gateway) [88], [89], [90].

A travers la WAG, les données depuis/vers le réseau WiMAX sont acheminées vers la MS avec les services UMTS. Les fonctions de WAG incluent le renforcement du routage des paquets à travers le PDG, le traitement des informations comptables, et le filtrage des paquets. Les fonctions principales du PDG sont le routage des paquets reçus/envoyés au PDN depuis/vers la MS, et l'exercice des fonctions d'un agent étranger.

Pour utiliser les services de MIH dans le modèle d'interconnexion, l'abonné mobile doit implanter le module MIH ; un serveur MIH doit être installé entre les deux réseaux ; le CSN du WiMAX doit intégrer un module MIH, et le cœur du réseau UMTS aussi. Dans ce cas, l'échange des informations sur les réseaux va être effectué entre les modules MIH installés dans les deux réseaux, et le serveur MIH.

Pour utiliser le protocole MSCTP, les utilisateurs finaux (station mobile et son correspondant) doivent implanter ce protocole au niveau des couches supérieures.

Dans le premier scénario de mobilité, la MS utilisant l'application VoIP est localisée au début à la 1^{ère} position dans la cellule UMTS, va se déplacer vers la 2^{ème} position dans la zone de Handover entre les deux réseaux. Ensuite, elle va quitter la zone de Handover vers la 3^{ème} position localisée à la fin de la zone de Handover et au début de la cellule WiMAX. Et finalement, elle va rejoindre la 4^{ème} position localisée dans la cellule WiMAX.

Dans le deuxième scénario, la MS va traverser le même chemin, mais dans le sens contraire, depuis la cellule WiMAX vers la cellule UMTS.

Dans les deux scénarios, nous proposons deux vitesses de mobilité : 50 et 100 km/h, pour voir l'impact de l'augmentation de la vitesse dans le cas du Handover vertical.

Le modèle d'interconnexion, et le 2^{ème} scénario sont illustrés dans la figure ci-dessous :

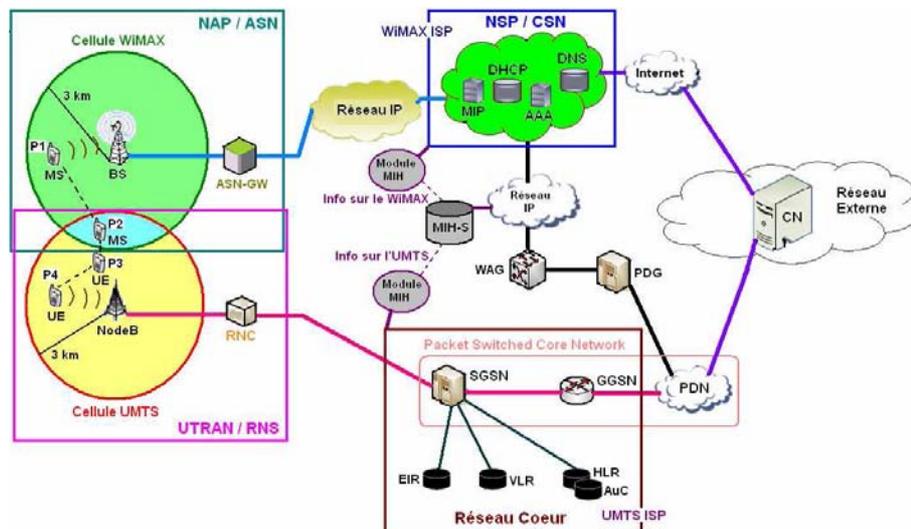


Figure 97. Modèle d'interconnexion et 2^{ème} scénario

2.3.2 Schéma de Handover

Cette partie décrit l'échange des informations entre toutes les entités durant le scénario de mobilité depuis WiMAX vers UMTS (pour plus d'informations voir le schéma 1 d'échange des messages dans l'annexe) [91], [92], [93], [94].

Au début, la MS est localisée à la première position dans la cellule WiMAX, en train de communiquer avec son correspondant localisé dans un réseau externe via le réseau WiMAX (BS – ASN-GW – CSN – Internet – CN). Ensuite, quand elle commencera à se déplacer vers la deuxième position dans la zone de Handover, l'entité MIHF dans la MS échange des informations sur les réseaux voisins avec les modules MIH, pour détecter les réseaux cibles d'un Handover. En s'approchant de la deuxième position dans la zone de Handover, et quand l'un des rapports échangés avec les modules MIH est positif, et que la MS détecte un nouveau réseau qui est dans ce cas le réseau UMTS ; l'initiation et la préparation du Handover démarrent. L'échange des messages entre les entités MIH se focalise sur la mesure, la Mapping et la comparaison du niveau de la QoS entre les deux réseaux. Si le rapport des mesures est positif, la réservation des ressources du réseau UMTS va être établie.

A ce stade, la MS continue toujours à communiquer avec son correspondant via le réseau WiMAX. Ensuite, quand elle va commencer à quitter la deuxième position vers la troisième située à la fin de la zone de Handover et au début de la cellule du réseau UMTS, elle va procéder à l'exécution du Handover ; pour cela elle devra d'abord obtenir une adresse IP du

réseau UMTS, et donc elle va procéder au contexte PDP (Packet Data Protocol) pour l'obtenir (plus d'informations dans le schéma 1 à l'annexe).

Un contexte PDP est un ensemble d'informations qui caractérise un service de transmission de base. Il regroupe des paramètres qui permettent à un abonné de communiquer avec une adresse PDP définie, selon un protocole spécifique (IP ou X.25), suivant un profil de QoS déterminé (débit, délai, priorité...).

Après l'obtention de l'adresse IP UMTS, la MS possède maintenant deux adresses IP. Et avec l'aide du protocole MSCTP, la MS pourra classer ses adresses IP et en choisir une comme adresse primaire. Elle va donc utiliser l'extension DAR du protocole MSCTP pour prévenir son correspondant de l'existence de sa deuxième adresse IP obtenue récemment. Son correspondant va ajouter sa deuxième adresse comme adresse secondaire dans sa table d'adresses et va confirmer la bonne réception à la MS par un ACK.

Après, quand la MS atteint la troisième position à la fin de la zone de Handover et au début de la cellule UMTS, elle va utiliser son extension DAR pour choisir la deuxième adresse IP comme adresse IP primaire au lieu de la première adresse IP qui deviendra secondaire ; ensuite elle va contacter son correspondant via le réseau UMTS pour le prévenir de basculer la deuxième adresse IP comme adresse IP primaire, et son correspondant va répondre avec un ACK. La MS va continuer sa communication avec son correspondant via le réseau UMTS.

Finalement, quand la MS quitte la troisième position en direction de la quatrième position dans la cellule UMTS, elle va utiliser l'extension DAR pour supprimer sa première adresse IP WiMAX parce qu'elle n'en a plus besoin, et va contacter son correspondant via le réseau UMTS pour l'avertir de supprimer la première adresse de sa table d'adresses, ce que son correspondant confirmera avec un ACK ; et la MS continuera finalement sa communication avec son correspondant via le réseau UMTS (NodeB – RNC – SGSN – GGSN – PDN – CN).

2.4 Simulations

2.4.1 Paramètres des simulations

Les paramètres des simulations choisis sous NS2 pour les deux types de réseaux sont illustrés dans les tableaux qui suivent.

Le modèle de propagation utilisé pour simuler la communication dans le réseau WiMAX est le Two-Ray Ground. Il s'agit d'un modèle de propagation utile qui est basée sur l'optique géométrique, et considère à la fois le chemin direct et indirect (modèle de reflet) entre l'émetteur et le récepteur.

	IEEE 802.16e
Puissance du signal de la BS (P_t)	15 W
Seuil de réception ($RXThresh$)	9.375e-13 W
Seuil de la porteuse d'envoi ($CSThresh$)	1.259e-14 W
Rayon de couverture (Distance D)	3 Km
Modèle de propagation radio	Two-Ray Ground [69]
Gain d'antenne d'émission (G_t)	1 dB
Gain d'antenne de réception (G_r)	1 dB
Perte du système (L)	1 dB
Hauteur d'antenne d'émission (h_t)	1.5 m
Hauteur d'antenne de réception (h_r)	1.5 m
Modulation	OFDMA
Fréquence (Freq)	3.5 GHz

Tableau 16. Paramètres des simulations du WiMAX mobile sous NS2

	UMTS
Puissance du signal de la NodeB (Pt _{NodeB})	3 W
Puissance de consommation utilisateur (Pt _{consume UE})	0.125 W
Puissance de consommation de la NodeB (Pt _{consume NodeB})	1 W
Puissance dans l'état IDLE de l'utilisateur (Pt _{idle UE})	0.005 W
Puissance dans l'état IDLE de la NodeB (Pt _{idle NodeB})	0.5 W
Débit (Bandwidth)	384 Kb/s
Fréquence (Freq)	2 GHz
Rayon de couverture	3 Km
Modulation	WCDMA
Gain d'antenne d'émission de l'utilisateur (Gt _{UE})	2 dB
Gain d'antenne d'émission de la NodeB (Gt _{NodeB})	18 dB
Gain d'antenne de réception de l'utilisateur (Gr _{UE})	2 dB
Gain d'antenne de réception de la NodeB (Gr _{NodeB})	18 dB
Modèle de propagation radio	Okumura-Hata [95]

Tableau 17. Paramètres des simulations de l'UMTS sous NS2

Le modèle de propagation utilisé pour simuler la communication dans le réseau UMTS est le Okumura-Hata. Il s'agit d'un modèle de propagation empirique qui se décompose de l'affaiblissement du signal radio en différentes fonctions, et il est basé sur l'utilisation d'une quantité importante de mesures pour déterminer les propriétés statistiques générales.

Durant les simulations, le type de trafic échangé est la VoIP (trafic temps-réel choisi), et sous NS2 nous allons utiliser le trafic CBR/SCTP avec une taille fixe d'un paquet équivalente à 160 octets.

La station mobile va traverser 2 km dans la cellule WiMAX ou UMTS, et 1 km dans la zone de Handover. La durée d'une simulation est fixée à 360 secondes, et les résultats seront calculés toutes les 20 secondes hors de la zone de Handover, et toutes les 10 secondes dans la zone du Handover.

2.4.2 Critères de performance

Pour comparer les performances du protocole MSCTP seul, du standard 802.21 seul (MIH+PMIP), et des deux mécanismes ensemble, dans le cas du Handover vertical entre le WiMAX mobile et l'UMTS, nous allons proposer comme critères de performance le délai de bout en bout, le taux des paquets perdus, et le débit.

2.5 Résultats

2.5.1 Les délais

Dans cette section, nous allons calculer les délais des paquets durant une simulation avec les deux vitesses 50 et 100 km/h, et en appliquant d'abord chaque mécanisme de Handover seul, ensuite en appliquant la combinaison des deux mécanismes ensemble.

Commençons par les résultats des délais dans le cas du Handover depuis UMTS vers le WiMAX mobile.

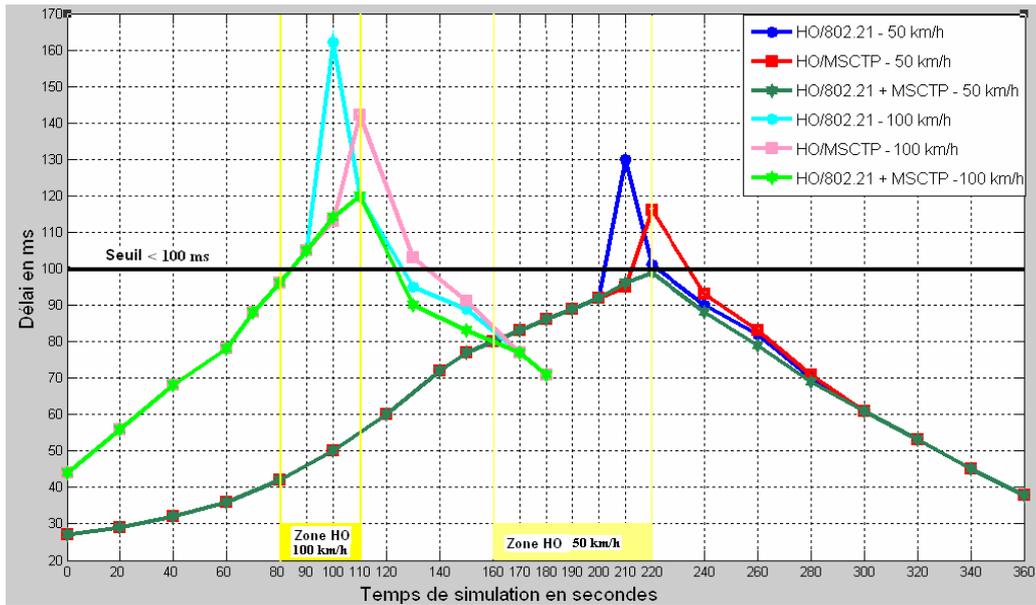


Figure 98. Délais du Handover depuis UMTS vers WiMAX

Dans cette figure, nous fixons un seuil de 100 ms [73] pour pouvoir évaluer le niveau de la QoS durant la simulation. Les valeurs des délais qui ne dépassent pas ce seuil reflètent un niveau de QoS acceptable.

Avec une vitesse de 50 km/h, nous obtenons une seule courbe qui n'excède pas le seuil: c'est la courbe présentant MSCTP + MIH.

La courbe de MSCTP seul excède légèrement 100 ms durant le Handover, et atteint un maximum de 116 ms. La courbe de MIH seul excède aussi le seuil pour atteindre un maximum de 130 ms durant le Handover.

Ensuite, avec une vitesse de 100 km/h, les valeurs des délais augmentent pour toutes les courbes. Dans le cas du Handover utilisant MSCTP + MIH, les valeurs des délais durant le Handover ne respectent plus le seuil comme dans le cas précédent avec une vitesse moyenne, et atteignent un maximum de 120 ms durant le Handover. Il en est de même pour les autres courbes avec une vitesse de 100 km/h, les résultats sont supérieurs à ceux obtenus avec une vitesse moyenne de 50 km/h.

Nous passons maintenant aux résultats de délais dans le cas du Handover depuis WiMAX mobile vers UMTS :

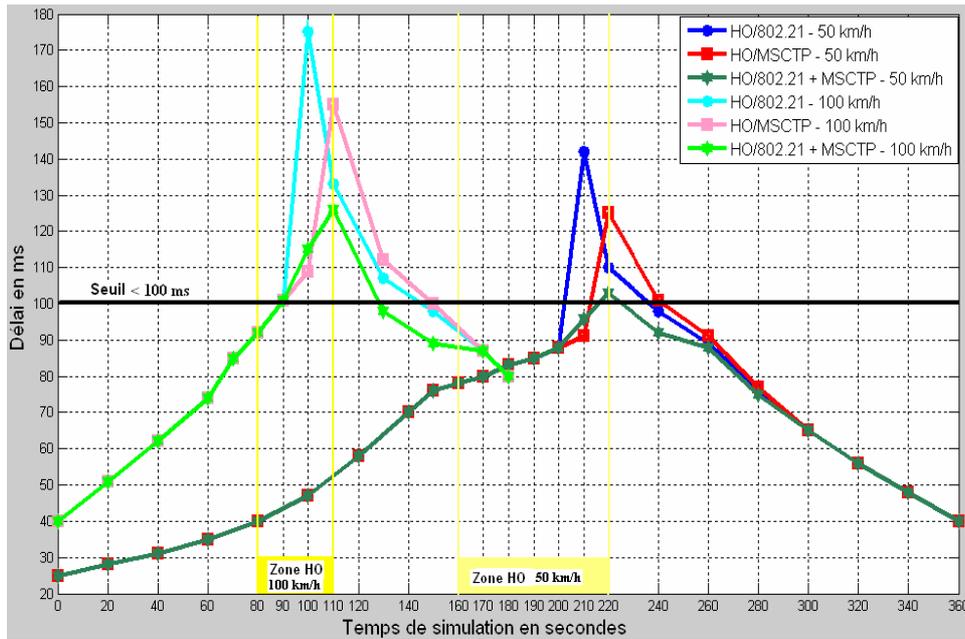


Figure 99. Délais du Handover depuis WiMAX vers UMTS

Notons d'abord dans cette figure que dans le cas du Handover depuis WiMAX vers UMTS, les valeurs des délais de toutes les courbes sont légèrement supérieures à celles obtenues dans le cas du Handover depuis UMTS vers WiMAX. Par exemple, avec le scénario de MSCTP + MIH avec une vitesse de 50 km/h, la valeur maximale atteint 103 ms contre une valeur de 99 ms atteinte dans le premier scénario. Cela est dû forcément à la différence de durée de la réservation des ressources pendant le processus du Handover pour l'obtention d'une nouvelle adresse IP.

Pour conclure, la meilleure technique observée après les simulations des délais et qui assure un meilleur niveau de QoS pour le trafic VoIP, est la combinaison MSCTP + MIH. En outre l'augmentation de la vitesse provoque la dégradation des délais. Finalement, le Handover depuis UMTS vers WiMAX mobile produit des résultats légèrement meilleurs que ceux obtenus dans le sens contraire.

2.5.2 Les taux des paquets perdus

Nous calculons dans cette section les pourcentages des paquets perdus avec les mêmes conditions que dans la section précédente. Nous fixons un seuil à 1% [73] pour évaluer le niveau de QoS obtenu après les simulations.

Les résultats obtenus dans le cas du Handover depuis UMTS vers WiMAX mobile sont illustrés dans la figure ci-dessous :

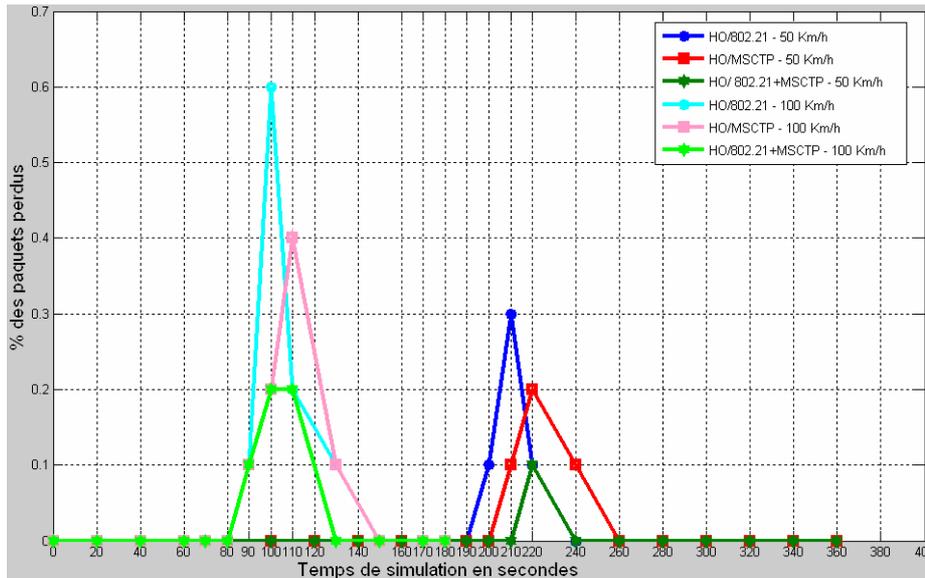


Figure 100. Taux des paquets perdus du Handover depuis UMTS vers WiMAX

Dans cette figure, tous les résultats obtenus respectent le seuil fixé à 1% [73] pour le trafic VoIP. Le niveau de QoS est donc acceptable pour toutes les courbes. Les résultats obtenus avec une vitesse de 50 km/h sont en revanche meilleurs que ceux obtenus avec la vitesse de 100 km/h, et les résultats des paquets perdus obtenus durant le Handover en utilisant MSCTP + MIH reflètent un meilleur niveau par rapport à l'utilisation de chaque mécanisme seul. En utilisant seulement MSCTP, les résultats sont légèrement meilleurs que ceux obtenus avec MIH seul.

Nous présentons maintenant les résultats des paquets perdus dans le cas du Handover depuis WiMAX vers UMTS :

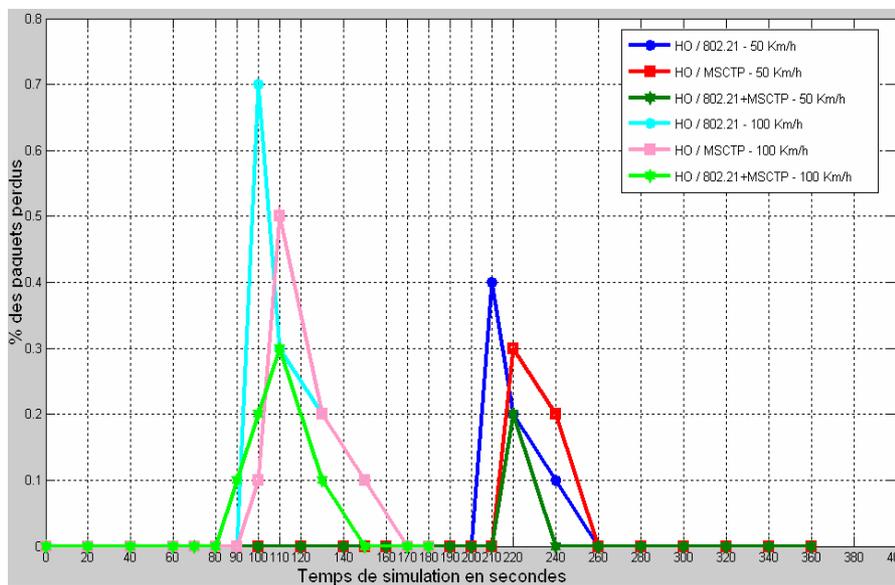


Figure 101. Taux des paquets perdus du Handover depuis WiMAX vers UMTS

Comme pour les délais, le degré de la QoS durant le Handover depuis UMTS vers WiMAX est légèrement meilleur que celui obtenu dans le sens contraire. Par exemple, la valeur maximale obtenue durant le Handover depuis UMTS vers WiMAX en utilisant MSCTP + MIH, et avec une vitesse de 50 km/h, est égale à 0.1%, contre 0.2% dans le cas du Handover depuis WiMAX vers UMTS.

Les meilleurs résultats obtenus dans cette figure correspondent à l'utilisation MSCTP + MIH.

2.5.3 Les débits

Finalement, dans cette section, nous calculons les valeurs des débits du mobile durant une simulation.

Nous allons commencer comme les deux sections précédentes par le cas de Handover depuis UMTS vers WiMAX :

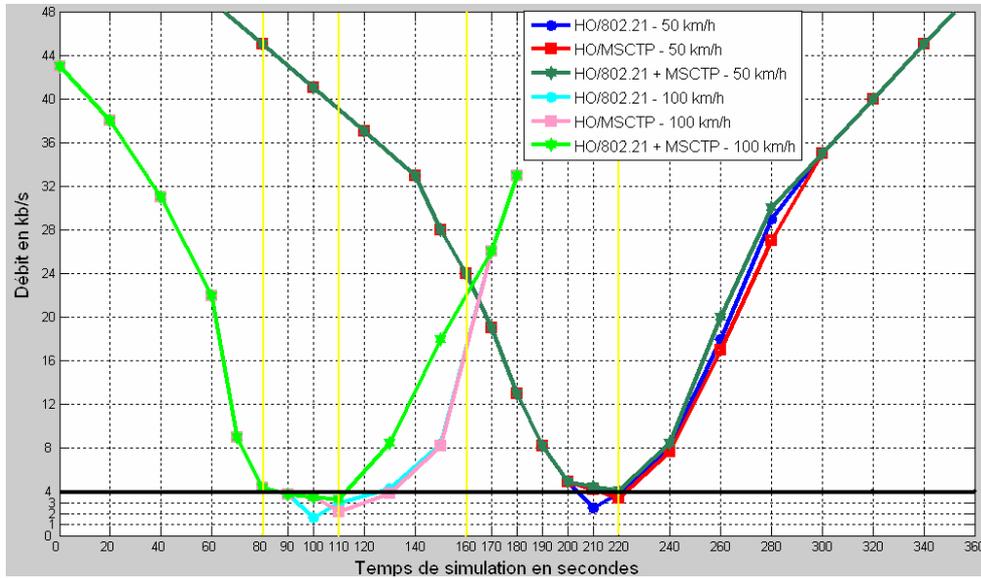


Figure 102. Débits du Handover depuis UMTS vers WiMAX

En regardant cette figure, la valeur minimale obtenue avec la vitesse de 50 km/h et en appliquant MSCTP + MIH durant le Handover, est de 4.1 kb/s. Les valeurs obtenues avec MSCTP et MIH seuls durant le Handover sont inférieures à 4 kb/s, et la courbe de MSCTP produit des résultats légèrement meilleurs que ceux obtenus avec MIH.

Avec une vitesse de 100 km/h, les résultats augmentent. Par exemple le minimum obtenu avec la courbe MSCTP + MIH est égal cette fois à 3.3 kb/s.

Ci-dessous sont représentés les résultats des débits dans le cas du Handover depuis WiMAX vers UMTS :

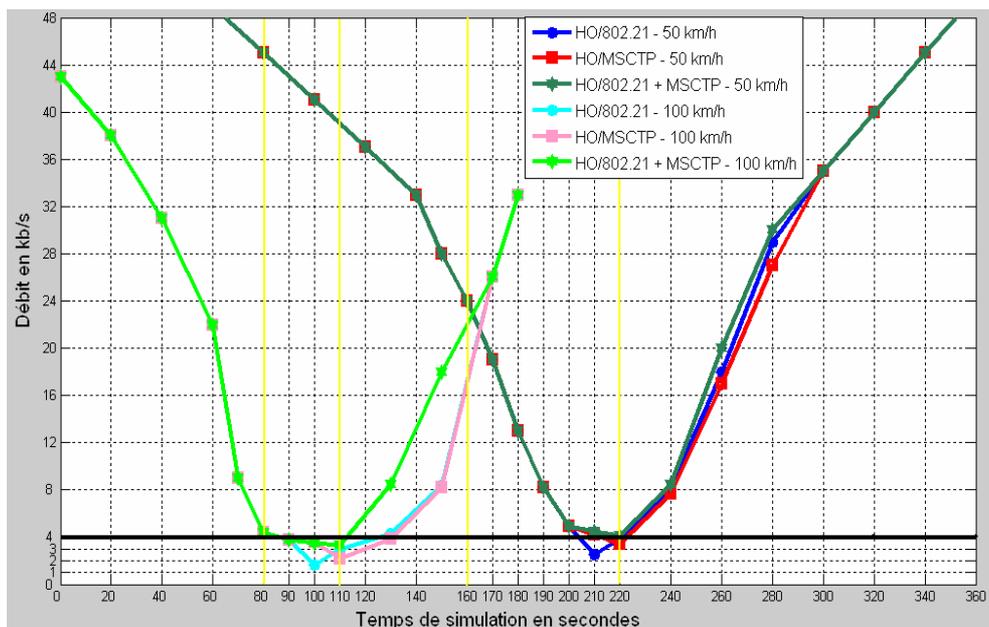


Figure 103. Débits du Handover depuis WiMAX vers UMTS

Les valeurs des débits diminuent légèrement dans ce scénario en les comparant avec le scénario précédent. Pour le cas de Handover utilisant MSCTP + MIH avec une vitesse égale à 50 km/h, la valeur minimale obtenue est de 3.8 kb/s, contre 4.1 kb/s obtenue avec le scénario précédent.

2.6 Conclusion

Cette étude s'est focalisée sur l'interconnexion de deux réseaux de familles différentes, et nous nous sommes concentrés sur l'aspect QoS pour du trafic VoIP dans le cas du Handover vertical. Pour cela, nous avons proposé un modèle d'interconnexion basé sur la combinaison de deux mécanismes de Handover, et nous avons simulé ce modèle avec deux classes de vitesses, et dans les deux sens depuis un réseau vers l'autre.

Sur les résultats obtenus, nous concluons qu'avec une mobilité moyenne et l'utilisation de MIH + MSCTP durant le Handover, spécialement quand le mobile passe depuis UMTS vers le WiMAX, nous obtenons de bons résultats avec un minimum d'interruption des services, et avec un niveau de QoS meilleur que celui obtenu avec MSCTP seul ou MIH seul.

Le Handover depuis UMTS vers WiMAX conduit à des résultats légèrement meilleurs que ceux obtenus dans le sens contraire avec une mobilité moyenne ou importante.

Finalement, les résultats obtenus dans le cas d'une mobilité importante requièrent une révision, parce qu'ils ne sont pas acceptables en les comparant avec le niveau de QoS requis pour la VoIP.

3 Interconnexion du 802.16e avec le satellite (DVB-S/RCS)

3.1 Introduction

Jusqu'à présent, le Handover entre le satellite et les réseaux terrestres sans fil n'a pas été pris en compte, à cause de la grande différence de fonctionnement des deux systèmes et d'architectures protocolaires.

Dans ce contexte, nous proposons dans cette étude un modèle d'interconnexion entre un réseau fondé sur la communication radio : le WiMAX mobile, et un réseau spatial fondé sur le principe de diffusion par satellite, et composé de deux systèmes combinés : le DVB-S/RCS. Nous suggérons aussi dans cette étude d'utiliser le protocole de Handover vertical MSCTP dans le cas du Handover entre les deux systèmes DVB-S/RCS et le WiMAX mobile. Pour cela nous avons conçu une nouvelle pile protocolaire convergente au niveau du système DVB-S/RCS, et qui est fondée sur l'ancienne pile protocolaire de ce système. Nous avons proposé des révisions au niveau des couches supérieures pour pouvoir intégrer le protocole MSCTP au sein du système combiné DVB-S/RCS.

Enfin, vu que la plupart des services de communication par satellite géostationnaire sont orientés vers la vidéo, nous allons simuler notre proposition en proposant des scénarios de mobilité d'une station mobile échangeant un trafic de type Streaming vidéo, pour pouvoir déterminer le niveau de la QoS obtenue avec une telle proposition.

3.2 Pile protocolaire convergente du DVB-S/RCS

Dans le but de résoudre le problème de compatibilité entre les différents paquets MSCTP/IP provenant depuis un correspondant distant supportant le protocole MSCTP, et le type des paquets MPEG2-TS (norme de codage vidéo) adopté par le système DVB-S/RCS pour la transmission et la réception via le satellite, nous proposons une pile protocolaire convergente pour le système combiné DVB-S/RCS.

Au niveau de la passerelle (Gateway), les paquets qui vont être transmis vers le satellite via la couche physique DVB-S/RCS doivent être des paquets de type MPEG2-TS, parce que le DVB-S/RCS utilise des tables de signalisation supportant seulement les paquets de ce type lors de la transmission ou la réception.

Donc, nous allons proposer un mécanisme d'encapsulation des paquets de type MSCTP à l'aide de ULE [96] (Unidirectional Lightweight Encapsulation) qui est une couche adaptative d'encapsulation qui se situe entre les couches supérieures et la couche MPEG2-TS.

ULE est un protocole de couche liaison de données conçu pour le transport des paquets MPEG-2 TS de couche réseau, il est approprié particulièrement aux services par satellite intégrant le protocole IP.

Ensuite, les ULE SNDU (Sub Network Data Unit) formés après l'encapsulation des paquets MSCTP dans l'ULE seront fragmentés en paquets MPEG2-TS de taille fixe égale à 188 octets, et seront transmis depuis la passerelle, et via la couche physique DVB-S vers le satellite. Similairement, la même encapsulation sera appliquée dans la voie retour au niveau du terminal satellite (ST).

Les mécanismes d'encapsulation et de fragmentation, et les piles protocolaires sont présentés dans la figure ci-dessous :

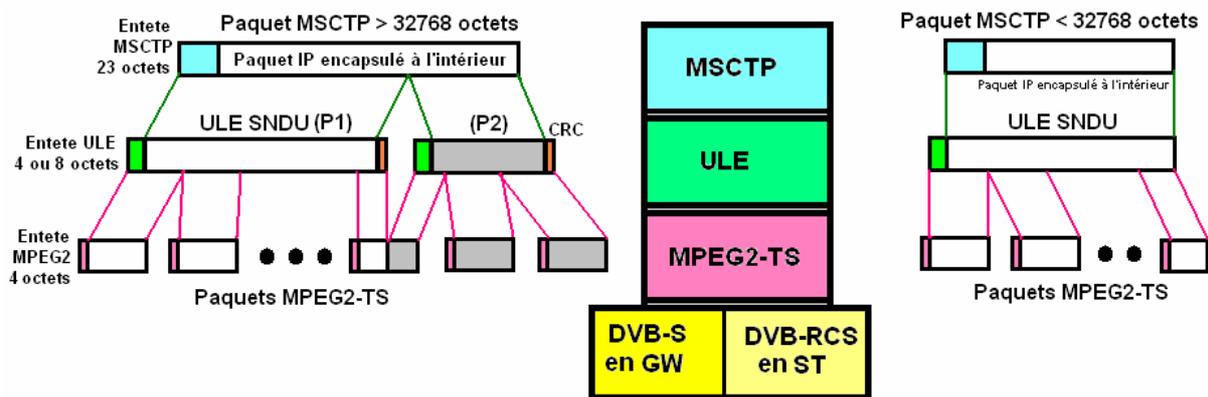


Figure 104. Pile protocolaire et mécanismes d'encapsulation et de fragmentation

En fonction de la taille du paquet MSCTP (SCTP + DAR), si la taille est inférieure à 32768 octets, le paquet MSCTP qui encapsule déjà un paquet IP, sera encapsulé directement dans un ULE SNDU qui supporte une taille maximale codée sur 15 bits = $2^{15} = 32$ kb [96].

Les ULE SNDU formés seront fragmentés en paquets MPEG2-TS de taille fixe égale à 188 octets, qui seront transmis via la couche physique vers le satellite.

Si la taille d'un paquet MSCTP est supérieure à 32 kb, la différence avec le premier cas est que le paquet MSCTP sera fragmenté en paquets de tailles inférieures à 32 kb chacun, et qui seront encapsulés après dans des ULE SNDU, puis fragmentés en paquets MPEG2-TS.

3.3 Modèle d'interconnexion et scénarios de mobilité

Le modèle d'interconnexion entre le WiMAX mobile et le DVB-S/RCS est composé d'une très large cellule de centaines de kilomètres couverte par un satellite géostationnaire transparent et bénéficie des services du système combiné DVB-S/RCS. Il est composé aussi d'une cellule WiMAX d'une couverture de 10 km de rayon et d'une surface près de 315 km².

La zone commune de Handover entre les deux cellules est d'une surface près de 40 km².

Dans cette infrastructure, et avec le premier scénario, nous allons traquer le mouvement d'un train localisé au début dans la cellule couverte par le satellite et se déplaçant vers la cellule WiMAX en passant par la zone de Handover entre les deux cellules.

Le train est équipé d'un terminal satellite (ST) de type : « Portable RCS terminal of Advantech » [97] et responsable du codage des données transmises ou reçues en format MPEG2-TS. La ST est connectée à l'intérieur du train à un router lié à son tour à un point d'accès responsable de transmettre les données aux utilisateurs installés dans le train, et équipés par des cartes WiMAX leur permettant de se connecter aussi au réseau WiMAX.

Les simulations vont s'appliquer sur un seul équipement utilisateur, et nous allons tester durant les simulations deux vitesses du train : 90 et 130 km/h.

Le trafic simulé lors du déplacement du train est le Streaming vidéo. Nous allons appliquer le protocole MSCTP lors du passage du train par la zone de Handover.

Les utilisateurs finaux : utilisateur dans le train et son correspondant à l'extérieur doivent implanter tous les deux le protocole MSCTP au sein de leurs équipements.

Quand le train est localisé dans la zone de couverture du satellite, l'utilisateur à l'intérieur du train va interagir avec la ST qui transmet les données au satellite qui les envoie à son tour vers son correspondant. Ensuite, quand le train entre dans la zone de Handover, l'utilisateur équipé de la carte WiMAX va détecter l'existence du réseau WiMAX, et va tenter d'obtenir une adresse IP WiMAX en contactant la BS qui va contacter à son tour un serveur DHCP pour répondre à sa requête. Si la réponse est positive, l'utilisateur reçoit sa nouvelle adresse IP WiMAX, et donc va contacter son correspondant via le réseau spatial pour qu'il puisse ajouter cette adresse à sa table d'adresses, et son correspondant va lui répondre avec un ACK.

Ensuite, quand le train arrive à la fin de la zone de Handover, juste au début de la zone de couverture de la cellule WiMAX, l'utilisateur décidera d'utiliser sa nouvelle adresse IP WiMAX comme adresse primaire et notifiera sa décision à son correspondant via le réseau WiMAX, et ce dernier répondra avec un ACK.

Finalement, quand le train quittera définitivement la zone de Handover vers la cellule WiMAX, l'utilisateur continuera sa communication avec son correspondant via le réseau WiMAX.

Dans le deuxième scénario, la mobilité sera dans le sens contraire : déplacement du train depuis la cellule WiMAX vers la cellule couverte par le satellite.

Le modèle d'interconnexion, ainsi que le premier scénario de mobilité sont illustrés dans la figure ci-dessous :

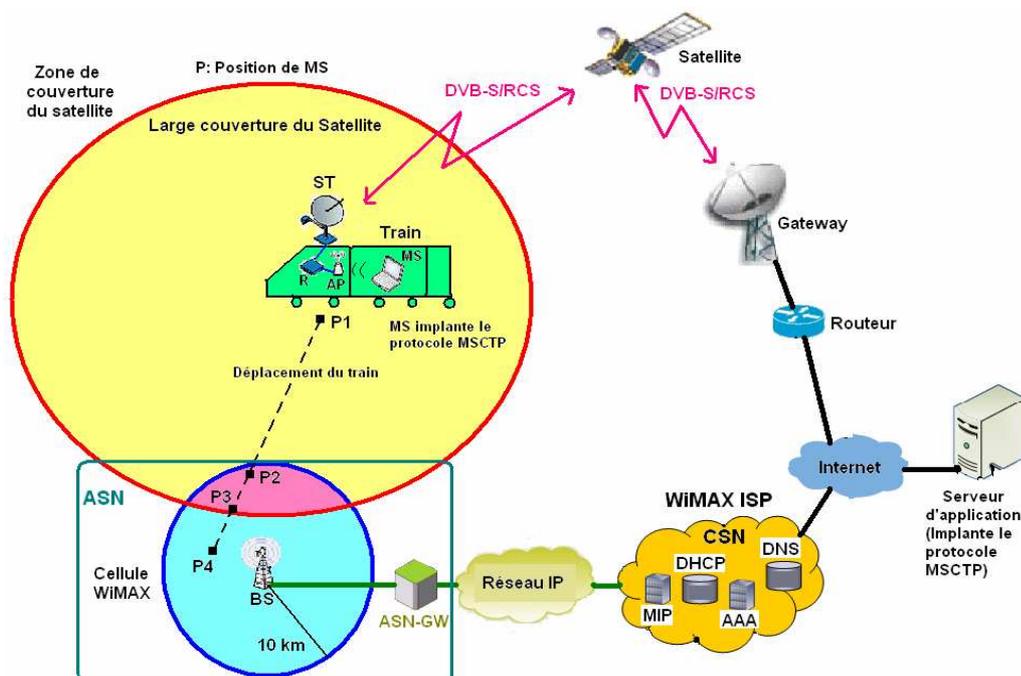


Figure 105. Modèle d'interconnexion et 1^{er} scénario de mobilité

3.4 Paramètres des simulations et critères de performance

3.4.1 Paramètres des simulations

Les deux cas simulés dans ce travail sont : le cas où le train passe depuis la cellule couverte par le satellite vers la cellule couverte par WiMAX, et le cas contraire.

Pour chaque cas, nous allons tester deux vitesses de train : 90 et 130 km/h.

Dans les deux cas, le train traverse 5 km hors de la zone de Handover dans la cellule WiMAX ou satellite, et traverse 3 km dans la zone de Handover.

Le durée d'une simulation est fixé à 520 secondes (8.66 minutes), et les résultats sont calculés chaque 40 secondes hors de la zone de Handover, et chaque 20 secondes dans la zone de Handover. Le type de trafic échangé dans le simulateur NS2 est le CBR/SCTP, et la taille d'un paquet est fixée à 4960 octets.

Les paramètres des simulations du satellite géostationnaire transparent, des systèmes DVB-S et DVB-RCS, et du réseau WiMAX mobile sont illustrés dans le tableau ci-dessous :

Satellite GEO	Altitude: 35800 km, Période orbitale: 23 hrs 56 min 4.09 sec (période de rotation de la terre), Inclinaison: 0.3° (orbite équatoriale), Excentricité: 0.2 mm, Angle d'élévation minimal au bord de la couverture: 80°, Seuil de latitude: 70°, Seuil de longitude: 10°, Bande passante de liaison inter-commutateurs: 25 Mb.
DVB-S	Fréquence: 18 MHz (bande Ku), Bande passante descendante: 7 Mb, Schéma d'accès multiple: TDM, Modulation: QPSK, Codage: Concatenated convolution & Reed-Solomon.
DVB-RCS	Fréquence: 30 MHz (bande Ka), Bande passante montante: 1.5 Mb, Schéma d'accès multiple: MF-TDMA, Modulation: QPSK, Codage: Concatenated convolution & Reed-Solomon + Turbo codes.
IEEE 802.16e	Portée de la transmission: (Puissance de transmission: 15W, Seuil de réception: 7.59375e-15, Seuil de la porteuse d'envoi: 2.13841e-16), Distance (Rayon de couverture): 10 Km, Modèle de propagation radio: TwoRayGround, Gain d'antenne d'émission: 1 dB, Gain d'antenne de réception: 1 dB, Perte du système: 1 dB, Hauteur d'antenne d'émission: 1.5 m, Hauteur d'antenne de réception: 1.5m, Modulation: OFDMA, Fréquence: 3.5 GHz, Fréquence de la bande passante: 5 Mhz, Multiplexage: TDD.

Tableau 18. Paramètres des simulations

3.4.2 Critères de performance

Les critères de performance retenus dans cette étude pour évaluer l'efficacité de notre proposition sont : le délai de bout en bout, la gigue, le taux des paquets perdus, et le débit.

3.5 Résultats des simulations

Tout d'abord nous allons commencer par simuler les délais des deux scénarios de mobilité en testant avec les deux vitesses proposées.

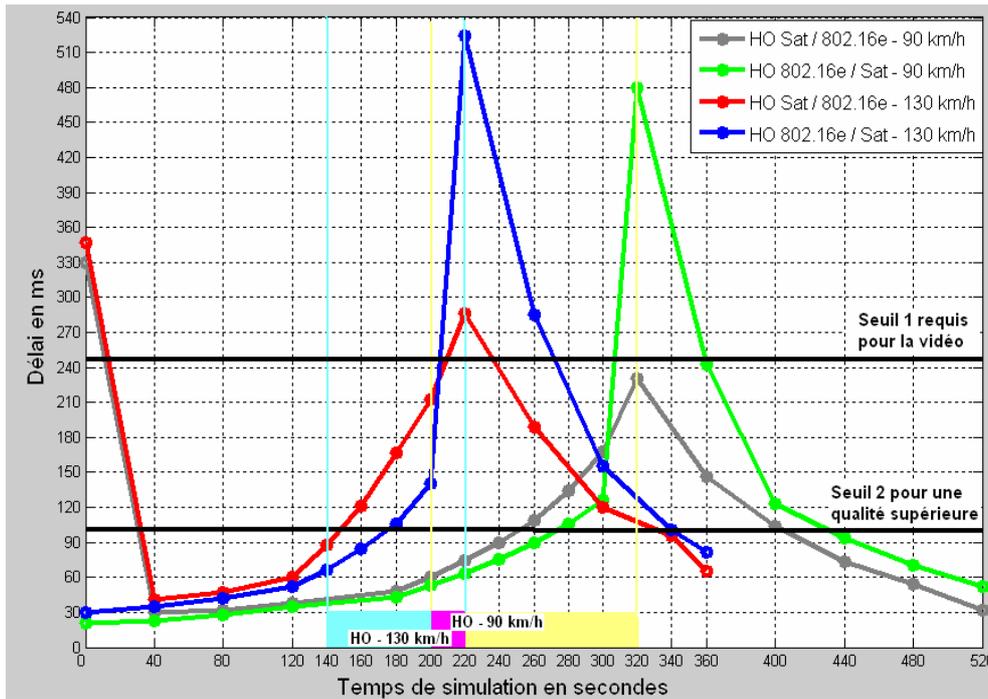


Figure 106. Délais

Plusieurs observations peuvent être faites. Nous remarquons tout d'abord que la communication par satellite requière un long délai pour démarrer. Ensuite, en comparant les résultats pour les deux vitesses du train: 90 et 130 km/h, nous observons que plus la vitesse augmente, plus les délais augmentent.

Ensuite, le point le plus important que nous observons est que les délais durant le Handover depuis le satellite vers le WiMAX sont meilleurs que ceux obtenus dans le sens inverse. Cette différence est due au temps de latence requis par le satellite pour démarrer la communication. Notons aussi que les délais durant la communication via le réseau WiMAX sont meilleurs que ceux avec le satellite, et cela est dû aux différences des distances entre l'équipement utilisateur et la BS, et l'équipement utilisateur et le satellite géostationnaire.

Dans cette figure, le seul cas qui offre une bonne qualité du Streaming vidéo même durant le Handover, et respecte totalement le seuil fixé [73] pour le Streaming vidéo pour la mesure de la QoS (voir figure 106), est le cas de Handover depuis le satellite vers le WiMAX mobile avec une vitesse de train égale à 90 km/h.

Avec une vitesse de 130 km/h, et dans le cas du Handover depuis le satellite vers le WiMAX, les délais durant le Handover excèdent légèrement le seuil fixé. Et dans le cas du Handover depuis le WiMAX vers le satellite, les délais excèdent largement le seuil durant le Handover. Dans les zones hors Handover, la qualité de service est bonne pour les deux types de technologies : DVB-S/RCS et WiMAX mobile.

Nous passerons maintenant à la simulation des giges pour les deux scénarios de mobilité en testant avec les deux vitesses.

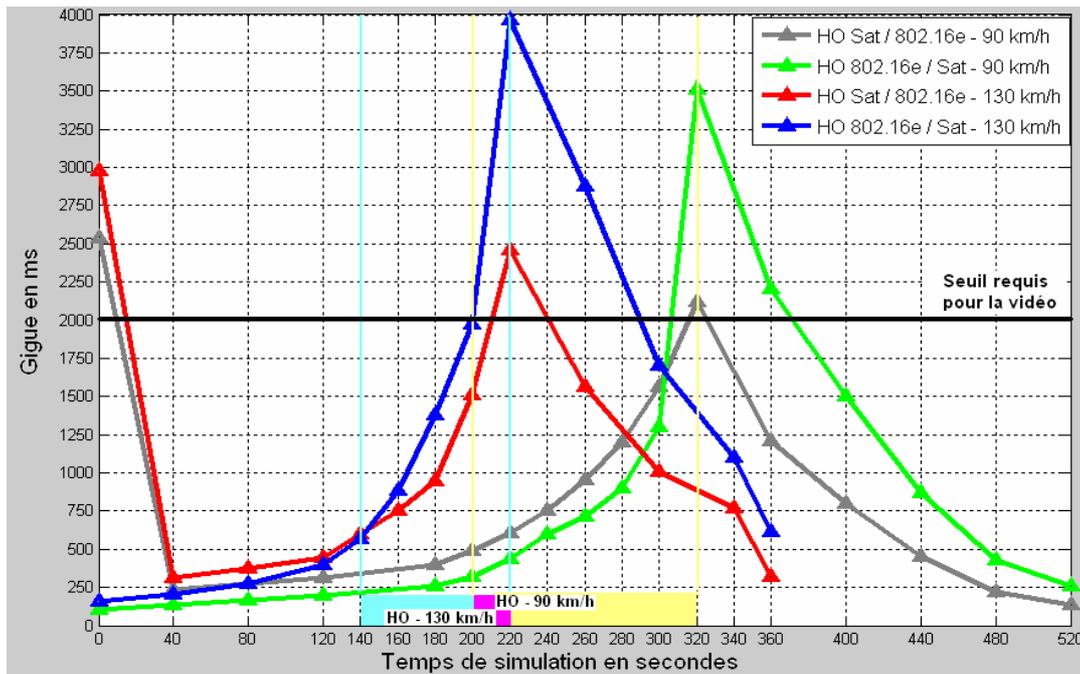


Figure 107. Giges

Concernant les giges (variation des délais), et similairement aux délais, dans cette figure, le Handover depuis le satellite vers WiMAX produit des résultats meilleurs que dans le cas contraire. Plus la vitesse est faible, meilleure est la qualité.

Le seul cas qui respecte le seuil fixé [73] pour évaluer la QoS du trafic Streaming vidéo (voir figure 107) est le cas du Handover depuis le satellite vers le WiMAX avec une vitesse de train équivalente à 90 km/h.

Les résultats de la gigue obtenus dans le cas du Handover depuis WiMAX vers le satellite excèdent largement le seuil. Dans les zones hors Handover, le seuil est respecté par les deux technologies, excepté au début de la communication avec le satellite.

Nous procéderons maintenant à l'étude des taux de paquets perdus pour les deux scénarios de mobilité en testant avec les deux vitesses :

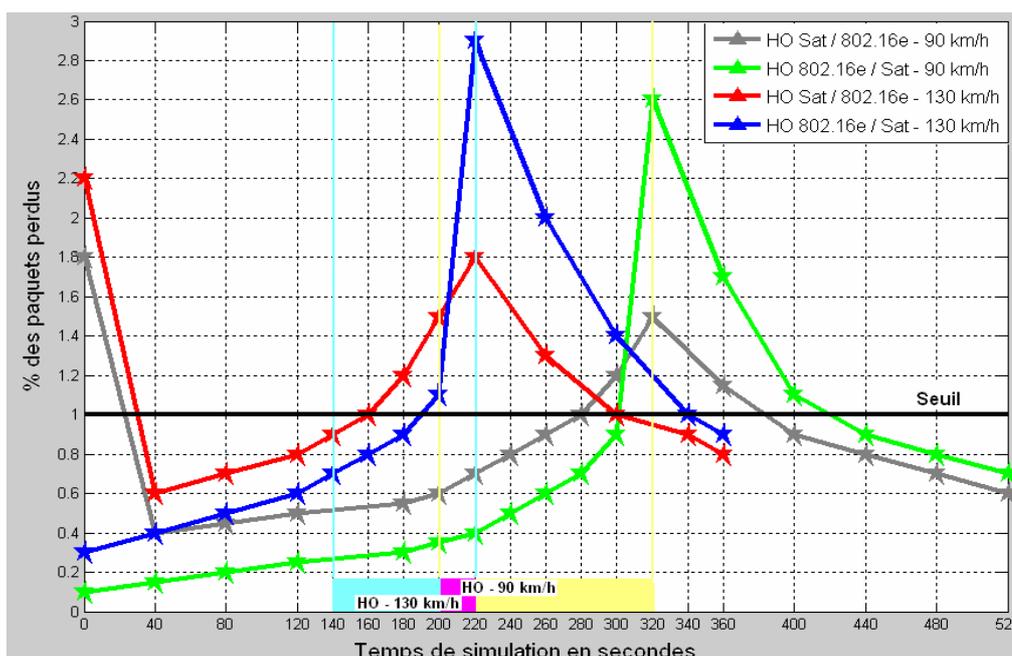


Figure 108. Taux des paquets perdus

Dans cette figure, le seuil de la QoS (voir figure 108) n'est respecté par aucune courbe durant le Handover. Les meilleurs résultats de perte sont obtenus dans le cas du Handover vertical depuis le satellite vers WiMAX mobile avec la vitesse de train équivalente à 90 km/h.

Passons enfin à la simulation des débits pour les deux scénarios de mobilité en testant avec les deux vitesses :

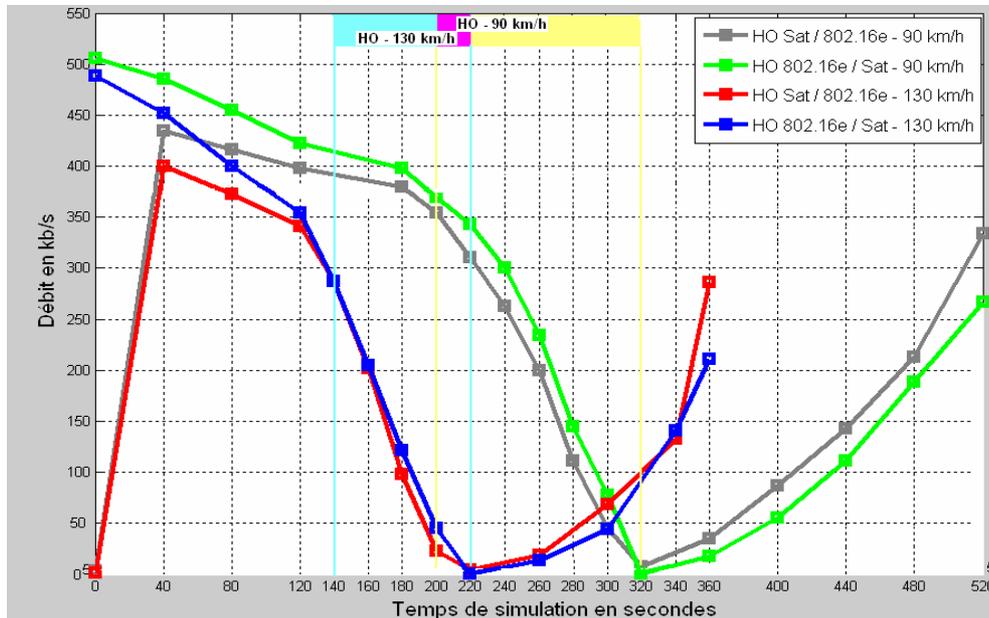


Figure 109. Débits

Notons dans cette figure que les débits offerts par le WiMAX mobile sont meilleurs que ceux offerts par le DVB-S/RCS. Aussi, les débits diminuent considérablement durant le Handover vertical. En revanche durant le Handover depuis le satellite vers le WiMAX mobile, les valeurs de débit sont acceptables, contrairement à l'autre sens de Handover où le minimum des valeurs avec une vitesse de 90 km/h est de 0.5 kb/s, et avec une vitesse de 130 km/h est de 0.1 kb/s.

Généralement, en se référant sur la figure ci-dessus, les débits pour les deux sens du Handover sont acceptables.

3.6 Conclusion

L'interconnexion et le Handover vertical entre le satellite et la 3G n'a pas encore été souvent pris en compte. Dans le cadre du passage à la 4G, nous avons proposé une solution d'interconnexion entre le WiMAX mobile et le satellite, et nous avons proposé une pile protocolaire convergente fondée sur le protocole MSCTP qui sera appliqué lors du Handover vertical entre WiMAX et le satellite.

Les résultats des simulations du trafic de Streaming vidéo obtenus de notre modèle, montrent que le sens de Handover depuis le satellite vers WiMAX mobile offre une QoS meilleure que celle obtenue dans le sens contraire. L'augmentation de la vitesse de déplacement dégrade la QoS.

La QoS offerte par WiMAX mobile est meilleure que celle offerte par le satellite, parce que la configuration des paramètres du WiMAX sont meilleurs que ceux du satellite.

Finalement, les meilleurs résultats obtenus dans les simulations sont ceux où le Handover se déroule depuis le satellite vers le WiMAX avec la vitesse de 90 km/h.

4 Interconnexion du 802.16e avec la 3G+ (LTE)

4.1 Introduction

Ce travail vise à établir l'interconnexion entre deux technologies candidates à la 4G : le WiMAX mobile et le LTE.

Pour cela, un modèle d'interconnexion et d'interopérabilité sera proposé ; et nous allons aussi proposer de combiner l'architecture MIH avec le protocole MSCTP pour pouvoir résoudre le problème de Handover vertical entre les deux technologies dans le cas de la mobilité (cette combinaison de mécanismes de mobilité proposée a été déjà utilisée dans le cas du Handover vertical entre IEEE 802.16e et UMTS à la section 2.2).

Donc nous allons concevoir la pile protocolaire résultante du fonctionnement de LTE et du WiMAX mobile sous MIH, et de l'intégration du protocole MSCTP comme couche supérieure dans l'architecture MIH.

Aucune simulation ne sera réalisée dans cette étude, nous nous concentrons sur les aspects protocolaires et architecturaux.

4.2 Fonctionnement de MIH+MSCTP

Au niveau du Handover vertical entre le LTE et le WiMAX mobile, nous proposons d'implanter le protocole MSCTP comme couche supérieure dans l'architecture MIH, et de cette façon nous pourrions profiter de la performance des deux techniques au cours du Handover vertical.

Les bénéfices d'un tel choix sont que MIH va permettre à la MS de détecter, prédire et tester les nouveaux réseaux à sa proximité avant le Handover, et que MSCTP va permettre à la MS d'ouvrir plusieurs sessions IP en même temps durant le Handover pour éviter l'interruption de la communication en cours. L'utilisation des deux techniques nous permettra donc d'améliorer la QoS durant le Handover vertical entre les réseaux.

Durant sa communication avec son correspondant (CN) via le premier réseau et avant le processus du Handover, la MS va utiliser MIH pour détecter de nouveaux réseaux. Quand elle en détecte au moins un, elle procède à l'initiation du Handover en mesurant le niveau de la QoS du réseaux détecté. Si la décision du niveau de QoS est positive, la MS peut aller à l'étape suivante qui consiste à tester la disponibilité du nouveau réseau. Si ce dernier est disponible, le processus du Handover peut être déclenché, et la MS va demander une nouvelle adresse IP au nouveau réseau. Si tout va bien, la MS obtiendra une deuxième adresse IP du nouveau réseau, et le fonctionnement avec MIH finira à ce stade et celui avec MSCTP va commencer.

A ce stade, la MS va continuer sa communication avec le CN toujours via le premier réseau. Ensuite le MS va notifier au CN d'ajouter sa deuxième adresse IP comme adresse secondaire à sa table d'adresses. Après, à la fin du processus du Handover, la MS va notifier au CN via le deuxième réseau d'assigner la deuxième adresse IP comme adresse IP primaire de communication. Finalement après le Handover, la MS va notifier au CN de supprimer l'ancienne adresse IP de sa table d'adresse et continue leur communication via le deuxième réseau.

Le schéma de Handover décrivant les étapes du fonctionnement des deux techniques est présenté dans la figure ci-dessous [91], [92], [94] :

Cette pile protocolaire va nous permettre d'exécuter le Handover vertical entre WiMAX mobile et LTE, en utilisant l'architecture IEEE 802.21 et le protocole MSCTP ensemble. La pile protocolaire décrite est présentée dans la figure ci-dessous :

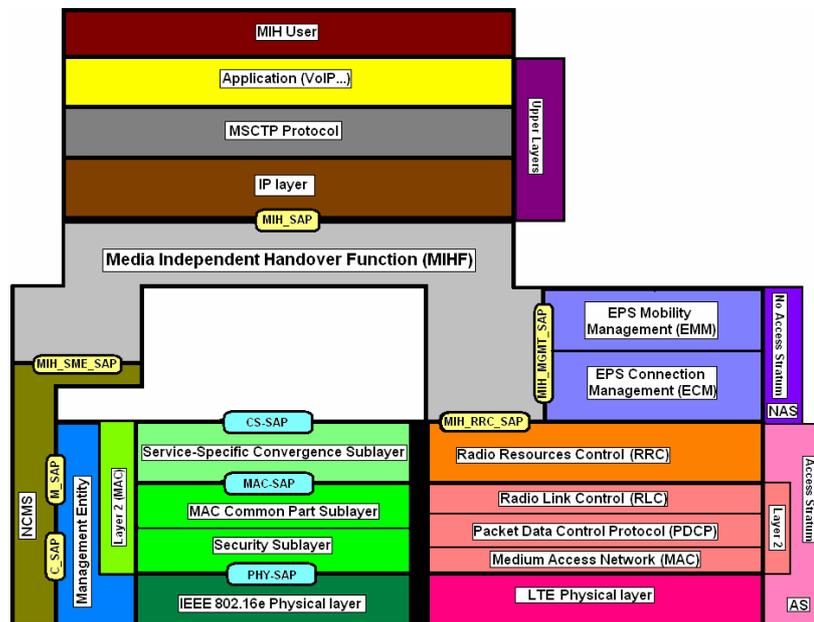


Figure 111. Pile protocolaire

4.4 Modèle d'interaction et schémas du Handover

4.4.1 Modèle d'interconnexion et scénarios de mobilité

Le modèle d'interconnexion entre WiMAX mobile et LTE fondé sur MIH + MSCTP est composé d'une cellule WiMAX et une cellule LTE, et les deux cellules forment une zone commune de Handover.

La station mobile qui va effectuer le Handover entre les deux cellules doit pouvoir opérer avec les deux réseaux.

Concernant le mobile WiMAX, la BS est connectée à un ASN-GW lié à son tour via le réseau IP au CSN. Dans le réseau LTE, la eNodeB est connectée au S-GW et au MME, et le S-GW est lié à son tour au PDN-GW qui permet l'accès vers le réseau WiMAX.

L'interconnexion entre les deux réseaux est assurée par le PDN-GW (SAE Anchor). Pour utiliser les services de MIH dans le modèle d'interconnexion un ensemble de conditions doit être respecté: l'abonné mobile doit implanter le module MIH, un serveur MIH doit être installé entre les deux réseaux, le CSN du WiMAX doit ajouter un module MIH et le SAE du réseau LTE aussi. Et dans ce cas l'échange des informations dans les deux réseaux va être effectué entre les modules de MIH installés dans les deux réseaux et le serveur MIH.

Pour utiliser le protocole MSCTP, les utilisateurs finaux (station mobile et son correspondant) doivent implanter ce protocole dans leurs couches supérieures.

Pour pouvoir décrire les schémas d'échanges des messages au cours du Handover, deux scénarios de mobilité sont proposés : dans le premier scénario, la MS localisée au début dans la première position dans la cellule LTE va se déplacer vers la deuxième position dans la zone de Handover entre les deux réseaux ; ensuite, elle va quitter la zone de Handover vers la troisième position dans la fin de la zone de Handover et le début de la cellule WiMAX. Et finalement, elle va rejoindre la quatrième position localisée dans la cellule WiMAX.

Dans le deuxième scénario, la MS va traverser le même chemin mais dans le sens contraire, depuis la cellule WiMAX vers la cellule LTE.

Le modèle d'interconnexion et le deuxième scénario sont illustrés dans la figure ci-dessous :

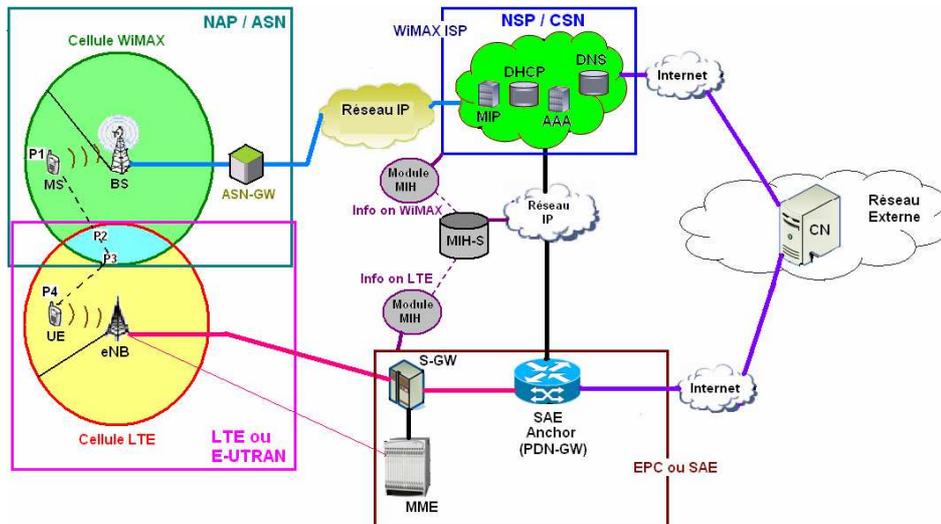


Figure 112. Modèle d'interconnexion et 2^{ème} scénario de mobilité

4.4.2 Schémas du Handover

Commençons par détailler l'échange des messages durant le Handover depuis le WiMAX mobile vers le LTE en utilisant MIH et MSCTP.

Au début, la MS est localisée dans la cellule WiMAX dans la première position en train de communiquer avec son correspondant localisé dans un réseau externe, via le réseau WiMAX (BS – ASN-GW – CSN – Internet – CN). Ensuite, quand elle commence à se déplacer vers la deuxième position dans la zone de Handover, l'entité MIHF dans la MS échange des informations sur les réseaux voisins avec les modules MIH pour détecter les réseaux disponibles.

En s'approchant de la deuxième position dans la zone de Handover, et quand l'un des rapports échangés avec les modules MIH est positif, et que la MS détecte un nouveau réseau qui est dans ce cas le réseau LTE ; l'initiation et la préparation du Handover commencent, et l'échange des messages entre les entités MIH se focalise sur la mesure, le Mapping et la comparaison des niveaux de la QoS entre les deux réseaux. Si le rapport de mesure est positif, la réservation des ressources du réseau LTE sera établie.

A ce stade, la MS continue toujours à communiquer avec son correspondant via le réseau WiMAX. Ensuite, quand la MS va commencer à quitter la deuxième position vers la troisième située à la fin de la zone de Handover et au début de la cellule du réseau LTE, elle va procéder à l'exécution du Handover ; pour cela elle devra d'abord obtenir une adresse IP du réseau LTE, et donc elle demandera du réseau LTE une adresse IP, et si tout va bien elle l'aura [98] (plus d'informations dans le schéma 2 dans l'annexe).

Après l'obtention de l'adresse IP LTE, la MS possède maintenant deux adresses IP, et avec l'aide du protocole MSCTP, la MS pourra classer ses adresses IP et choisir une comme adresse primaire. Ensuite elle va prévenir son correspondant de l'existence de sa deuxième adresse IP obtenue récemment. Son correspondant va ajouter sa 2^{ème} adresse comme adresse secondaire dans sa table d'adresses et va confirmer la bonne réception à la MS par un ACK.

Après, quand la MS atteint la troisième position à la fin de la zone de Handover et au début de la cellule LTE, elle va utiliser l'extension DAR du protocole MSCTP pour choisir la deuxième adresse IP comme adresse IP primaire au lieu de la première qui deviendra secondaire ; ensuite elle va contacter son correspondant via le réseau LTE pour le prévenir

d'assigner la deuxième adresse IP comme adresse IP primaire, et son correspondant va répondre avec un ACK. Et la MS va continuer sa communication avec son correspondant via le réseau LTE.

Finalement, quand la MS quitte la 3^{ème} position en direction de la 4^{ème} position dans la cellule LTE, elle va utiliser l'extension DAR du protocole MSCTP pour supprimer sa 1^{ère} adresse IP WiMAX parce qu'elle n'en aura plus besoin dans la cellule LTE, et va contacter son correspondant via le réseau LTE pour l'avertir de supprimer la 1^{ère} adresse de sa table d'adresses, ce que son correspondant confirmera avec un ACK ; et la MS continuera finalement sa communication avec son correspondant via le réseau LTE (eNodeB – S-GW – PDN-GW – CN).

L'échange des messages au cours du Handover dans l'autre sens : depuis LTE vers le WiMAX est presque pareil, excepté à l'étape de l'obtention de l'adresse IP WiMAX (deuxième adresse), la MS doit contacter une BS pour ça, et la BS va contacter à son tour un serveur DHCP pour l'attribution de l'adresse IP (pour plus de détails sur l'échange des messages dans les deux sens, voir les schémas 2 et 3 respectivement dans l'annexe).

4.5 Conclusion

Dans le cadre de la préparation du réseau 4G, il est important de proposer des modèles d'interconnexion et d'interopérabilité entre des technologies avancées. Pour cela nous avons proposé cette étude qui conçoit en premier lieu un modèle d'interconnexion entre le WiMAX mobile et le LTE, et qui traite en deuxième lieu le cas du Handover vertical en proposant de combiner deux protocoles efficaces de gestion de la mobilité : le MIH et le MSCTP.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Les systèmes de communication utilisant le support hertzien constituent aujourd'hui une solution de substitution aux moyens filaires pour le raccordement direct des clients. Plusieurs communautés collaborent afin de standardiser les technologies qui sont, tantôt concurrentes, tantôt complémentaires de ces réseaux. Chaque technologie devrait pouvoir trouver sa place, son usage et sa cible.

Le choix d'une technologie sans fil dépend de l'usage que l'on souhaite en faire. Le WiMAX est l'une de ces nouvelles technologies. Elle est fondée sur le standard IEEE 802.16, et porte beaucoup de promesses pour l'avenir.

Cette technologie, dans sa version mobile, ou encore le IEEE 802.16e, permet d'assurer la mobilité des utilisateurs. Pour maintenir la connexion au cours de leurs déplacements, le processus de Handover joue un rôle très important.

Au cours du Handover dans le WiMAX mobile, un problème majeur se manifeste quand un usager mobile se déplace à une grande vitesse. Le problème se résume au fait que la QoS se dégrade et qu'une coupure de service est inévitable d'autant plus que la plupart des normes de communication mobiles utilisent la technique du Hard Handover pour des raisons de gain de ressources. Ce genre de problème n'est pas du tout acceptable dans le cas d'un trafic temps-réel sensible au délai. La première contribution était donc de prouver l'efficacité de la technique FBSS peu employée pour le moment par rapport au Hard Handover dans le cas du transfert intercellulaire de niveau 2 (entre deux cellules gérées par la même passerelle) à forte mobilité et pour du trafic temps réel. Au travers d'un scénario autoroutier, nous avons remarqué l'efficacité du mécanisme FBSS qui utilise la technique « make-before-break » par rapport au Hard Handover dans le cas du déplacement d'une station mobile à grande vitesse.

Après avoir traité le problème de mobilité à grande vitesse, nous nous sommes intéressés à une mobilité faible et moyenne. Pour cela nous avons proposé un modèle en zone urbaine et une variété de types de trafic. Il apparaît que pour le trafic temps réel et une mobilité de niveau 2, il y a un seuil au-delà duquel le Hard Handover ne répond plus aux besoins de QoS. Au-delà de cette vitesse, l'utilisation du mécanisme FBSS sera appréciée par le trafic temps-réel, mais à condition de vérifier la disponibilité des stations de bases, car ce mécanisme est gourmand en ressources. Nous avons ensuite traité le cas du transfert intercellulaire de niveau 3 avec le protocole MIP. Le niveau de QoS obtenu n'est pas du tout acceptable pour le trafic temps-réel, ce qui nous a amené à proposer l'utilisation du protocole MSCTP connu avec sa technique de multi-homing comme une alternative à MIP et PMIP dans le cas du transfert intercellulaire de niveau 3 (sachant que WiMAX mobile utilise MIP et PMIP dans le cas du Handover de niveau 3). Nous avons alors testé la performance du protocole MSCTP en le comparant avec MIP et PMIP. MSCTP produit alors des résultats relatifs à la QoS nettement meilleurs que ceux obtenus avec PMIP et MIP, sachant que PMIP génère des résultats meilleurs que MIP.

L'ensemble de ces travaux met en avant l'importance cruciale de l'algorithme de décision du Handover. Nous avons alors proposé un tel algorithme de décision fondé sur la logique floue. Pour mettre en évidence l'efficacité de cet algorithme, nous l'avons comparé avec le Handover classique du WiMAX mobile dans un scénario comprenant plusieurs types de mobilité et de trafic. Les résultats obtenus sont encourageants.

La deuxième problématique principale que nous avons traitée est l'interconnexion et l'interopérabilité entre les réseaux en tenant compte de la mobilité des utilisateurs.

Nous avons alors choisi d'étudier cette interopérabilité dans le cas de coexistence entre WiMAX et plusieurs exemples typiques de réseau : IEEE 802.11e pour WIFI, UMTS pour les réseaux 3G, DVB-S/RCS pour les systèmes satellitaires et LTE pour la transition vers les réseaux 4G.

Dans l'IEEE 802.11e, nous avons proposé au niveau du Handover vertical d'appliquer MIH, puis MSCTP pour comparer leurs performances. Avec les deux mécanismes nous avons obtenu des résultats satisfaisants quand la vitesse n'est pas très grande, sachant qu'avec MSCTP les résultats sont légèrement meilleurs. Mais quand la vitesse de mobilité est importante, les résultats se dégradent avec les deux mécanismes.

Pour l'UMTS, nous avons pensé à combiner les deux mécanismes MIH et MSCTP lors du transfert intercellulaire vertical au lieu d'appliquer chaque mécanisme seul. L'intérêt d'une telle proposition est de profiter de la détection des informations sur les réseaux avant le Handover avec MIH, et de la technique du multi-homing au cours du Handover avec MSCTP pour obtenir une meilleure QoS. Pour cela, nous avons intégré WiMAX mobile et UMTS comme couches inférieures dans MIH, et nous avons intégré MSCTP comme couche supérieure. Nous avons simulé chaque mécanisme seul, puis leur combinaison. Il apparaît que la technique qui offre une meilleure QoS est la combinaison de MIH et MSCTP.

Dans le cas satellitaire DVB-S/RCS, nous avons proposé une pile protocolaire convergente adaptée au système DVB-S/RCS pour lui permettre de supporter le trafic IP et le protocole MSCTP, sachant que nous allons utiliser ce dernier dans le cas du Handover vertical entre le WiMAX mobile et le satellite. Ensuite, nous avons conçu un modèle de mobilité fondé sur le déplacement d'un train entre deux cellules WiMAX et DVB-S/RCS. Les résultats obtenus avec les simulations de notre modèle d'interopérabilité en appliquant MSCTP durant le Handover, sont acceptables dans le cas d'échange d'un trafic de type Streaming vidéo.

Pour LTE, nous proposons enfin d'adopter la même combinaison des mécanismes MIH et MSCTP que celle utilisée auparavant dans le cas de l'interconnexion entre WiMAX mobile et UMTS.

En résumé, il apparaît clairement que pour traiter efficacement la mobilité de niveau 2 et de niveau 3 pour des systèmes homogènes et encore plus des systèmes hétérogènes, une solution unique n'est pas satisfaisante. Il vaudra mieux combiner ces techniques en particulier en tenant compte des paramètres environnementaux et des besoins en QoS des utilisateurs. De la même façon, une algorithmie assez sophistiquée se doit d'être proposée pour la mise en œuvre des mécanismes de décision des Handovers.

Dans les travaux que nous avons menés, nous nous sommes focalisés sur des technologies que nous pouvons qualifier de pré-4G. Dans les perspectives que nous pouvons nous fixer, on peut citer les solutions LTE-Advanced et 802.16m qui, elles, pourront prétendre au label 4G. Il s'agira alors de s'intéresser à la gestion de la mobilité au sein de ces technologies, entre elles et avec les solutions que nous avons étudiées dans nos travaux. En terme de gestion de la QoS, beaucoup de travaux restent encore à mener afin de bien vérifier que les utilisateurs auront bien des niveaux de QoS suffisants lorsqu'ils basculeront d'un système à un autre.

L'optimisation des Handovers, tant en termes de protocoles que d'algorithmes décisionnels, reste toujours un sujet d'actualité en particulier dans le cadre du Handover vertical. Dans le cadre de la Release 8 du 3GPP, des études ont été faites pour optimiser les Handovers entre LTE et les systèmes 3GPP2 ; les travaux concernant les optimisations des Handovers entre LTE et d'autres systèmes non-3GPP ont été renvoyés à des versions ultérieures. Comme on le voit, le sujet suscitera donc encore de nombreux travaux dans les années à venir.

Comme perspectives, ce que nous avons effectué jusqu'à maintenant nous permettra de définir un grand réseau mobile avancé composé d'une technologie de base interconnectée

avec plusieurs réseaux connus. Dans ce contexte, nous allons proposer des modèles d'interconnexion et de mobilité, composés de plusieurs technologies interconnectés, et nous allons proposer pour chaque passage entre deux cellules d'une même technologie, ou deux cellules de technologies différentes un ou plusieurs protocoles de mobilité en se reposant sur les travaux que nous avons déjà effectué. Nous pourrions par exemple dans ce cas modéliser un algorithme décisionnel qui gèrera les différentes entrées, pour proposer à la fin des décisions rapides et justes.

Nous prévoyons aussi d'intégrer le DVB-S2 qui est la dernière norme de communication par satellite proposée par l'ETSI, et l'IPoS qui est une norme récente proposée par les industriels spécialisés dans la communication spatiale, dans le contexte de l'interconnexion avec les technologies terrestres de type 4G. Et pourquoi ne pas envisager une solution d'interconnexion et de Handover entre deux normes récentes de communication par satellite comme DVB-S2 et IPoS?

Publications Internationales

- Articles de revues internationales :

- Tarek Bchini, Nabil Tabbane, Emmanuel Chaput, Sami Tabbane, André-Luc Beylot. “*Interconnection & Handover between IEEE 802.16e & UMTS*”. Dans: *International Journal of Advancements in Computing Technology (IJACT)*, AICIT, Vol. 1 N. 2, p.99-109, 05-Décembre-09. (Accessible depuis AICIT/IJACT).
- Tarek Bchini, Nabil Tabbane, Emmanuel Chaput, Sami Tabbane, André-Luc Beylot. “*Performance of Soft handover – FBSS compared to Hard handover in case of high speed in IEEE 802.16e for multimedia traffic*”. Dans: *International Journal on Computer Networks and Internet Research (CNIR)*, IGACT, Vol. 9 N. 2, p.53-58, 02-Décembre-09. (Accessible depuis IGACT/CNIR).

- Conférences internationales :

- Tarek Bchini, Nabil Tabbane, Emmanuel Chaput, Sami Tabbane, André-Luc Beylot. “*Performance of MSCTP Protocol in Vertical Handover Case Between IEEE 802.16e and IEEE 802.11e Networks*”. Dans: *IEEE International Global Information Infrastructure Symposium (GIIS 2009)*, Hammamet-Tunisie, 23-Juin-09/26-Juin-09 IEEE, p. 1-4, 2009. (Accessible depuis IEEE Xplore).
- Tarek Bchini, Nabil Tabbane, Emmanuel Chaput, Sami Tabbane, André-Luc Beylot. “*Interaction & Handover between IEEE 802.16e and DVB-S/DVB-RCS using MSCTP protocol*”. Dans: *IEEE International Symposium on Computers and Communications (ISCC 2009)*, Sousse-Tunisie, 05-Juillet-09/08-Juillet-09, IEEE, p. 46-53. 2009. (Accessible depuis IEEE Xplore).
- Tarek Bchini, Nabil Tabbane, Emmanuel Chaput, Sami Tabbane, André-Luc Beylot. “*Hard Handover vs. Soft Handover for IEEE 802.16e in a City*”. Dans: *IEEE International Symposium on Computers and Communications (ISCC 2009)*, Sousse-Tunisie, 05-Juillet-09/08-Juillet-09, IEEE, p. 54-60. 2009. (Accessible depuis IEEE Xplore).
- Tarek Bchini, Nabil Tabbane, Emmanuel Chaput, Sami Tabbane, André-Luc Beylot. “*Inter-ASN Handover using MSCTP protocol in IEEE 802.16e networks*”. Dans: *Communication Networks and Services Research Conference (CNSR 2009)*, Moncton, New Brunswick, Canada, 11-Mai-09/13-Mai-09, IEEE/ACM, p. 133-138. 2009. (Accessible depuis IEEE Xplore et ACM Portal).
- Tarek Bchini, Nabil Tabbane, Emmanuel Chaput, Sami Tabbane, André-Luc Beylot. “*QoS in IEEE 802.16e for VoIP and Video with mechanism of Soft Handover - FBSS in a highway*”. Dans: *International Conference on Networking (ICN 2009)*, Gosier, Guadeloupe, France, 01-Mars-09/06-Mars-09, IEEE Computer Society, p. 88-93. Mars 2009. (Accessible depuis IEEE Xplore et ACM Portal).
- Tarek Bchini, Emmanuel Philippe Dubois, Emmanuel Chaput, André-Luc Beylot. “*QoS of TV Broadcast Traffic Over Convergent IP Solution for DVB-S*”. Dans: *AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2008)*, San Diego-USA, 10-Juin-08/12-Juin-08, American Institut of Aeronautics & Astronautics. Juin 2008. (Accessible depuis AIAA).

Annexe

Table 1. Description du 1^{er} scénario

Distance traversée en Km	Vitesse du MS en Km/h	Localisation du mobile	Durée de localisation en minutes	Temps de simulation en minutes
1.6	47	C1 (cellule numéro 1)	2.04	0 jusqu'à 2.04
0.4	72	Zone HO niveau 2 (C1, C3, C4)	0.33	2.04 jusqu'à 2.37
0.4	72	Zone HO niveau 2 (C3, C4)	0.33	2.37 jusqu'à 2.7
0.6	34	Zone HO niveau 3 (C3, C7)	1.05	2.7 jusqu'à 3.75
1.4	65	C7	1.29	3.75 jusqu'à 5.04
2	87	Zone HO niveau 3 (C7, C5)	1.37	5.04 jusqu'à 6.41
13	95	C5	8.21	6.41 jusqu'à 14.62
3	95	Zone HO niveau 2 (C5, C6)	1.89	14.62 jusqu'à 16.51
14	118	C6	7.11	16.51 jusqu'à 23.62
1	118	Zone HO niveau 3 (C6, C9)	0.5	23.62 jusqu'à 24.12
16	134	C9	7.16	24.12 jusqu'à 31.28
1	134	Zone HO niveau 2 (C9, C10)	0.44	31.28 jusqu'à 31.72
16.7	98	C10	10.22	31.72 jusqu'à 41.94
0.3	62	Zone HO niveau 3 (C10, C16)	0.29	41.94 jusqu'à 42.23
1.5	62	C16	1.45	42.23 jusqu'à 43.68
0.4	44	Zone HO niveau 2 (C16, C15)	0.54	43.68 jusqu'à 44.22
0.7	44	C15	0.95	44.22 jusqu'à 45.17
0.5	65	Zone HO niveau 3 (C15, C14, C13)	0.5	45.17 jusqu'à 45.62
0.1	37	Zone HO niveau 2 (C14, C13)	0.1	45.62 jusqu'à 45.78
1.8	37	C13	1.8	45.78 jusqu'à 48.69

Table 2. Description du 2^{ème} scénario

Distance traversée en Km	Vitesse du MS en Km/h	Localisation du mobile	Durée de localisation en minutes	Temps de simulation en minutes
0.9	51	C12	1.05	0 jusqu'à 1.05
1.2	51	Zone HO niveau 2 (C12, C14)	1.41	1.05 jusqu'à 2.46
0.3	55	C14	0.32	2.46 jusqu'à 2.78
0.3	32	Zone HO niveau 2 (C14, C11)	0.56	2.78 jusqu'à 3.34
0.5	67	C11	0.44	3.34 jusqu'à 3.78
0.2	67	Zone HO niveau 2 (C11, C10)	0.17	3.78 jusqu'à 3.95
15.5	100	C10	9.3	3.95 jusqu'à 13.25
0.3	100	Zone HO niveau 2 (C10, C9)	0.18	13.25 jusqu'à 13.43
15.2	112	C9	8.14	13.43 jusqu'à 21.57
0.5	112	Zone HO niveau 3 (C9, C6)	0.26	21.57 jusqu'à 21.83
12.3	132	C6	5.59	21.83 jusqu'à 27.42
3.2	132	Zone HO niveau 2 (C6, C5)	1.45	27.42 jusqu'à 28.87
12.1	94	C5	7.72	28.87 jusqu'à 36.59
0.7	94	Zone HO niveau 2 (C5, C3)	0.44	36.59 jusqu'à 37.03
0.8	82	C3	0.58	37.03 jusqu'à 37.61
0.2	82	Zone HO niveau 2 (C3, C4)	0.14	37.61 jusqu'à 37.75
1	72	C4	0.83	37.75 jusqu'à 38.58
0.4	58	Zone HO niveau 2 (C4, C2)	0.41	38.58 jusqu'à 38.99
0.4	35	C2	0.58	38.99 jusqu'à 39.57
0.1	35	Zone HO niveau 3 (C2, C8)	0.1	39.57 jusqu'à 39.67
0.5	35	C8	0.58	39.67 jusqu'à 40.52

Table 3. Règles d'Inférence

No°	VARIABLES D'ENTREE								SORTIE
	(si) meilleur RSS de BS détecté (est)	(et si) Type de HO (est)	(et si) Type de trafic (est)	(et si) Charge de BS (est)	(et si) Timer (est)	(et si) Vitesse (est)	(et si) Autre RSS de BS détecté (est)	(et si) Autre charge de BS (est)	(alors) la Décision de HO (est)
1	Faible	---	---	---	---	---	---	---	Pas de HO et re-mesurer
2	Moyen	---	---	Elevé	Faible	---	---	---	Pas de HO, incrémenter le Timer et re-tester la charge de BS
3	Moyen	---	---	Elevé	Elevé	---	---	---	Pas de HO et mesurer autres RSS des BSs
4	Moyen	Niveau 2	Data ou VoIP ou Vidéo	Moyen	---	Faible	---	---	Probablement Hard HO
5	Moyen	Niveau 2	Data ou VoIP ou Vidéo	Faible	---	Faible	---	---	Hard HO
6	Moyen	Niveau 2	Data	Moyen	---	Moyen	---	---	Probablement Hard HO
7	Moyen	Niveau 2	Data	Faible	---	Moyen	---	---	Hard HO
8	Moyen	Niveau 2	Data	Moyen	---	Elevé	---	---	Probablement Hard HO
9	Moyen	Niveau 2	Data	Faible	---	Elevé	---	---	Hard HO
10	Moyen	Niveau 2	Vidéo	Moyen	---	Moyen	Faible	---	Probablement FBSS entre ancienne et nouvelle BS seulement
11	Moyen	Niveau 2	Vidéo	Moyen	---	Moyen	Elevé	Elevé	Probablement FBSS entre ancienne et nouvelle BS seulement
12	Moyen	Niveau 2	Vidéo	Moyen	---	Moyen	Elevé	Faible	Probablement FBSS entre ancienne, nouvelle et autres BSs
13	Moyen	Niveau 2	Vidéo	Moyen	---	Elevé	Elevé	Elevé	Probablement pas de FBSS entre ancienne et nouvelle BS seulement
14	Moyen	Niveau 2	Vidéo	Moyen	---	Elevé	Elevé	Faible	Probablement pas de FBSS entre ancienne, nouvelle et autres BSs
15	Moyen	Niveau 2	Vidéo ou VoIP	Faible	---	Moyen	Elevé	Elevé	Probablement FBSS entre ancienne et nouvelle BS seulement
16	Moyen	Niveau 2	Vidéo ou VoIP	Faible	---	Moyen	Elevé	Faible	Probablement FBSS entre ancienne, nouvelle et autres BSs
17	Moyen	Niveau 2	Vidéo ou VoIP	Faible	---	Moyen	Elevé	Elevé	FBSS entre ancienne et nouvelle BS seulement
18	Moyen	Niveau 2	Vidéo ou VoIP	Faible	---	Moyen	Elevé	Faible	FBSS entre ancienne, nouvelle et autres BSs
19	Moyen	Niveau 2	Vidéo ou VoIP	Faible	---	Elevé	Elevé	Elevé	Probablement FBSS entre ancienne et nouvelle BS seulement

21	Moyen	Niveau 2	VoIP	Moyen	---	Moyen	Faible	---	Probablement FBSS entre ancienne et nouvelle BS seulement
22	Moyen	Niveau 2	VoIP	Moyen	---	Moyen	Elevé	Elevé	Probablement FBSS entre ancienne et nouvelle BS seulement
23	Moyen	Niveau 2	VoIP	Moyen	---	Moyen	Elevé	Faible	Probablement FBSS entre ancienne, nouvelle et autres BSs
24	Moyen	Niveau 2	VoIP	Moyen	---	Elevé	Elevé	Elevé	Probablement pas de FBSS entre ancienne et nouvelle BS seulement
25	Moyen	Niveau 2	VoIP	Moyen	---	Elevé	Elevé	Faible	Probablement pas de FBSS entre ancienne, nouvelle et autres BSs
26	Elevé	---	---	Elevé	Faible	---	---	---	Pas de HO, incrementer Timer et tre-tester la charge de BS
27	Elevé	---	---	Elevé	Elevé	---	---	---	Pas HO et mesurer autres RSS des BSs
28	Elevé	Niveau 2	Data ou VoIP ou Vidéo	Moyen	---	Faible	---	---	Hard HO
29	Elevé	Niveau 2	Data ou VoIP ou Vidéo	Faible	---	Faible	---	---	Hard HO
30	Elevé	Niveau 2	Data	Moyen	---	Moyen	---	---	Hard HO
31	Elevé	Niveau 2	Data	Faible	---	Moyen	---	---	Hard HO
32	Elevé	Niveau 2	Data	Moyen	---	Elevé	---	---	Hard HO
33	Elevé	Niveau 2	Data	Faible	---	Elevé	---	---	Hard HO
34	Elevé	Niveau 2	Vidéo ou VoIP	Moyen	---	Moyen	Faible	---	FBSS entre ancienne et nouvelle BS seulement
35	Elevé	Niveau 2	Vidéo ou VoIP	Moyen	---	Moyen	Elevé	Elevé	FBSS entre ancienne et nouvelle BS seulement
36	Elevé	Niveau 2	Vidéo ou VoIP	Moyen	---	Moyen	Elevé	Faible	FBSS entre ancienne, nouvelle et autres BSs
37	Elevé	Niveau 2	Vidéo ou VoIP	Moyen	---	Elevé	Elevé	Elevé	Probablement FBSS entre ancienne et nouvelle BS seulement
38	Elevé	Niveau 2	Vidéo ou VoIP	Moyen	---	Elevé	Elevé	Faible	Probablement FBSS entre ancienne, nouvelle et autres BSs
39	Elevé	Niveau 2	Vidéo ou VoIP	Faible	---	Moyen	Elevé	Elevé	FBSS entre ancienne et nouvelle BS seulement
40	Elevé	Niveau 2	Vidéo ou VoIP	Faible	---	Moyen	Elevé	Faible	FBSS entre ancienne, nouvelle et autres BSs
41	Elevé	Niveau 2	Vidéo ou VoIP	Faible	---	Moyen	Elevé	Elevé	FBSS entre ancienne et nouvelle BS seulement
42	Elevé	Niveau 2	Vidéo ou VoIP	Faible	---	Moyen	Elevé	Faible	FBSS entre ancienne, nouvelle et autres BSs

Elevé	Niveau 2	Vidéo ou VoIP	Faible	---	Elevé	Elevé	Elevé	FBSS entre ancienne et nouvelle BS seulement
Moyen	Niveau 3	Data	Moyen	---	---	---	---	Probablement pas de PMIP
Moyen	Niveau 3	Data	Faible	---	---	---	---	Probablement PMIP
Moyen	Niveau 3	Vidéo ou VoIP	Moyen	---	---	---	---	Probablement pas de MSCTP
Moyen	Niveau 3	Vidéo ou VoIP	Faible	---	---	---	---	Probablement MSCTP
Elevé	Niveau 3	Data	Moyen	---	---	---	---	Probablement PMIP
Elevé	Niveau 3	Data	Faible	---	---	---	---	PMIP
Elevé	Niveau 3	Vidéo ou VoIP	Moyen	---	---	---	---	Probablement MSCTP
Elevé	Niveau 3	Vidéo ou VoIP	Faible	---	---	---	---	MSCTP

Exemple 1. Exemple pratique sur la modélisation avec la logique floue

L'étape de fuzzification transforme les valeurs d'entrée en noms des fonctions d'appartenance et en degrés d'appartenance dans les fonctions. Par exemple, lors du déplacement d'une MS qui va effectuer un Handover ; à un moment donné elle est localisée dans une cellule d'un rayon de couverture égal à 3 km ; et le meilleur RSS qu'elle détecte avant le Handover est égal à -125 dBm.

En se référant à la figure 49 (Fonction d'appartenance RSS pour un rayon de couverture de BS = 3 km), la valeur -125 dBm correspond à l'ensemble d'appartenance «Elevé» avec un degré = 0.25, et correspond aussi à l'ensemble d'appartenance «Moyen» avec un degré = 1. Ensuite, par exemple, la MS va effectuer un Handover de niveau 2, et elle est en train d'échanger un trafic de type vidéo.

Supposant aussi que la charge de la BS choisie pour le Handover est de 81% ; donc en se référant à la figure 51 (Fonction d'appartenance charge de BS pour le trafic Vidéo), la valeur 81% va correspondre à l'ensemble d'appartenance «Elevé» avec un degré = 0.1, et va correspondre aussi à l'ensemble d'appartenance «Moyen» avec un degré = 0.9.

Nous proposons aussi qu'au moment du Handover, la vitesse du mobile sera égale à 65 km/h. En se référant à la figure 55 (Fonction d'appartenance Vitesse), la vitesse choisie va correspondre à l'ensemble d'appartenance «Elevé» avec un degré = 0.3, et va correspondre à l'ensemble d'appartenance «Moyen» avec un degré = 0.7.

A ce stade là, le mécanisme qui sera normalement appliqué durant le Handover sera le FBSS. Après le Handover, la MS va mesurer d'autres signaux des BSs voisines ; et supposant qu'elle a détecté un signal acceptable égal à 120 dBm d'une BS couvrant une cellule de 10 km de rayon ; dans ce cas en se référant à la figure 50 (Fonction d'appartenance RSS pour un rayon de couverture de BS = 10 km), la valeur du signal va correspondre à l'ensemble d'appartenance «Elevé» avec un degré = 1. Et finalement la charge de l'autre BS = 90% ; en se référant à la figure 51 (Fonction d'appartenance charge de BS pour le trafic Vidéo), la valeur 90% va correspondre à l'ensemble d'appartenance «Elevé» avec un degré = 1.

Donc la partie qui suit, nous allons passer à l'étape d'évaluation des règles ; et pour cela nous allons appliquer les règles d'inférence illustrées dans l'annexe page 112 sur la combinaison des variables d'entrée que nous venons de présenter en fonction de leurs fonctions d'appartenance, pour pouvoir obtenir des résultats en sortie.

Entrée / (Fonction d'appartenance , degré d'appartenance)

Type de Handover = Niveau 2

Type de trafic = Vidéo

RSS (rayon de 3 km) = -125 dBm / (Elevé, 0.25) et (Moyen, 1)

Charge de BS (trafic Vidéo) = 81 % / (Elevé, 0.1) et (Moyen, 0.9)

Vitesse du mobile = 65 km/h / (Elevé, 0.3) et (Moyen, 0.7)

Autre RSS (rayon de 10 km) = -120 dBm / (Elevé, 1)

Autre charge = 90 % / (Elevé, 1)

Le degré d'appartenance pour la sortie FHD peut être assigné au minimum, maximum, ou à la moyenne des degrés d'appartenance des règles antécédents. Dans cet exemple, une approche conservatrice est prise, et le degré de la sortie FHD est le minimum (se référer à la table des règles dans l'annexe page 112)

Nous allons maintenant exposer toutes les combinaisons possibles de chaque entrée avec la fonction d'appartenance correspondante, et comparer chaque combinaison obtenue avec la table des règles pour obtenir la FHD ; et le degré correspondant sera le minimum des degrés d'appartenance correspondants.

(Dans la suite E sera l'abréviation de «Elevé» et M sera l'abréviation de «Moyen»).

(E/RSS, E/charge de BS, E/vitesse, E/autre RSS, E/autre charge) → FHD = Pas de HO (d'après la table des règles) et Degré = $\min(0.25, 0.1, 0.3, 1, 1) = 0.1$

(E/RSS, M/charge de BS, E/vitesse, E/autre RSS, E/autre charge) → FHD = Probablement HO FBSS entre ancienne et nouvelle BSs seulement (d'après la table des règles) et Degré = $\min(0.25, 0.9, 0.3, 1, 1) = 0.25$

(M/RSS, E/charge de BS, E/vitesse, E/autre RSS, E/autre charge) FHD = Pas de HO (d'après la table des règles) et Degré = $\min(1, 0.1, 0.3, 1, 1) = 0.1$

(M/RSS, M/charge de BS, E/vitesse, E/autre RSS, E/autre charge) FHD = Probablement pas de HO FBSS entre ancienne et nouvelle BSs seulement (d'après la table des règles) et Degré = $\min(1, 0.9, 0.3, 1, 1) = 0.3$

(E/RSS, E/charge de BS, M/vitesse, E/autre RSS, E/autre charge) FHD = Pas de HO (d'après la table des règles) et Degré = $\min(0.25, 0.1, 0.7, 1, 1) = 0.1$

(E/RSS, M/charge de BS, M/vitesse, E/autre RSS, E/autre charge) FHD = HO FBSS entre ancienne et nouvelle BSs seulement (d'après la table des règles) et Degré = $\min(0.25, 0.9, 0.7, 1, 1) = 0.25$

(M/RSS, E/charge de BS, M/vitesse, E/autre RSS, E/autre charge) FHD = Pas de HO (d'après la table des règles) et Degré = $\min(1, 0.1, 0.7, 1, 1) = 0.1$

(M/RSS, M/charge de BS, M/vitesse, E/autre RSS, E/autre charge) FHD = Probablement HO FBSS entre ancienne et nouvelle BSs seulement (d'après la table des règles) et Degré = $\min(1, 0.9, 0.7, 1, 1) = 0.7$

Après l'évaluation de toutes les règles applicables aux entrées floues, il est souvent probable que quelques FHD ont plus qu'une seule valeur de degré d'appartenance, comme le cas ici avec le FHD 'Probablement HO' ci-dessus qui prend les deux valeurs 0.25 et 0.7. Dans une telle situation, on peut choisir entre trois possibilités : utiliser le minimum, le maximum ou la moyenne des degrés d'appartenance. Dans cet exemple, le FHD 'Probablement HO' est assigné à la valeur maximale = $\max(0.25, 0.7) = 0.7$.

Maintenant nous allons exposer les résultats finaux des états des FHD obtenus après évaluation des règles d'inférence avec leurs degrés correspondants :

Handover: 0.25 // Probablement Handover: 0.7 // Probablement pas de Handover: 0.3 // Pas de Handover: 0.1

Finalement dans l'étape de défuzzification, nous allons appliquer la formule de probabilité du Handover (1) pour calculer les probabilités, et la valeur finale du FHD sera obtenue comme suit :

$$\text{FHD} = \frac{(0.25 \times 1) + (0.7 \times 0.7) + (0.3 \times 0.4) + (0.1 \times 0.1)}{(0.25 + 0.7 + 0.3 + 0.1)} = 0.64$$

La probabilité de Handover = 0.64 > 0.6, donc initier le Handover en utilisant la technique FBSS entre l'ancienne et la nouvelle BSs seulement.

Schéma 1. Handover depuis 802.16e vers UMTS en utilisant MSCPT + MIH

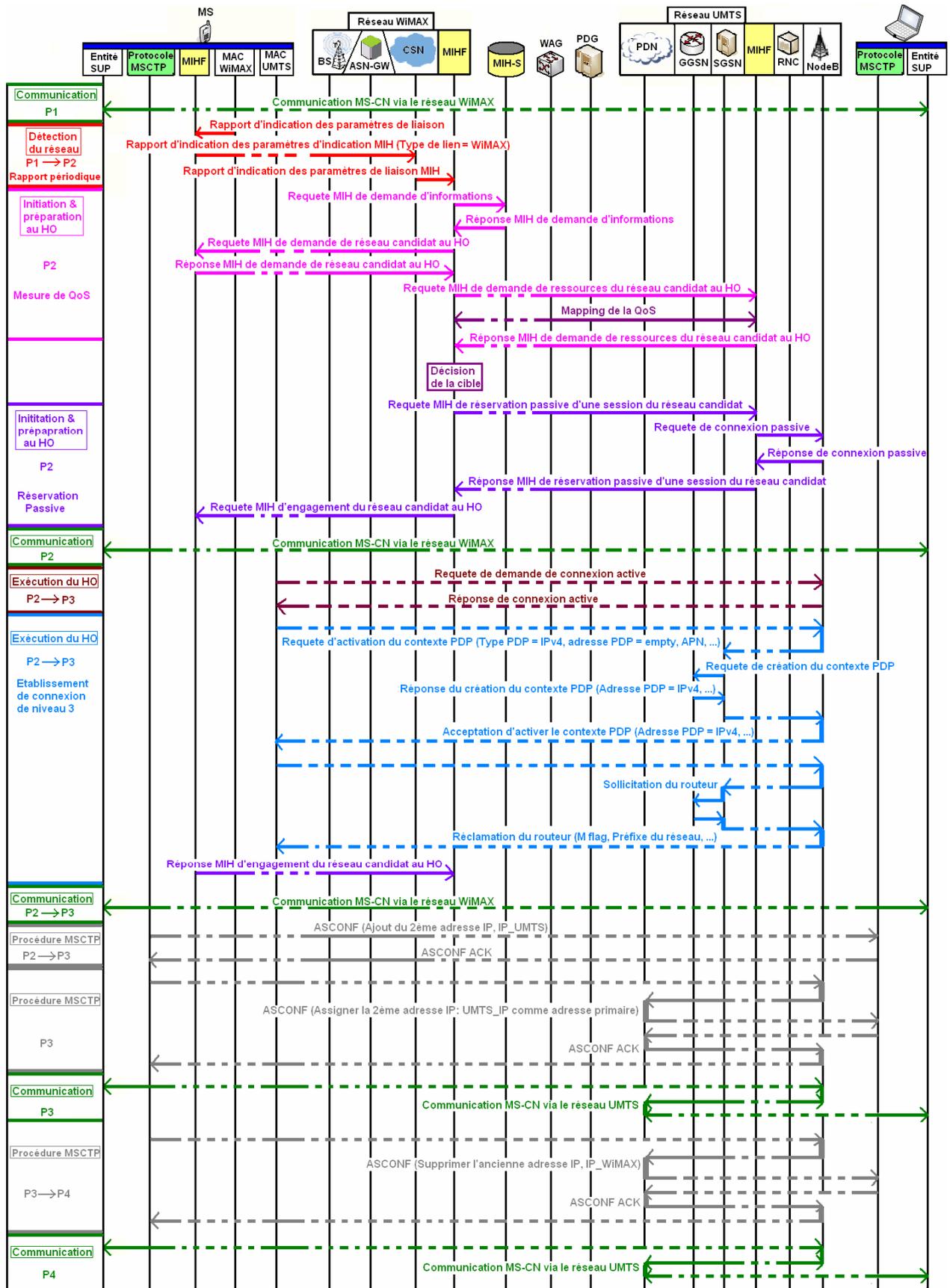


Schéma 2. Handover depuis 802.16e vers LTE en utilisant MSCTP + MIH

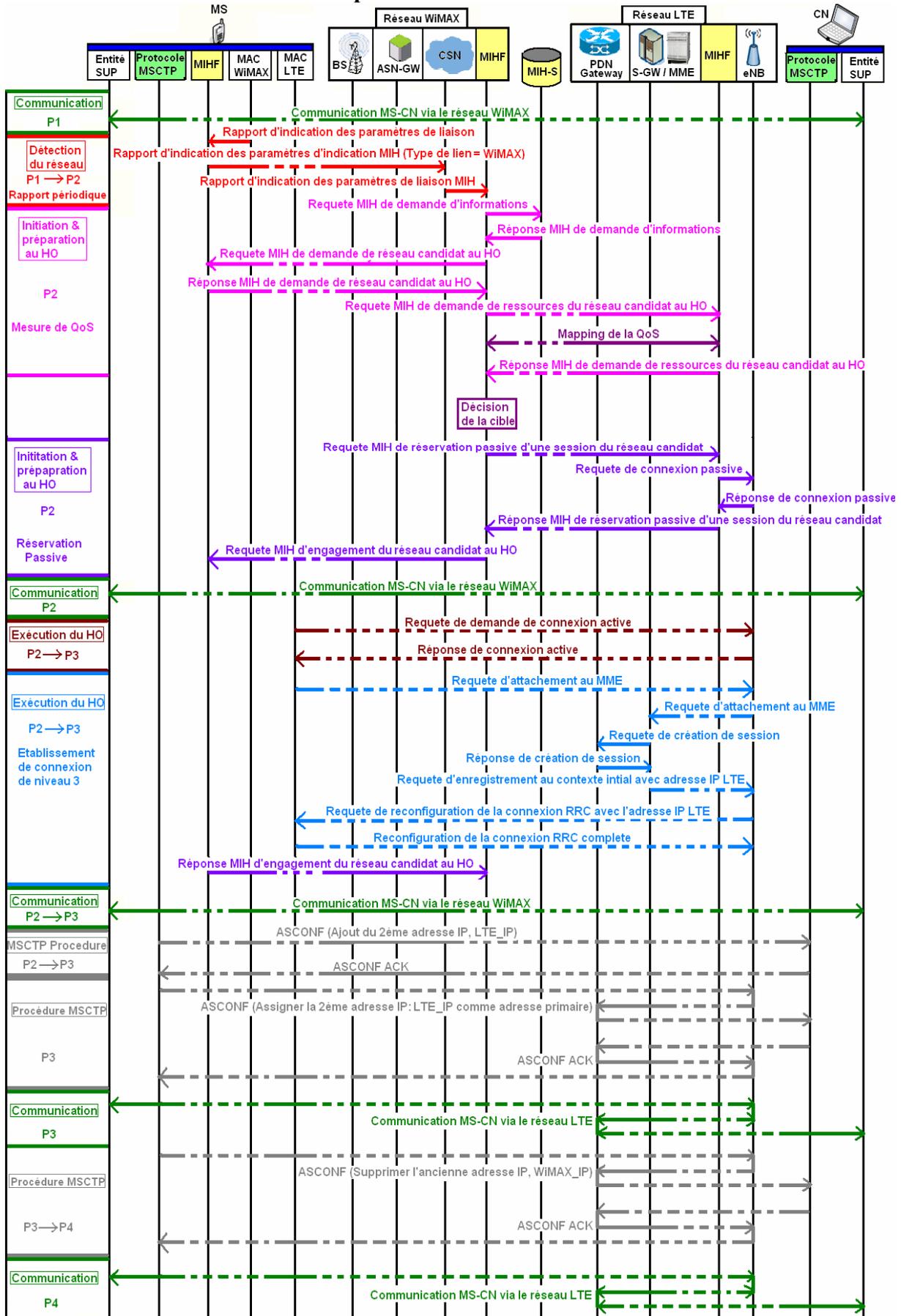
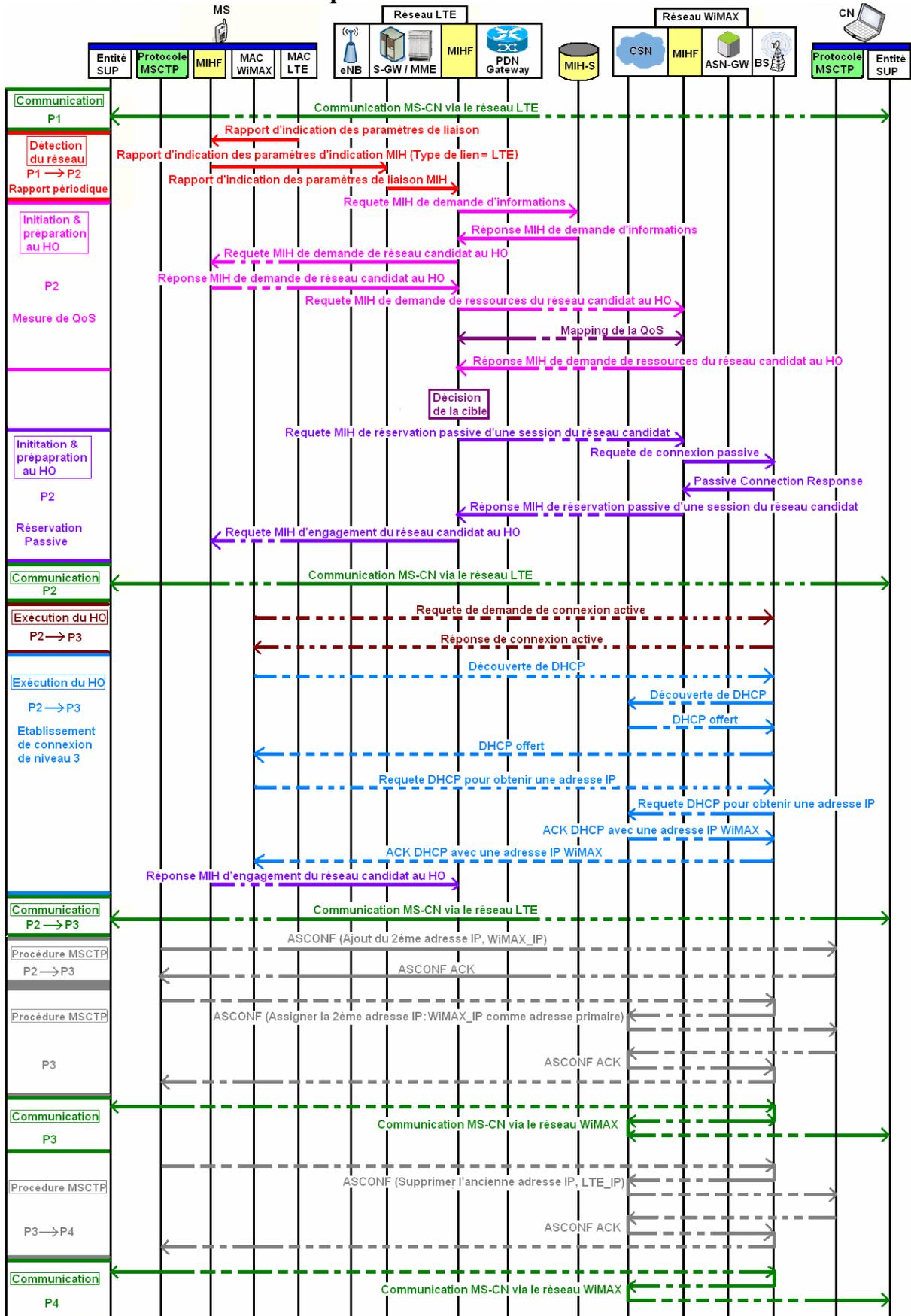


Schéma 3. Handover depuis LTE vers 802.16e en utilisant MSCTP + MIH



Glossaire

- **2G** (2^{ème} génération): technologies de communication radio mobile de 2^{ème} génération.
- **3G** (3^{ème} génération): technologies de communication radio mobile de 3^{ème} génération.
- **3G+**: technologies de communication radio mobile après la 3^{ème} génération.
- **3GPP** (3rd Generation Partnership Project): coopération entre organisations de standardisation régionaux en télécoms visant la spécification technique de la 3G.
- **3GPP2** (3rd Generation Partnership Project 2): coopération entre organisations de standardisation régionaux en télécoms visant la spécification technique de la 3G.
- **3GPP Anchor**: entité physique du réseau LTE.
- **4G** (4^{ème} génération): prochaine génération prévue pour les technologies de la communication radio mobile.
- **AAA** (Authentication Authorization Accounting): protocole d'authentification, d'autorisation et de traçabilité.
- **ACK** (Acknowledge): acquittement.
- **Ad-Hoc**: version du WIFI permettant l'échange direct des informations entre les stations.
- **AGW** (Access Gateway): entité physique du réseau UMB.
- **AP** (Access Point): borne émettrice du réseau WIFI.
- **ASN** (Access Service Network): partie de l'accès radio du réseau WiMAX.
- **ASN-GW** (Access Service Network Gateway): passerelle responsable du lien entre la partie radio et le réseau cœur WiMAX.
- **ASP** (Access Service Provider): fournisseur de service d'application.
- **AT** (Access Terminal): terminal d'accès dans le réseau UMB.
- **ATM** (Asynchronous Transfer Mode): protocole réseau de niveau 2 à commutation de cellules.
- **AuC** (Authentication Center): entité physique de l'UMTS.
- **Backbone**: dorsale Internet.
- **Bande Ku** (Kurtz-Under): bande de fréquence utilisée pour le satellite.
- **BCH** (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem): technique de codage.
- **BE** (Best Effort): classe de service dans le WiMAX pour des flux qui ne nécessitent pas la QoS.
- **Beacon Frame**: trame de gestion dans le WIFI.
- **Beamforming**: technologie d'antennes avancée.
- **Bluetooth** (IEEE 802.15.1): norme de communication radio de courte portée.
- **BS** (Base Station) : borne émettrice du réseau WiMAX.
- **BSS** (Basic Service Set): type d'architecture du WIFI.
- **C_SAP** (Control SAP): SAP qui spécifie l'interface entre le MIHF et le plan de contrôle du WiMAX.
- **CBR** (Constant Bit Rate): échantillonnage fixe.
- **CDG** (CDMA Development Group): groupe de recherche.
- **CDMA 2000** (Code Division Multiple Access 2000): technologie de communication radio mobile de troisième génération.
- **CFP** (Contention Free Period): période définie dans l'IEEE 802.11e.
- **CN** (Circuit Switching Network): réseau basé sur la commutation de circuits.
- **CP** (Contention Period): période définie dans l'IEEE 802.11e.
- **CS** (Convergence Sublayer): 1^{ère} sous couche MAC du WiMAX responsable de l'interfaçage avec les couches supérieures et les réseaux externes.
- **CS_SAP** (Convergence Sublayer Service Access Point): SAP s'occupant du transfert/de la réception du trafic vers l'extérieur/par la couche MAC du WiMAX.
- **CSMA/CA** (Carrier sense multiple access with collision avoidance): méthode d'accès au média.
- **CSN** (Connectivity Service Network): réseau cœur du WiMAX.
- **CMIP** (Client Mobile IP): nommé aussi MIP est un protocole de Handover en macro mobilité.
- **CN** (Core Network): cœur du réseau UMTS.
- **CN** (Correspondant Node): nœud qui communique avec une station.
- **Cygwin**: utilitaire permettant d'utiliser les commandes du système Unix sous le Windows.
- **DAR** (Dynamic Address Reconfiguration): protocole de configuration automatique des adresses utilisé lors de l'intervention de MSCTP.
- **DCF** (Distributed Coordination Function): fonction de coordination distribuée dans le WIFI.
- **Dedicated bearer**: connectivité limitée avec une certaine QoS dans le LTE.
- **Default bearer**: connectivité permanente sans garanti de QoS dans le LTE.
- **Diversity Set** : liste de stations de base candidates dans le cas d'un Handover.
- **DLL** (Data Link Layer): couche de niveau 2 de l'IPoS.
- **DNS** (Domain Name System): système de correspondance entre une adresse IP et un nom de domaine.

- **DHCP** (*Dynamic Host Configuration Protocol*): assure la configuration automatique des paramètres IP d'une station.
- **Diameter** : protocole d'authentification.
- **DS** (*Distribution System*): système de distribution.
- **DS** (*Distant Server*): serveur distant.
- **DVB-RCS** (*Digital Video Broadcasting – Return Channel via Satellite*): norme qui définit une voie retour par satellite.
- **DVB-S** (*Digital Video Broadcasting over Satellite*): norme de diffusion vidéo par satellite sur la voie allée.
- **DVB-S2** (*Digital Video Broadcasting over Satellite 2*): nouvelle norme de diffusion vidéo par satellite sur la voie allée.
- **E-UTRAN** (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*): partie radio du LTE.
- **EBS** (*Evolved Base Station*): borne émettrice du réseau UMB.
- **ECM** (*EPS Connection Management*): couche supérieure de LTE responsable de la gestion de la connexion.
- **EDCF** (*Enhanced DCF*): mécanisme défini dans l'IEEE 802.11e.
- **EIR** (*Equipment Identity Register*): entité physique du réseau UMTS.
- **EMM** (*EPS Mobility Management*): protocole de couche supérieure de LTE responsable de la gestion de la mobilité.
- **EnodeB** (*Evolved NodeB*): borne émettrice dans le réseau LTE.
- **EPC** (*Evolved Packet Core*): nom du réseau Coeur de l'EPS.
- **EPDG** (*Evolved Packet Data Gateway*): entité physique du réseau LTE.
- **EPS** (*Evolved Packet System*): réseau LTE + réseau SAE.
- **ESM** (*EPS Session Management*): protocole de gestion de sessions dans LTE.
- **ESS** (*Extended Service Set*): type d'architecture WIFI.
- **Ericsson**: entreprise suédoise de télécommunications.
- **ETSI** (*European Telecommunications Standards institute*): organisme de normalisation européen du domaine des télécommunications.
- **EV-DO** (*Evolution-Data optimized*): technologie de communication radio mobile de 3^{ème} génération.
- **FA** (*Foreign Agent*): routeur localisé dans un réseau visité.
- **FBSS** (*Fast Base Station Switching*): mécanisme de Soft Handover.
- **FDD** (*Frequency Division Duplex*): technique de multiplexage.
- **Forwarding**: expédition des paquets.
- **FTP** (*File Transfer Protocol*): protocole de transfert des fichiers.
- **FHD** (*Fuzzy Handover Decision*): décision finale du Handover dans le cadre de la modélisation avec la logique floue
- **Fuzzy Logic**: la logique floue est une méthode de modélisation.
- **Gateway**: passerelle.
- **GGSN** (*Gateway GPRS Support Node*): entité physique dans l'UMTS.
- **GMM** (*GPRS Mobility Management*): couche supérieure de l'UMTS responsable de la gestion de la mobilité.
- **GMSC** (*Gateway MSC*): entité physique du réseau UMTS.
- **GPC** (*Grant per Connection*): classe des stations abonnées dans le WiMAX
- **GPRS** (*General Packet Radio Service*) : norme de téléphonie mobile dérivée du GSM et qualifiée de 2.5G.
- **GPSS** (*Grant per SS*): classe des stations abonnées dans le WiMAX.
- **GSM** (*Global System for Mobile Communications*): norme de téléphonie mobile de 2^{ème} génération.
- **H.263**: norme de codage vidéo.
- **H.264/AVC** (*Advanced Video Coding*): norme de codage vidéo.
- **HA** (*Home Agent*): routeur localisé dans le réseau d'attachement d'une station.
- **Handover**: transfert intercellulaire.
- **Handover diagonal**: entre deux cellules gérées par deux réseaux différents mais de la même famille.
- **Handover horizontal**: entre deux cellules gérées par le même réseau.
- **Handover vertical**: entre deux cellules gérées par deux réseaux de familles différentes.
- **Hard Handover**: technique de Handover en micro mobilité.
- **HCF** (*Hybrid CF*): mécanisme défini dans l'IEEE 802.11e.
- **HD** (*Haute Définition*): qualité supérieure.
- **HI** (*Host Identifier*): identifiant d'une machine.
- **HIP** (*Host Identity Protocol*): protocole Handover en macro mobilité.
- **HiperMan** (*High Performance Radio Metropolitan Area Network*): standard européen de télécommunications sans fils de longue portée.
- **HIT** (*Host Identity Tag*): résultat après le cryptage du HI.
- **HLR** (*Home Location Register*): entité physique dans l'UMTS.
- **HO** (*Handover*): transfert intercellulaire.

- **HSDPA** (*High-Speed Downlink Packet Access*): technologie de téléphonie radio mobile qualifiée de 3.5G.
- **HSS** (*Home Subscriber Server*): entité physique du réseau LTE.
- **HTTP** (*Hypertext Transfer Protocol*): protocole de navigation WEB.
- **HUB**: concentrateur.
- **IASA** (*Inter-Access System Anchor*): entité du réseau LTE.
- **IDLE**: inactif.
- **IEEE** (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*): organisation internationale qui établit des normes.
- **IEEE 802.11e**: version du WIFI dédiée à la QoS.
- **IEEE 802.16m**: version améliorée du WiMAX assurant la rétro-compatibilité entre la version fixe et mobile.
- **IEEE 802.21**: architecture conçue pour le Handover entre les réseaux.
- **IETF** (*Internet Engineering Task Force*): groupe international qui participe à l'élaboration des standards pour le réseau Internet.
- **IMS** (*IP Multimedia Susystem*): architecture standardisée pour les opérateurs de la téléphonie permettant de fournir des services multimédia.
- **Indoor**: à l'intérieur.
- **Intel Corporation**: fabriquant des microprocesseurs.
- **IP** (*Internet Protocol*): protocole de communication de réseau informatique.
- **IPoS** (*IP over Satellite*): norme de communication par satellite.
- **IPsec** (*IP Security*): protocole de sécurité.
- **IPTV** (*IP Television*): télévision sur le protocole IP.
- **IPv4** (*IP version 4*): paquet IP codé sur 4 octets.
- **IPv6** (*IP version 6*): paquet IP codé sur 6 octets.
- **ISO** (*International Organization for Standardization*): organisation internationale de normalisation.
- **ISP** (*Internet Service Provider*): fournisseur du service Internet.
- **ITU** (*International Telecommunications Union*): organisation internationale chargée de la réglementation des télécommunications dans le monde.
- **L2** (*Layer 2*): niveau 2 du modèle OSI.
- **L3** (*layer 3*): niveau 3 du modèle OSI.
- **LDPC** (*Low Density Parity Check*): technique de codage.
- **LTE** (*Long Term Evolution*): technologie de communication radio mobile de longue portée.
- **M_SAP** (*Management SAP*): SAP qui spécifie l'interface entre le MIHF et le plan de gestion du WiMAX.
- **MAC** (*Media Access Control*): sous couche inférieur de niveau liaison selon l'IEEE 802.x par rapport au modèle OSI, et elle est responsable du contrôle d'accès au support physique.
- **MAC CPS** (*MAC Common Part Sublayer*): 2^{ème} sous couche MAC du WiMAX responsable de l'allocation des ressources et de l'établissement et les maintiens des connexions.
- **MAC_SAP** (*MAC Service Access Point*): SAP s'occupant du transfert des données entre les sous couches MAC du WiMAX.
- **MAP** (*Mobile Application Part*): protocole de signalisation SS7.
- **MDHO** (*Macro Diversity Handover*): mécanisme de Soft Handover.
- **ME** (*Mobile Equipment*): équipement mobile.
- **MF-TDMA** (*Multiple Frequency Time Division Multiple Access*): mode de multiplexage.
- **MIH** (*Media Independent Handover/IEEE 802.21*): architecture conçue pour le Handover entre les réseaux.
- **MIH_3GLINK_SAP**: SAP responsable d'établir le lien entre la 3G et le MIH.
- **MIH_LINK_SAP**: SAP qui permet de relier le MIHF et les couches inférieures.
- **MIH_MGMT_SAP** (*Management SAP*): établit le lien entre le MIHF et le GMM ou le EMM ou le ECM.
- **MIH_NMS_SAP** (*Network Management SAP*): SAP qui réalise les fonctions de la gestion.
- **MIH_SAP**: SAP qui permet le lien entre les couches supérieures et les couches inférieures.
- **MIH_SME_SAP** (*Station Management Entity SAP*): interface par laquelle les paramètres de configuration sont échangés entre le WiMAX et le MIH.
- **MIHF** (*MIH Function*): fonction principale de MIH.
- **MIMO** (*Multiple Input Multiple Output*): technologie d'antennes avancée.
- **MIP** (*Mobile IP*): protocole de Handover en Macro mobilité.
- **MIPv6** (*Mobile IP version 6*): protocole de Handover en macro mobilité.
- **MME** (*Mobility Management Entity*): entité physique du réseau LTE.
- **MN** (*Mobile Node*): nœud mobile.
- **MPE** (*Mutiple Protocol Encapsulation*): couche d'adaptation entre IP et MPEG2.
- **MPEG** (*Moving Picture Experts Group*): norme de codage vidéo.
- **MPEG2-TS** (*MPEG2 Transport Stream*): norme de codage vidéo utilisée par le système DVB.
- **MPEG4**: norme de codage vidéo.
- **MS** (*Mobile Station*): station mobile.

- **MSC** (*Mobile Serving Switching*): entité physique dans l'UMTS.
- **MSCTP** (*Mobile Stream Control Transmission Protocol*): protocole de Handover en macro mobilité.
- **NAM** (*Network Animator*): animateur des réseaux appartenant à NS2.
- **NAP** (*Network Access Provider*): fournisseur de l'accès radio WiMAX.
- **NAT** (*Network Address Translator*): routeur qui fait la traduction de l'adresse réseau.
- **NCC** (*Network Control Center*): entité appartenant au Gateway qui envoie les données vers le satellite.
- **NCMS** (*Network Control and Management System*): extension du WiMAX qui supporte les primitives MIH.
- **NIST** (*National Institute of Standards and Technology*): agence de technologies.
- **NMMC** (*Network and Mission Management Center*): entité appartenant au Gateway qui transmet les données vers le satellite.
- **NodeB**: borne émettrice dans le réseau UMTS.
- **Nokia Corporation**: entreprise finlandaise de télécommunications.
- **NRTPS** (*Non Real Time Plling Service*): classe de service dans le WiMAX pour des flux non temps-réel.
- **NS2** (*Network Simulator 2*): simulateur des réseaux.
- **NSP** (*Network Service Provider*): fournisseur d'accès IP au WiMAX.
- **OFDM** (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*): procédé de codage des signaux numériques.
- **OFDMA** (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*): méthode d'accès à la couche physique.
- **Okumura-Hata**: modèle de propagation radio.
- **OSI** (*Open Systems Interconnection*): modèle de communication entre ordinateurs proposé par l'ISO.
- **Outdoor**: à l'extérieur.
- **Paging**: radiomessagerie.
- **PCF** (*Point Coordination Function*): fonction dans le WIFI permettant l'accès au médium sans fil.
- **PCRF** (*Policy & Charging Rules Function*): entité physique du réseau LTE.
- **PDA** (*Personal Digital Assistant*): appareil numérique portable.
- **PDCP** (*Packet Data Convergence Protocol*): couche inférieure de LTE.
- **PDG** (*Packet Data Gateway*): passerelle entre le WiMAX et l'UMTS.
- **PDN** (*Packet Data Network*): réseaux basés sur la commutation de paquets.
- **PDN-GW** (*Packet Data Network Gateway*): entité physique du réseau LTE.
- **PDP** (*Packet Data Protocol*): protocole permettant l'obtention d'adresse pour une station dans les réseaux GPRS, UMTS..
- **PDSN** (*Packet Data Serving Node*): entité physique du réseau EV-DO.
- **PHY_SAP** (*Physique Service Access Point*): point d'accès responsable du transfert des données entre la couche physique et les sous couches MAC du WiMAX.
- **PMIP** (*Proxy Mobile IP*): protocole de Handover en macro mobilité.
- **Polling**: interrogation des stations par la station de gestion.
- **PS** (*Packet Switching Network*): réseau basé sur la commutation de paquets.
- **PSTN** (*Public Switched Telephone Network*): réseau téléphonique commuté.
- **QAM** (*Quadrature Amplitude Modulation*): méthode de modulation.
- **QoS** (*Quality of Service*): qualité de service.
- **QPSK** (*Quadrature phase-shift keying*): méthode de modulation.
- **Qualcomm**: entreprise américaine de télécommunications.
- **RAN** (*Radio Access Network*): accès radio.
- **RL** (*Reverse Link*): lien retour.
- **RLC** (*Radio Link Control*): couche inférieure de UMTS ou LTE de responsable de l'établissement de la connexion.
- **RNC** (*Radio Network Controller*): entité physique du réseau UMTS.
- **Romping**: changement d'opérateur par une station mobile en gardant sa même identité.
- **RRC** (*Radio Ressource Control*): couche inférieure de UMTS ou LTE responsable de la signalisation entre l'UE et l'UTRAN ou l'EUTRAN.
- **RRC_SAP**: responsable du lien entre le MIHF et la couche RRC.
- **RRM** (*Radio Resource Management*): gestion des ressources radio.
- **RSS** (*Received Signal Strength*): puissance du signal reçu.
- **RTP** (*Real-Time Transport Protocol*): protocole de communication informatique.
- **RTPS** (*Real-Time Plling Service*): classe de service dans le WiMAX pour des flux temps-réel de paquets de taille variable.
- **S-GW** (*Serving Gateway*): entité physique du réseau LTE.
- **SAE** (*System Architecture Evolution*): réseau cœur de l'EPS et LTE.
- **SAE Anchor**: entité physique du réseau LTE.
- **SAP** (*Service Access Point*): points d'accès de service.
- **Scalable OFDMA**: technique de modulation.

- **SC-FDMA** (*Single Carrier - Frequency Division Multiple Access*): méthode d'accès à la couche physique.
- **SCTP** (*Stream Control Transmission Protocol*): protocole de transport.
- **SDMA** (*Space Division Multiple Access*): technologie d'antennes avancée.
- **SGSN** (*Serving GPRS Support Node*): entité physique du réseau UMTS.
- **SIP** (*Session Initiation Protocol*): protocole de signalisation de niveau applications.
- **SM** (*Session Management*): couche supérieure de l'UMTS responsable de la gestion des sessions.
- **SMTP** (*Simple Mail Transfer Protocol*): protocole de transmission des e-mails.
- **SRNC** (*Session Reference Network Controller*): entité physique du réseau UMB.
- **Siemens**: groupe allemand d'équipements électroniques et électrotechniques.
- **SLA** (*Service Level Agreement*): document qui définit la QoS requise entre un prestataire et un client.
- **SMS** (*Short Message Service*): service de messagerie.
- **Soft Handover**: technique de Handover en micro mobilité.
- **SS** (*Security Sublayer*): 3^{ème} sous couche MAC du WiMAX responsable de la sécurité.
- **SS7** (*Signalisation System 7*): ensemble de protocoles de signalisation.
- **ST** (*Satellite Terminal*): terminal satellite.
- **TCP** (*Transmission Control Protocol*): protocole de transport.
- **TDD** (*Time Division Duplex*): technique de multiplexage.
- **TDM/TDMA** (*Time Division Multiplexing/Time Division Multiple Access*): méthode d'accès au support physique.
- **Tunneling**: encapsulation des données d'un protocole réseau dans un autre.
- **Two Ray Ground**: modèle de propagation radio.
- **UDP** (*User Datagram Protocol*): protocole de transport.
- **UE** (*User equipment*): équipement utilisateur.
- **UGS** (*Undolicted Grant Service*): classe de service dans le WiMAX pour des flux temps-réel de paquets de taille fixe.
- **ULE** (*Unidirectional Lightweight Encapsulation*): couche adaptative d'encapsulation entre les couches supérieures et le MPEG2-TS.
- **ULE SNDU** (*ULE Sub Network Data Unit*): paquets formés après l'encapsulation dans ULE.
- **UMB** (*Ultra Mobile Broadband*): technologie avancée de communication radio mobile de longue portée.
- **UMTS** (*Universal Mobile Telecommunications System*): technologie de communication radio mobile de 3^{ème} génération de longue portée.
- **Unix**: système d'exploitation.
- **UPE** (*User Plane Entity*): entité physique du réseau LTE.
- **UTRAN** (*UMTS Terrestrial Radio Access Network*): partie radio du réseau UMTS.
- **UWB** (*Ultra Wide Band, IEEE 802.15.3*): technologie de communication radio de courte portée.
- **Vidéo Streaming**: diffusion de vidéo en mode contenu.
- **Visiofonie**: association de la téléphonie et la TV permettant aux usagers de se voir pendant leur conversation téléphonique.
- **VLR** (*Visited Location Register*): entité physique dans l'UMTS.
- **VoIP** (*Voice over IP*): téléphonie sur le protocole IP.
- **VPN** (*Virtual Private Network*): réseau virtuel privé.
- **VSAT** (*Very Small Aperture Terminal*): terminaux de réception des flux envoyés par le satellite.
- **WAG** (*WiMAX Access Gateway*): passerelle entre le WiMAX et l'UMTS.
- **WCDMA** (*Wideband CDMA*): évolution de la technologie CDMA.
- **WIFI** (*IEEE 802.11*): technologie de communication radio de portée moyenne.
- **WiMAX** (*IEEE 802.16*): technologie de communication radio de 3^{ème} génération de longue portée.
- **WiMAX mobile** (*IEEE 802.16e*): version du WiMAX dédiée à la mobilité des terminaux.
- **WLAN** (*Wireless Local Area Network*): réseau local sans fil.
- **WMAN** (*Wireless Wide Area Network*): réseau étendu sans fil.
- **X2**: interface entre deux eNodeB du réseau LTE.
- **X25**: protocole de communication en mode paquets.

Références Bibliographiques

- [1] D. Rouffet, S. kerboeuf, L. Cai & V. Capdevielle, « 4G Mobile », Alcatel, Technical Paper, 2005.
- [2] J-S. Hwang, R. Consulta & H-Y Yoon, « 4G Mobile Networks – Technology Beyond 2.5G and 3G », PTC (Pacific Telecommunications Council) Proceedings, Hawaii, 2007.
- [3] J. Blin & S. Renault, « 4G, La Convergence Ultime », Article rédigé dans www.01net.com, 2004.
- [4] Khan, A.H.; Qadeer, M.A.; Ansari, J.A.; Waheed, S., « 4G as a Next Generation Wireless Network », Future Computer and Communication. ICFCC 2009. pp 334 – 338, Avril 2009.
- [5] Krenik, B.; « 4G wireless technology: When will it happen? What does it offer? », Solid-State Circuits Conference, 2008. A-SSCC '08. IEEE Asian, pp 141 – 144, Novembre 2008.
- [6] D. Christian, « La Convergence se jouera entre WiMAX, LTE et UMB », In-Stat, Article rédigé dans www.generation-nt.com, 2007.
- [7] M-A. Delalande, « L'ITU reconnaît officiellement WiMAX comme une technologie 3G », Article rédigé dans www.reseaux-telecoms.net, 2007.
- [8] IEEE Std, « Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems », Local and Metropolitan Area Networks, Part 16, 2004.
- [9] E. Borcoci, « WiMAX technologies: Architectures, Protocols, Resource management And Applications », IARIA, BIOTECHNO 2008, Tutorial, Bucharest, Roumanie, Juin 2008.
- [10] D. Pareek, « WiMAX Taking Wireless in the Max », Publié par Auerbach Publications Taylor & Francis Group, 2006.
- [11] G. Radha, S. Krishna, V. Rao & G. Radhamani, « WiMAX a Wireless Technology revolution », Publié par Auerbach Publications Taylor & Francis Group, 2008.
- [12] Mustafa Ergen, « Mobile Broadband Including WiMAX and LTE » 2009, livre, 640 p. 311 illus. Hardcover ISBN: 978-0-387-68189-4, Springer, 2009.
- [13] IEEE Std, « Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems,» IEEE 802.16e, Part 16, 2006.
- [14] P. Yegani, « WiMAX Overview», IETF-64 Cisco Systems, 2005.
- [15] WiMAX Forum, « WiMAX End-to-End Network Systems Architecture », Draft Stage 2: Architecture Tenets, Reference Model and Reference Points, 2007.
- [16] M. Cudak, « Draft IEEE 802.16m Requirements », Motorola, Projet: IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, 2008.
- [17] S. Hamiti, « Draft IEEE 802.16m System Description Document », Nokia, Projet: IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, 2008.
- [18] H. Wang, L. Kondi, A. Luthra, S. Ci, « 4G Wireless Video Communications », Wiley Series on Wireless Communications and Mobile Computing, ISBN: 978-0-470-77307-9 Hardcover. Livre, Avril 2009.
- [19] Papapanagiotou, I.; Toumpakaris, D.; Lee, J.; Devetsikiotis, M. , « A survey on next generation mobile WiMAX networks: objectives, features and technical challenges », Communications Surveys & Tutorials, IEEE Volume 11, Issue 4, pp 3-18, 2009.
- [20] Motorola, « Long Term Evolution (LTE): A Technical Overview », Technical White Paper, 2007.
- [21] U. Barth, « 3GPP Long-Term Evolution / System Architecture Evolution Overview », Alcatel, Technical white paper, Septembre 2006.
- [22] G. Fritze, « SAE – The Core Network for LTE », Ericsson, Technical white paper, 2008.
- [23] Larmo, A.; Lindstrom, M.; Meyer, M.; Pelletier, G.; Torsner, J.; Wiemann, H , « The LTE link-layer design », Communications Magazine, IEEE Volume 47, Issue 4, pp. 52 – 59, Avril 2009.
- [24] Man Hung Ng; Shen-De Lin; Li, J.; Tatesh, S. , « Coexistence studies for 3GPP LTE with other mobile systems », Communications Magazine, IEEE, Volume 47, Issue 4, pp. 60 – 65, Avril 2009
- [25] 3GPP2, « Overview for Ultra Mobile Broadband (UMB) Air Interface Specification », Technical White Paper, 2008.
- [26] Wang, M.; « Ultra Mobile Broadband Technology Overview », Communication Networks and Services Research Conference, 2008. CNSR, pp 8-9, Mai 2008.
- [27] M. Kukarni, « 4G Wireless and International Mobile Telecommunication (IMT) Advanced », mémoire rédigée, www.cse.wustl.edu, 2008.
- [28] Parsa Wireless Communications, « Survey of WiMAX, LTE, and UMB », 2007.
- [29] C. Ball, « LTE and WiMAX Technology and Performance Comparison », Nokia Siemens Networks, 2007.
- [30] IEEE 802.11 Standard, 1999.
- [31] IEEE Std, « Wireless LAN Medium Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications », IEEE 802.11, Part 11, 2007.
- [32] IEEE 802.11e Draft Standard/D4.4, 2003.
- [33] J. Yu, « IEEE 802.11e QoS for Wireless LAN: A Research Direction », TDC Network Seminar, 2003.

- [34] S. Mangold, S. Choi, P. May, O. Klein, G. Hiertz & L. Stibor, « IEEE 802.11e Wireless LAN for Quality of Service », à Proc. European Wireless, 2002.
- [35] Motorola & Intel, « WiMAX and WIFI together: Deployment Models and User Scenarios », White Paper, 2007.
- [36] Intel, « WiMAX and WIFI together: Synergies for Next-Generation Broadband », White Paper, 2008.
- [37] ETSI, « Universal Mobile Telecommunications System UMTS », 1999.
- [38] J. Sanchez & M. Thioune, « Universal Mobile Telecommunications System UMTS », Hermes Science, 2004.
- [39] S. Vijay Anand, « QoS based Handover layer for a Multi-RAT Mobile Terminal in UMTS and Wi-MAX Networks », IEEE Explore, COMSWARE, 472-479, 2008.
- [40] ETSI EN 300 421, « Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 Ghz satellite services ».
- [41] ISO/IEC, « Information technology - Generic coding of moving pictures and associated audio information: Systems ISO/IEC 13812-1 », 1996.
- [42] ETSI EN 301 790, « Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for satellite distribution systems ».
- [43] ETSI EN 302 307, « Digital Video Broadcasting (DVB): Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications », v1.1.1, 2005.
- [44] Bennett, B.; Holt, C.; Skowronski, M.; Summers, E.; Hamilton, B.A., « DVB-S2 benefits for military broadcast systems », Military Communications Conference MILCOM 2005. IEEE pp.148 - 154 Vol. 1, Octobre 2005.
- [45] T. Wiegand, G. Sullivan, « ITU-T Rec. H.264 | ISO/IEC 14496-10 AVC », Draft ITU-T, 2003.
- [46] Hughes Network Systems, « IP over Satellite (IPoS) – The Standard for Broadband over Satellite », 2007.
- [47] Coe, Sebastian, « Internet Protocol over Satellite: Insights for telecommunications systems managers », Wireless Communications & Signal Processing, WCSP 2009, pp. 1-5, 2009.
- [48] WiMAX Forum, « A Technical Overview and Performance Evaluation, Mobile WiMAX », Partie I, 2006.
- [49] Z. Becvar & J. Zelenka, « Handovers in the Mobile WiMAX », Research in Telecommunication technology, vol 1, pp 147-150, 2006.
- [50] IEEE Std: « Soft Handover and Fast BS Switching Procedure », IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, 2004.
- [51] C. Perkins, « IP Mobility Support for IPv4 », RFC 3344, IETF, 2002.
- [52] K. Leung, G. Dommety, P. Yegani & K. Chowdhury, « Mobility Management Using Proxy Mobile IPv4 », Internet Draft, IETF, 2007.
- [53] D. Johnson, C. Perkins & J. Arkko, « Mobility Support in IPv6 », RFC 3775, IETF, 2004.
- [54] R. Moskowitz, P. Nikander, P. Jokela & T. Henderson, « Host Identity Protocol », RFC 5201, IETF, 2008.
- [55] Novaczki, S.; Bokor, L.; Imre, S., « Micromobility support in HIP: survey and extension of host identity protocol », Electrotechnical Conference, MELECON 2006 pp. 651 – 654. Mai 2006.
- [56] Xin Yang; Xin-sheng Ji, « Host Identity Protocol—Realizing the separation of the location and host identity », Information and Automation, ICIA 2008, pp. 749 – 752. Juin 2008.
- [57] Nikander, Pekka, « The Host Identity Protocol (HIP): Bringing mobility, multi- homing, and baseline security together », Security and Privacy in Communications Networks and the Workshops, SecureComm 2007. pp. 518 – 519. Septembre 2007.
- [58] R. Stewart, Q. Xie, K. Morneault, C. Sharp, H. Schwarzbauer, T. Taylor, I. Rytina, M. Kalla, L. Zhang & V. Paxson, « Stream Control Transmission Protocol », RFC 2960, IETF, 2000.
- [59] R. Stewart, Q. Xie, M. Tuexen, S. Maruyama, & M. Kozuka, « Stream Control Transmission Protocol (SCTP) Dynamic Address Reconfiguration », RFC 5061, IETF, Draft, 2007.
- [60] M. Riegel & M. Tuexen, « Mobile SCTP », Internet Draft, IETF, 2005.
- [61] Seok Joo Koh; Moon Jeong Chang; Meejeong Lee, « mSCTP for soft handover in transport layer », Communications Letters, IEEE, Vol 8, Issue 3, pp. 189 – 191. Mars 2004.
- [62] Seok Jon Koh; Hee Young Jung; Jae Hong Min, « Transport layer internet mobility based on mSCTP », Advanced Communication Technology, ICACT 2004, Vol. 1, pp. 329-333, 2004.
- [63] J. Rosenberg, H. Schulzrinne, G. Camarillo, A. Johnston, J. Peterson, R. Sparks, H. Handley & E. Schooner, « SIP: Session Initiation Protocol », RFC 3261, IETF, 2002.
- [64] V. Gupta, « IEEE 802.21 Tutorial », présenté à la session IEEE 802.21 #15, 2006.
- [65] IEEE, « Draft Std for Local and Metropolitan Area Networks: Media Independent Handover Services », IEEE P802.21/D05.00, 2007.
- [66] Taniuchi, K.; Ohba, Y.; Fajardo, V.; Das, S.; Tauil, M.; Yuu-Heng Cheng; Dutta, A.; Baker, D.; Yajnik, M.; Famolari, D.; « IEEE 802.21: Media independent handover: Features, applicability, and realization », Communications Magazine, IEEE, Vol 47, Issue 1, pp. 112-120. Janvier 2009.

- [67] De La Oliva, A.; Banchs, A.; Soto, I.; Melia, T.; Vidal, A.; « An overview of IEEE 802.21: media-independent handover services », *Wireless Communications, IEEE*, Vol 15, Issue 4, pp. 96 – 103, Août 2008.
- [68] The Information Science Institute, « The network Simulator-NS2 », <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [69] Information Sciences Institute (ISI), « NSNAM Web Pages, 18.2 Two-Ray Ground reflection Model », Janvier 2009.
- [70] National Institute of Standards and Technology, <http://www.nist.gov/index.html>
- [71] National Institute of Standards and Technology, « The network Simulator NS-2 NIST add-on IEEE 802.16 model (MAC + PHY) », Juin 2007.
- [72] Université de Liège, Département d'Astrophysique, Géophysique et Océanographie, « Introduction aux méthodes quantitatives et éléments de statistique », Chapitre 5, 2004.
- [73] WiMAX Community, « WiMAX Fundamentals, 1.7.3 Quality of Service », Juin 2007.
- [74] L. A. Zadeh, « Soft Computing and Fuzzy Logic », *IEEE Software*, pp. 48-54, 1994.
- [75] J. Yen, « Fuzzy Logic – A Modern Perspective », *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, pp. 153-165, Janvier 1999.
- [76] J-S. R. Jang and C-T. Sun, « Neuro-Fuzzy Modeling and Control », *Proceedings of the IEEE*, Mars 1995.
- [77] P. M. L. Chan et al., « Mobility Management Incorporating Fuzzy Logic for a Heterogeneous IP Environment », *IEEE Communications Magazine*, pp. 42-51, Décembre 2001.
- [78] G. Edwards et al., « Fuzzy Handoff Algorithms for Wireless Communications », *Fuzzy Sets and Systems*, pp. 379-388, Mars 2000.
- [79] Quoc-Thanh. Nguyen-Vuong, Lionel. Fiat and Nazim. Agoulmine, « An Architecture for UMTS-WiMAX Interworking », *Proc of 1st IEEE Symp. on Broadband Convergence Networks*, pp. 1-10. Avril 2006.
- [80] Shahbaz Khan, Shoaib Khan, Sahibzada Ali Mahmud, Hamed Al-Raweshidy, « Supplementary Interworking Architecture for Hybrid Data Networks (UMTS-WiMAX) », *Proc. Int. Multi-Conf. on Computing in the Global Info*, pp 57–61. Août 2006.
- [81] S.Vijary Anand, « Qos based handover layer for a multi-RAT mobile terminal in UMTS and Wi-MAX networks », *Communication Systems Software and Middleware and Workshops*, pp 472-479. Janvier 2008.
- [82] B. Liu, P. Martins, A. E. Samhat and P. Bertin, « A Layer 2 Scheme for Inter-RAT Handover between UMTS and WiMAX in Tight Coupling Architecture », *IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp 1-5. Septembre 2008.
- [83] F. Xu, et al., « Interworking of WiMAX and 3GPP networks based on IMS », *IEEE Commun. Mag.*, vol. 45, pp. 144-150, 2007.
- [84] Joo-Young Baek, Deok-Jin Kim, Young-Joo Suh, Eui-Seok Hwang and Young-Don Chung, « Network Initiated Handover Based on IEEE 802.21 Framework for QoS Service Continuity in UMTS/802.16e Networks », in *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference, VTC Spring*, pp. 2157-2161, Mai 2008.
- [85] E. Borcoci , « Wimax Technologies: Architecture, protocols, Resource Management & Applications », *Conférence CTRQ*, Juillet 2008.
- [86] V. Gupta, « IEEE 802.21 MIHS », *IEEE 802.21 Working Group*, Mai, 2008.
- [87] U. Olvera, « IEEE 802.21 MIHO », *IEEE 802.21 session 12, Hawaii*, Janvier, 2006.
- [88] K-H. Li, « Wimax Solution Division », *Intel Mobility Group*, Juin 2006.
- [89] Q.Thinh, N.Vuong, L. Fiat, N. Agoulmine, « An Architecture for UMTS-WiMAX Interworking » *Broadband Convergence Networks*, pp. 1-10. Avril 2006.
- [90] Y. Ching, « A Gateway to Integrate Heterogenous Networks », *Industriel technology Research Institute*, 2007.
- [91] J-Y Baek, D-J Kim, Y-J Suh, E-S Hwang, Y-D Chung, « Network-Initiated Handover Based on IEEE 802.21 Framework for QoS Service Continuity in UMTS/802.16e Networks », *VTC*, pp. 2157-2161. Mai 2008.
- [92] N-H. Thanh, N-T. Hung, T-N. Lan, T-Q. Thanh, D. Hanh, T. Magedanz, « mSCTP-based proxy in support of multimedia session continuity and QoS for IMS-based networks », *ICCE*, pp. 162-168. Juin 2008.
- [93] D. Kessens, J. Soininen, « UMTS/GPRS system overview from an IP addressing perspective », *Nokia, technical white paper*. 2006
- [94] D. Feng, « Seamless Handover between CDMA2000 and, 802.11 WLAN using mSCTP », *Thèse*, 2006.
- [95] Oktay Akcakaya, Eda Kocaman, Osman Kaldirim, « Propagation Models », 2007.
- [96] IETF, RFC4326 « ULE (The Unidirectional Lightweight Encapsulation) », Octobre 2007.s
- [97] BRASIL project (Broadband to Rural America over Satellite Integrated Links), « Identification of Relevant DVB-RCS Applications in Latin-America », 2007.
- [98] L. Bajzik, P. Horvath, L. Korossy, and C. Vulkan, “Impact of Intra- LTE Handover with Forwarding on the User Connections,” *Mobile and Wireless Communications Summit, 2007. 16th IST*, pp. 1–5, July 2007.

Table des figures

Figure 1. Pile protocolaire de WiMAX	14
Figure 2. Architecture du WiMAX mobile	17
Figure 3. Intra-ASN Handover	17
Figure 4. Inter-ASN Handover	18
Figure 5. Architecture de l'EPS	20
Figure 6. Architecture de l'UMB	22
Figure 7. Mode infrastructure du WIFI	24
Figure 8. Architecture de l'UMTS	27
Figure 9. Piles protocolaires de DVB-S et mécanismes de fragmentation et encapsulation	28
Figure 10. Piles protocolaires du DVB-RCS	29
Figure 11. Architecture DVB-S/DVB-RCS	29
Figure 12. Pile protocolaire de IPoS	30
Figure 13. Fonctionnement du Hard Handover	33
Figure 14. Fonctionnement du MDHO	34
Figure 15. Fonctionnement du FBSS	35
Figure 16. Fonctionnement de MIPv4	36
Figure 17. Fonctionnement de PMIPv4	37
Figure 18. HIP dans le modèle OSI	39
Figure 19. MSCTP vs TCP	39
Figure 20. Architecture de MIH	42
Figure 21. Modèle de mobilité	45
Figure 22. Variation de $N = 80$	48
Figure 23. Variation de $N = 90$	48
Figure 24. Variation de $N = 120$	48
Figure 25. Variation de $N = 130$	48
Figure 26. Délais moyens pour $N = 90$	49
Figure 27. Délais moyens pour $N = 120$	49
Figure 28. Délais moyens avec FBSS / vidéo	49
Figure 29. Délais moyens avec Hard HO / vidéo	49
Figure 30. Giges moyennes / VoIP pour $N = 100$	50
Figure 31. Giges moyennes / Vidéo pour $N = 100$	50
Figure 32. Giges moyennes avec FBSS / VoIP	50
Figure 33. Giges moyennes avec Hard HO / VoIP	50
Figure 34. Pertes moyennes pour $N = 80$	51
Figure 35. Pertes moyennes pour $N = 110$	51
Figure 36. Pertes moyennes avec FBSS / vidéo	51
Figure 37. Pertes moyennes avec Hard HO / vidéo	51
Figure 38. Débits moyens / VoIP pour $N = 80$	51
Figure 39. Débits moyens / VoIP pour $N = 130$	51
Figure 40. Débits moyens avec FBSS / VoIP	52
Figure 41. Débits moyens avec Hard HO / VoIP	52
Figure 42. Délais d'une seule MS	52
Figure 43. Modèle des simulations	54
Figure 44. Scénarios de mobilité	55
Figure 45. Délais avec le Hard Handover	56

Figure 46. Délais avec le FBSS	56
Figure 47. Délais avec MIP	57
Figure 48. Taux des pertes avec Hard Handover	57
Figure 49. Taux des pertes avec FBSS	57
Figure 50. Taux des pertes avec MIP	57
Figure 51. Débits des mobiles utilisant la vidéo	58
Figure 52. Débits des mobiles utilisant la VoIP	58
Figure 53. Charges de BS1 et BS3 avec Hard Handover et FBSS	58
Figure 54. Modèle des simulations et scénario de mobilité	60
Figure 55. Les délais	61
Figure 56. Les gigues	61
Figure 57. Les pertes des paquets	62
Figure 58. Les débits	62
Figure 59. Système d'inférence floue	65
Figure 60. Algorithme de Handover proposé	66
Figure 61. Fonction d'appartenance RSS pour un rayon de couverture de BS = 1 km	67
Figure 62. Fonction d'appartenance RSS pour un rayon de couverture de BS = 3 km	67
Figure 63. Fonction d'appartenance RSS pour un rayon de couverture de BS = 10 km	67
Figure 64. Fonction d'appartenance charge de BS pour le trafic Vidéo	68
Figure 65. Fonction d'appartenance charge de BS pour le trafic VoIP	68
Figure 66. Fonction d'appartenance charge de BS pour le trafic Data	68
Figure 67. Fonction d'appartenance Timer	68
Figure 68. Fonction d'appartenance Vitesse	68
Figure 69. Topologie du modèle des simulations	70
Figure 70. Scénarios	70
Figure 71. Délais du 1 ^{er} scénario avec le trafic VoIP	72
Figure 72. Délais du 1 ^{er} scénario avec le trafic Vidéo	72
Figure 73. Délais du 1 ^{er} scénario avec le trafic Data	72
Figure 74. Délais de 2 ^{ème} scénario avec le trafic VoIP	73
Figure 75. Délais de 2 ^{ème} scénario avec le trafic Vidéo	73
Figure 76. Délais du 2 ^{ème} scénario avec le trafic Data	73
Figure 77. Taux des paquets perdus du 1 ^{er} scénario avec le trafic VoIP	74
Figure 78. Taux des paquets perdus du 1 ^{er} scénario avec le trafic Vidéo	74
Figure 79. Taux des paquets perdus du 1 ^{er} scénario avec le trafic Data	74
Figure 80. Taux des paquets perdus du 2 ^{ème} scénario avec le trafic VoIP	75
Figure 81. Taux des paquets perdus du 2 ^{ème} scénario avec le trafic Vidéo	75
Figure 82. Taux des paquets perdus du 2 ^{ème} scénario avec le trafic Data	75
Figure 83. Débits du 1 ^{er} scénario avec le trafic VoIP	76
Figure 84. Débits du 1 ^{er} scénario avec le trafic Vidéo	76
Figure 85. Débit du 1 ^{er} scénario avec le trafic Data	76
Figure 86. Débits du 2 ^{ème} scénario avec le trafic VoIP	77
Figure 87. Débits du 2 ^{ème} scénario avec le trafic Vidéo	77
Figure 88. Débit du 2 ^{ème} scénario avec le trafic Data	77
Figure 89. Modèle d'interconnexion fondé sur MSCTP	79
Figure 90. Echange des messages durant le Handover avec MSCTP	80
Figure 91. Modèle d'interconnexion fondé sur MIH	80
Figure 92. Echange des messages durant le Handover avec MIH	81
Figure 93. Les délais	82

Figure 94. Les taux des paquets perdus	83
Figure 95. Les débits	84
Figure 96. Pile protocolaire MIH+MSCTP	87
Figure 97. Modèle d'interconnexion et 2 ^{ème} scénario	88
Figure 98. Délais du Handover depuis UMTS vers WiMAX	91
Figure 99. Délais du Handover depuis WiMAX vers UMTS	92
Figure 100. Taux des paquets perdus du Handover depuis UMTS vers WiMAX	93
Figure 101. Taux des paquets perdus du Handover depuis WiMAX vers UMTS	93
Figure 102. Débits du Handover depuis UMTS vers WiMAX	94
Figure 103. Débits du Handover depuis WiMAX vers UMTS	94
Figure 104. Pile protocolaire et mécanismes d'encapsulation et de fragmentation	96
Figure 105. Modèle d'interconnexion et 1 ^{er} scénario de mobilité	97
Figure 106. Délais	99
Figure 107. Gigues	100
Figure 108. Taux des paquets perdus	100
Figure 109. Débits	101
Figure 110. Fonctionnement de MIH + MSCTP	103
Figure 111. Pile protocolaire	104
Figure 112. Modèle d'interconnexion et 2 ^{ème} scénario de mobilité	105

Liste des tableaux

Tableau 1. Comparaison entre 802.16e, 802.16m, LTE et UMB	23
Tableau 2. Comparaison entre 802.16e et 802.11e	25
Tableau 3. Comparaison entre 802.16e et UMTS	27
Tableau 4. Comparaison entre DVB-S et DVB-RCS	29
Tableau 5. Services MIH	42
Tableau 6. Vitesses	45
Tableau 7. Paramètres des simulations sous NS2	47
Tableau 8. Paramètres des simulations sous NS2	55
Tableau 9. Comparaison entre MIP, PMIP et MSCTP	59
Tableau 10. Paramètres des simulations sous NS2	61
Tableau 11. Fonctions d'appartenance et ensembles flous	68
Tableau 12. Poids de la probabilité de Handover	69
Tableau 13. Paramètres du trafic	71
Tableau 14. Paramètres des simulations sous NS2	71
Tableau 15. Paramètres des simulations sous NS2	81
Tableau 16. Paramètres des simulations du WiMAX mobile sous NS2	89
Tableau 17. Paramètres des simulations de l'UMTS sous NS2	90
Tableau 18. Paramètres des simulations	98