

**Résumé**

Depuis l'apparition de la téléphonie mobile, les réseaux utilisés n'ont cessé d'évoluer pour assurer une meilleure qualité de service. Cependant, en dépit de leur adoption généralisée, les réseaux IP traditionnels restent complexes et difficiles à gérer à cause de multicritères, liés au routage et à l'administration des configurations prédéfinis. Ceci est dû au fait que les plans de contrôle et de données sont regroupés au sein du même équipement.

Le déploiement de nouveaux services réseau est généralement difficile et coûteux. Dans ce contexte, la virtualisation des réseaux a été présentée comme un nouveau paradigme pour résoudre les problèmes liés à l'architecture actuelle des réseaux mobiles.

Ce travail de thèse, présente les réseaux définis par logiciels (SDN) comme solution à adopter par les fournisseurs de services pour offrir de nouveaux services à leurs clients tout en garantissant une meilleure qualité de service (QoS), et en optimisant l'utilisation des ressources.

Une implémentation de l'approche SDN dans les réseaux sans fil améliore leurs qualités de service et leurs interopérabilités. En effet, lors d'une opération de Handover plusieurs problèmes peuvent survenir et peuvent avoir un impact direct sur le délai de transmission de bout en bout, la perte de paquets lors du Handover, la gigue et le MoS. Pour cela, nous proposons l'approche SDMN (Software Defined Mobile Networks) et SDWN (Software Defined Wireless Networks) pour améliorer les performances des réseaux cellulaires, via le déploiement de plusieurs algorithmes au niveau du contrôleur SDN visant à améliorer le temps d'exécution du Handover verticale et horizontale.

Mots-clés: SDN, QoS, Handover, 3G, 4G, 5G, WiFi, WiMAX

**Abstract**

Since the appearance of mobile telephony, the networks used have constantly to evolve to ensure a better quality of service. However, despite their widespread adoption, traditional IP networks remain complex and difficult to manage because of multi-criteria, related to the routing and administration of predefined configurations. This is because control and data plans are grouped together in the same equipment.

Deploying new network services have become difficult and costly. In this context, network virtualization has been presented as a new paradigm for solving problems related to the current mobile networks architecture.

This thesis presents Software Defined Networks (SDNs) as a solution to be adopted by service providers to offer new services to their customers while ensuring a better quality of service (QoS), and optimizing the use of services.

An implementation of the SDN approach in wireless networks improves their service quality and interoperability. Indeed, during a Handover operation several problems can occur and can have a direct impact on end-to-end transmission delay, packet loss during Handover, jitter and MoS.

For this, we propose the Software Defined Mobile Networks (SDMN) approach and Software Defined Wireless Networks (SDWN) to improve the performance of cellular networks, by deploying several algorithms at the SDN controller to improve execution time of the vertical and horizontal Handover.

Keywords: SDN, QoS, Handover, 3G, 4G, 5G, WiFi, WiMAX.



Université Hassan 1<sup>er</sup>  
Centre d'Études Doctorales



Faculté des Sciences et Techniques  
Settat

**THÈSE DE DOCTORAT**

Pour l'obtention de grade de Docteur en Réseaux et Informatique  
Formation Doctorale: Mathématiques Appliquées et Informatique  
Spécialité : Réseaux Informatiques et Télécommunication

Sous le thème

# L'Apport de l'Approche SDN dans l'Amélioration de la Mobilité dans les Réseaux de Nouvelles Générations

Présentée par :  
**LAASSIRI Fatima**

Soutenu le: 26/12/2020

A la Faculté des Sciences et Techniques de Settat devant le jury composé de :

Pr. EL KAMOUN Najib	P.E.S	FS El Jadida	Président
Pr. HAQIQ Abdelkrim	P.E.S	FST Settat	Rapporteur
Pr. RIDA Mohamed	P.H	FS Ain Chok Casablanca	Rapporteur
Pr. ABGHOUR Nouredine	P.H	FS Ain Chock Casablanca	Examineur
Pr. HANINI Mohammed	P.H	FST Settat	Examineur
Pr. MOUGHIT Mohamed	P.E.S	ENSA Khouribga	Directeur de thèse

Année Universitaire: 2020/2021

LAASSIRI  
Fatima

L'APPORT DE L'APPROCHE SDN DANS L'AMÉLIORATION  
DE LA MOBILITE DANS  
LES RESEAUX DE NOUVELLES GENERATIONS

2020  
MAI

## **Remerciement**

Les travaux évoqués dans cette thèse ont été réalisés au sein du laboratoire Informatique, Réseaux, Mobilité, et Modélisation (IR2M), Faculté des Sciences et Techniques, Université Hassan I, Maroc.

Je tiens tout particulièrement à remercier mon directeur de thèse, Monsieur MOUGHIT Mohamed, professeur à l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Khouribga, pour toutes les qualités avec lesquelles il a dirigé ce travail, également pour le soutien et la confiance, qu'il m'a toujours témoigné. Je suis heureux de pouvoir lui exprimer ici mes sincères remerciements. Je suis reconnaissant pour sa patience, sa sympathie et sa disponibilité à tout moment.

Je remercie sincèrement et du fond du cœur Monsieur Noureddine IDBOUFKER, professeur à l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Marrakech, pour avoir accepté d'être Co-encadrant de cette thèse. Il a toujours montré un intérêt inconditionnel pour mes travaux et répondu à mes sollicitations lorsque le besoin s'en faisait sentir. Les nombreuses discussions que nous avons pu avoir se sont montrées plus qu'enrichissantes : L'orientation et la rigueur de ce travail en ont tiré un grand profit.

Il m'est agréable d'exprimer également ma profonde gratitude à Mr. Abdelkrim HAQIQ, professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Settât et directeur du laboratoire d'Informatique, Réseaux, Mobilité et Modélisation (IR2M), d'avoir accepté d'évaluer mon manuscrit de thèse, et aussi pour ses remarques pertinentes qui ont permis son amélioration, pour ses encouragements et sa disponibilité tout au long de ma thèse.

C'est avec un grand plaisir que je trouve dans ce jury de thèse Monsieur EL KAMOUN Najib, professeur à la Faculté des Sciences d'El Jadida. Je le remercie sincèrement d'avoir accepté d'être président du jury de cette thèse. Il m'a fait l'honneur par sa présence.

J'adresse toute ma gratitude et mes reconnaissances à Monsieur RIDA Mohamed, professeur à la Faculté des Sciences Ain Chok, de Casablanca, qui m'ont fait l'honneur d'être rapporteur de ces travaux de thèse, et de juger ce travail.

Egalement, je remercie Monsieur HANOUNE Mostafa, professeur à Faculté des Sciences Ben Msik Casablanca, d'avoir accepté de faire partie de ce jury en tant que rapporteur de cette thèse.

Je présente mes vifs remerciements les plus sincères à Monsieur ABGHOOR Noureddine, professeur à la Faculté des Sciences Ain Chock de Casablanca, d'avoir accepté d'être examinateur de cette thèse. Je l'en remercie sincèrement.

Je voudrais, également, exprimer mes sentiments de gratitude à Monsieur HANINI Mohammed, professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Settât, qui m'a fait l'honneur d'être examinateur de ce travail.

Mes remerciements les plus sincères à Monsieur le professeur BELHAMRA Mohammed, enseignant de la langue anglaise, d'avoir accepté de me corriger linguistiquement nos articles.

Je remercie tous les professeurs indiqués pour le temps précieux qu'ils m'ont réservé pour leur lecture, leurs remarques et leurs interrogations améliorant la qualité de ce travail.

Mes remerciements et mes respects les plus distingués à tous les responsables du CEDoc de la Faculté des Sciences et Techniques de Settât.

Enfin, je tiens à remercier mes amis et surtout ma famille pour leur soutien et leurs encouragements.

## *Dédicace*

A mes très chers parents ;

Nulle dédicace n'est susceptible de vous exprimer ma profonde affection et mon immense gratitude pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation et mes études.

A mes chers frères ;

A mes chères sœurs ;

A ma très chère famille, Nul mot ne pourra exprimer ma gratitude envers vous ;

A tous mes amis ;

Pour tous les instants inoubliables que j'ai passés avec vous, je vous remercie beaucoup.

A tous ceux qui m'aiment.

LAASSIRI Fatima

# Table des matières

1.	Contexte et objectifs de notre thèse .....	16
2.	Problématique et solutions proposées .....	17
3.	Contributions de la thèse .....	17
4.	Organisation de la thèse .....	18
<b>Chapitre I</b>	<b>: Etat de l'art des Réseaux SDN .....</b>	<b>19</b>
<b>I.</b>	<b>Présentation de la technologie SDN .....</b>	<b>20</b>
I.1	Etat de l'art de SDN .....	20
I.2	Modèle SDN .....	21
I.2.1	Couches SDN .....	22
a.	Couche Infrastructure .....	22
b.	Couche de Contrôle .....	23
c.	Couche application .....	25
I.3	Interfaces de SDN .....	25
I.4	Modes de communication .....	25
I.5	Protocole OpenFlow .....	27
I.5.1	Etat de l'art du protocole OpenFlow .....	28
I.5.2	Fonctions OpenFlow .....	28
I.5.3	Ports OpenFlow .....	30
a.	Types de Ports OpenFlow .....	30
I.5.4	Paquets OpenFlow .....	31
I.5.5	Traitement de Pipeline .....	31
I.5.6	Tableaux de flux .....	33
I.5.7	Trame de SDN .....	33
I.5.8	Versions d'OpenFlow .....	34
a.	OpenFlow v 1.0 .....	34
b.	OpenFlow v 1.1 .....	35
c.	OpenFlow v 1.2 .....	36
d.	OpenFlow v 1.3 .....	37
e.	OpenFlow 1.4 .....	37
f.	OpenFlow 1.5 .....	37
I.5.9	Sécurité dans SDN .....	38
<b>Chapitre II</b>	<b>: Evaluation des performances des principales topologies de SDN et Ethernet .....</b>	<b>39</b>
<b>I.</b>	<b>Comparaison entre SDN et les réseaux Ethernet .....</b>	<b>40</b>
<b>II.</b>	<b>Méthodologie et environnement d'évaluation des expériences .....</b>	<b>41</b>
II.1	Simulateur OMNeT 4.6++ .....	41
II.2	Scénarios d'évaluation des performances .....	42
II.3	Evaluation des performances SDN et Ethernet .....	44
a.	Impact sur le délai de bout en bout .....	44
b.	Impact sur la gigue .....	44
c.	Impact sur la perte des paquets .....	45
d.	Impact sur le MoS .....	46
II.4	Synthèse et Interprétation des résultats .....	46
<b>Chapitre III</b>	<b>: Apport de l'approche SDN dans l'amélioration du Handover vertical entre les cellules WiMAX et WiFi</b>	<b>48</b>
<b>I.</b>	<b>Réseaux sans fil .....</b>	<b>49</b>
I.1	Technologie WiFi .....	49
a.	Mode infrastructure .....	50
b.	Mode ad hoc .....	51

I.2	Technologie WiMAX .....	51
I.2.1	Architecture et le modèle de référence WiMAX .....	52
I.2.2	Pile protocolaire du WiMAX .....	54
<b>II.</b>	<b>Etat de l'art de la gestion du Handover .....</b>	<b>54</b>
<b>III.</b>	<b>Gestion de la mobilité .....</b>	<b>55</b>
III.1	Protocoles de Handover .....	57
III.1.1	Protocole de Handover Indépendant des Médias (MIH) .....	57
a.	Service de Commande Indépendant des Médias (MICS) .....	57
b.	Service d'information Indépendant des Médias (MIIS).....	58
c.	Protocole des Fonctions de Transfert Independent des Medias (MIHF).....	58
III.1.2	Différents types de Handover .....	58
a.	Décision de Transfert Contrôlé par le Mobile (MCHO).....	58
b.	Décision de Transfert Contrôlé par le Réseau (NCHO).....	58
<b>IV.</b>	<b>Handover dans les réseaux Wi-Fi.....</b>	<b>59</b>
<b>V.</b>	<b>Handover dans les réseaux WiMAX .....</b>	<b>59</b>
<b>VI.</b>	<b>Méthodologie et environnement d'évaluation .....</b>	<b>60</b>
<b>VII.</b>	<b>Synthèse et analyse des critères d'évaluation des performances .....</b>	<b>63</b>
<b>VIII.</b>	<b>Description des expériences .....</b>	<b>63</b>
<b>IX.</b>	<b>Résultats de simulation .....</b>	<b>64</b>
a.	Impact de SDN sur Handover dans le contexte de grande vitesse .....	67
b.	Temps d'exécution de Handover entre WiMAX et WiFi .....	68
c.	Amélioration du délai de bout en bout entre le WiFi et WiMAX .....	68
d.	Amélioration des débits entre le WiFi et WiMAX .....	69
e.	Amélioration de la gigue entre les réseaux WiFi et WiMAX .....	69
<b>X.</b>	<b>Discussion des résultats .....</b>	<b>70</b>
<b>Chapitre IV : Apport de l'approche SDN dans l'amélioration du Handover dans les réseaux cellulaires 3G, 4G et 5G</b>		<b>71</b>
<b>I.</b>	<b>Etat de l'art.....</b>	<b>72</b>
<b>II.</b>	<b>Réseaux Mobiles à haut débit .....</b>	<b>73</b>
II.1	Troisième Génération (3G) .....	73
II.1.1	Architecture globale de 3G .....	73
II.2	Quatrième Génération .....	75
II.2.1	Architecture de la 4G .....	75
II.3	Technologie mobile 5G.....	77
II.3.1	Architecture 5G.....	77
II.3.2	Interfaces de l'architecture 5G .....	78
<b>III.</b>	<b>Gestion du Handover.....</b>	<b>78</b>
III.1	Protocoles de gestion de Mobilité .....	79
III.2	Protocole IP Mobile .....	79
III.2.1	Protocole IPv6 Mobile Hiérarchique .....	81
III.2.2	Fast Handover pour IPv6 Mobile .....	81
III.2.3	Proxy Mobile IPv6 .....	81
III.2.4	Fast Hierarchical Mobile IPv6.....	81
III.2.5	Mobile IPv6 pour NEMO .....	82
III.2.6	NEMO de Support Basique .....	82
III.3	Problématique et contribution .....	82
a.	Contribution 1: Apport de l'approche SDN dans l'amélioration du Handover dans les réseaux cellulaires 3G.....	84

b.	Synthèse de la contribution 1: Apport de l'approche SDN dans l'amélioration du Handover dans le réseau cellulaires 3G	87
c.	- Contribution 2: Apport de l'approche SDN dans l'amélioration du Handover dans les réseaux cellulaires 4G	88
d.	Synthèse de la contribution 2: Apport de l'approche SDN dans l'amélioration du Handover dans le réseau cellulaires 4G	91
e.	- Contribution 3: Apport de l'approche SDN dans l'amélioration du Handover dans les réseaux cellulaires 5G	92
f.	Synthèse de la contribution 3: Apport de l'approche SDN dans l'amélioration du Handover dans le réseau cellulaires 5G	94
<b>IV.</b>	<b>Evaluation des performances</b>	<b>95</b>
<b>V.</b>	<b>Analyse des résultats</b>	<b>98</b>
V.1	Résultats de la simulation des expériences de 3G, 4G et 5G basée sur SDN	98
a.	Evaluation du délai de bout en bout	98
b.	Evaluation de la Gigue	99
c.	Paquets perdus	99
d.	Mean Opinion Score	100
e.	Temps d'exécution de Handover sous 3G, 4G et 5G avec et sans SDN	100
<b>VI.</b>	<b>Synthèse de l'évaluation</b>	<b>101</b>
	<b>Production scientifique</b>	<b>104</b>
1.	liste des publications	104
2.	Communications dans des conférences nationales et internationales	105
	Bibliographie	107

## *Liste des tableaux*

Tableau 1: Caractéristiques des contrôleurs SDN.....	23
Tableau 2: Tableau de flux d'un commutateur OpenFlow .....	33
Tableau 3: Champs d'en-tête de la trame SDN.....	33
Tableau 4: Liste des instructions pour la version 1.1 d'OpenFlow .....	35
Tableau 5: Entrées de la table du groupe pour la version 1.1 ou plus d'OpenFlow.....	36
Tableau 6: Entrées de la table de mesure OpenFlow 1.3 .....	36
Tableau 7: Standards IEEE 802.11 .....	49
Tableau 8: Différentes normes de WiMAX.....	51
Tableau 9: Fonctions des différents points des références .....	53
Tableau 10: Protocoles utilisés pour la réalisation du HO entre WiFi et WiMAX .....	60
Tableau 11: Interfaces de l'architecture 5G .....	78
Tableau 12: Synthèse de l'évaluation des réseaux de nouvelle génération 3G, 4G, et 5G avec l'approche SDN .....	101



## Liste des figures

Figure 1: Modèle SDN.....	23
Figure 2: Contrôleurs de SDN .....	24
Figure 3: Structure des domaines SDN.....	26
Figure 4: Protocole OpenFlow.....	27
Figure 5: Processus de transmission des paquets avec OpenFlow 1.0 au sein d'un commutateur.....	29
Figure 6: Trame d'OpenFlow .....	31
Figure 7: Flux des paquets dans un commutateur OpenFlow .....	32
Figure 8: Versions d'OpenFlow .....	34
Figure 9: Pipeline d'OpenFlow 1.1.....	35
Figure 10: Pipeline d'OpenFlow 1.5.....	37
Figure 11: Plans des routeurs.....	40
Figure 12: Comparaison entre SDN et les réseaux Ethernet.....	41
Figure 13: Expérience 1: Topologie SDN en arborescence .....	42
Figure 14: Expérience 2: Topologie SDN en anneau .....	42
Figure 15: Expérience 3: Topologie centralisée de SDN.....	43
Figure 16: Expérience 4: Topologie Ethernet .....	43
Figure 17: Délai de bout en bout dans les principales topologies SDN et Ethernet.....	44
Figure 18: Gigue dans les principales topologies SDN et Ethernet .....	45
Figure 19: Paquets perdus dans les principales topologies SDN et Ethernet.....	45
Figure 20: MOS dans les principales topologies SDN et Ethernet .....	46
Figure 21: Architecture des réseaux WiMAX .....	52
Figure 22: Modèle de référence du réseau WiMAX.....	53
Figure 23: Structure en couche de la norme 802.16 .....	54
Figure 24: Fonctionnement de MIH .....	56
Figure 25: Mécanisme du Hard Handover.....	59
Figure 26: Organigramme de l'algorithme de Handover vertical proposé .....	62
Figure 27: Handover Vertical et horizontale entre Wi-Fi et WiMAX sans SDN .....	64
Figure 28: Processus du Handover vertical entre les réseaux WiMAX et Wi-Fi .....	65
Figure 29: Point d'accès OpenFlow .....	66
Figure 30: Handover Vertical entre Wi-Fi et WiMAX avec SDN.....	66
Figure 31: Paquets perdus lors du HO Wi-Fi-WiMAX avec et sans SDN.....	67
Figure 32: Temps d'exécution du Handover entre les réseaux Wi-Fi et WiMAX avec et sans SDN .....	68
Figure 33: Délai de bout en bout dans les réseaux Wi-Fi et WiMAX avec et sans SDN.....	68
Figure 34: Débit offert dans les réseaux Wi-Fi et WiMAX avec et sans SDN .....	69
Figure 35: Gigue dans les réseaux Wi-Fi et WiMAX avec et sans SDN .....	69
Figure 36: Architecture de la 3G .....	74
Figure 37: Architecture générale de la 4G .....	75
Figure 38: Architecture générale de la 5G.....	77
Figure 39: Protocoles de gestion de Mobilité .....	79
Figure 40: Architecture du protocole IP Mobile.....	80
Figure 41: Modules du contrôleur SDN.....	83
Figure 42: Modules de commutateur OpenFlow .....	83
Figure 43: Architecture 3G proposés avec SDN.....	84
Figure 44: Ho au sein de la 3G sans SDN .....	85
Figure 45: Ho au sein de la 3G avec SDN .....	85
Figure 46: Algorithme d'exécution du Handover dans 3G par l'intégration de SDN.....	88
Figure 47: Architecture 4G proposés avec SDN.....	89
Figure 48: Ho au sein de la 4G sans SDN .....	90
Figure 49: Ho au sein de la 4G avec SDN .....	91
Figure 50: Algorithme d'exécution du Handover dans 4G par l'intégration de SDN.....	92
Figure 51: Architecture de 5G proposés avec SDN .....	93
Figure 52: Ho au sein de la 5G sans SDN .....	93
Figure 53: Ho au sein de la 5G avec SDN .....	94
Figure 54: Algorithme d'exécution du Handover dans 5G par intégration de SDN .....	94
Figure 55: Scénario 1: Architecture de la 3G sans SDN.....	95
Figure 56: Scénario 2: Architecture de la 3G avec SDN .....	95

Figure 57: Scénario 3: Architecture de la 4G sans SDN.....	96
Figure 58: Scénario 4: Architecture de la 4G utilisant SDN.....	96
Figure 59: Scénario 5: Architecture de la 5G sans SDN.....	97
Figure 60: Scénario 6: Architecture de la 5G avec SDN .....	97
Figure 61: Délai de bout en bout lors du Handover 3G, 4G et 5G avec et sans SDN .....	98
Figure 62: Gigue lors du Handover 3G, 4G et 5G avec et sans SDN .....	99
Figure 63: Paquets perdus lors du Handover 3G, 4G et 5G avec et sans SDN .....	99
Figure 64: MOS lors Handover 3G, 4G et 5G avec et sans SDN .....	100
Figure 65: Temps d'exécution de 3G, 4G et 5G avec et sans SDN .....	100

## *Résumé*

Depuis l'apparition de la téléphonie mobile, les réseaux utilisés n'ont cessé d'évoluer pour assurer une meilleure qualité de service. Cependant, en dépit de leur adoption généralisée, les réseaux IP traditionnels restent complexes et difficiles à gérer à cause de multicritères, liés au routage et à l'administration des configurations prédéfinis. Ceci est dû au fait que les plans de contrôle et de données sont regroupés au sein du même équipement.

Le déploiement de nouveaux services réseau est généralement difficile et coûteux. Dans ce contexte, la virtualisation des réseaux a été présentée comme un nouveau paradigme pour résoudre les problèmes liés à l'architecture actuelle des réseaux mobiles.

Ce travail de thèse, présente les réseaux définis par logiciels (SDN) comme solution à adopter par les fournisseurs de services pour offrir de nouveaux services à leurs clients tout en garantissant une meilleure qualité de service (QoS), et en optimisant l'utilisation des ressources.

Une implémentation de l'approche SDN dans les réseaux sans fil améliore leurs qualités de service et leurs interopérabilités. En effet, lors d'une opération de Handover plusieurs problèmes peuvent survenir et peuvent avoir un impact direct sur le délai de transmission de bout en bout, la perte de paquets lors du Handover, la gigue et le MoS. Pour cela, nous proposons l'approche SDMN (Software Defined Mobile Networks) et SDWN (Software Defined Wireless Networks) pour améliorer les performances des réseaux cellulaires, via le déploiement de plusieurs algorithmes au niveau du contrôleur SDN visant à améliorer le temps d'exécution du Handover vertical et horizontale, aussi nous avons déployé un point d'accès, qui intègre le protocole OpenFlow et communique avec le contrôleur SDN.

Mots-clés: SDN, QoS, Handover, 3G, 4G, 5G, WiFi, WiMAX.

## *Abstract*

Since the appearance of mobile telephony, the networks used have constantly to evolve to ensure a better quality of service. However, despite their widespread adoption, traditional IP networks remain complex and difficult to manage because of multi-criteria, related to the routing and administration of predefined configurations. This is because control and data plans are grouped together in the same equipment.

Deploying new network services have become difficult and costly. In this context, networks virtualization has been presented as a new paradigm for solving problems related to the current mobiles networks architecture.

This thesis presents Software Defined Networks (SDNs) as a solution to be adopted by service providers to offer new services to their customers while ensuring a better quality of service (QoS), and optimizing the use of services.

An implementation of the SDN approach in wireless networks improves their service quality and interoperability. Indeed, during a Handover operation several problems can occur and can have a direct impact on end-to-end transmission delay, packet loss during Handover, jitter and MoS.

For this, we propose the Software Defined Mobile Networks (SDMN) approach and Software Defined Wireless Networks (SDWN) to improve the performance of cellular networks, by deploying several algorithms at the SDN controller to improve execution time of the vertical and horizontal Handover, also we deployed an access point, which integrates the OpenFlow protocol and communicates with the SDN controller.

Keywords: SDN, QoS, Handover, 3G, 4G, 5G, WiFi, WiMAX.

## *Liste des Sigles et Acronymes*

1G First Generation  
2G Second Generation  
3GPP 3rd Generation Partnership Project  
5G Fifth Generation  
2G Third Generation  
4D: Decision, Dissemination, Discovery, Data

### A

AKA: Authentication and Key Agreement  
AL: Access layer  
AMF: Access and Mobility Management Function  
AMM: Active Management Module  
AN: Active Networks  
AP: Access Point  
API: Application Program Interface  
ASN: Access Service Networks  
ATM: Asynchronous Transfer Mode  
AUSF: Authentication Server Function

### B

BGP: Border Gateway Protocol  
BLER: Blocking Error Rate  
BRS: Beam Reference Signals  
BS: Base Station  
BSS: Basic Service Set  
BSSID: Basic Service Set Identifier  
BU: Binding Update  
CS: Circuit Switched

### C

CAPEX: CAPital Expenditure  
CL: Core layer  
CN: Core Networks  
CN: Correspondant Node  
CoA: Care of Address  
CPE: Customer Premise Equipment  
CPS: Common Part Sublayer  
C-RAN: Centralized Radio Access Networks  
C-RAN: Centralized Radio Access Networks  
CRC: Cyclic Redundancy Check  
CSMA/CD: Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection  
CSN: Core Service Networks

### D

DCA: Devolved Control of ATM Networks  
DD: Database Description Packets  
DDoS: Distributed DoS  
DL: Distribution Layer  
DoS: Denial of Service  
DRNC: Drift RNC Radio Network Controller  
DS: Distribution System  
DSL: Domain Specific Language  
DSSS: Direct-Sequence Spread Spectrum

### E

EPC: Evolved Packet Core  
EPS: Evolved Packet System  
ESP: Encrypted Security Payload  
ESS: Extended Service Set  
ESSID: Extended Service Set Identifier  
E-UTRAN: Evolved UTRAN

### F

FA: Foreign Agent  
FBSS: Fast Base Station Switching  
FEC: Forward Error Correction  
FHMP: Fast Hierarchical Mobile IPv6  
FHSS: Frequency-Hopping Spread Spectrum  
FIB: Forwarding Information Base  
FMIPv6: Fast Handover for IPv6 Mobile

### G

GSM: Global System for Mobile Communication  
GGSN: Gateway GPRS Support Node  
GMSC: Gateway Mobile Switching Centre  
gNB: Generation Node Base Station  
GPRS: General Packet Radio Service  
GSMP: General Switch Management Protocol  
GTP: GPRS Tunneling Protocol

### H

HARQ: Hybrid Automatic Repeat Request  
HA: Home Agent  
HMIPv6: Hierarchical Mobile IPv6  
HoA: Home Address  
HSS: Home Subscriber Service

## I

IBSS: Independant Basic Service Set  
ICMPv6: Internet Control Message Protocol version 6  
IE: Information Element  
IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers  
IETF: Internet Engineering Task Force  
IMS: IP MultiMedia Sub-system  
IPv6: Internet Protocol version 6  
IR: Incremental Redanduncy  
ISO: International Standardization Organisation

## L

LOS: Line of Sight  
LA: Location Area  
LER: Label Edge  
LLC: Logical Link Control  
LSA: Link-State Advertisements  
LSR: Label Switch Routers

## M

MAC PDU: Medium Access Control-Protocol Data Unit  
MAC: Medium Access Control  
MAG: Mobile Access Gateway  
MAHO: Mobile Assisted Handover  
MCC: Mobile Cloud Computing  
MCHO: Mobile Controlled Handover Decision  
MDHO: Macro Diversity Handover  
MICS: Media Independent Command Services  
MIH: Media Independent Handover  
MIHF: Media Independent Handover Function  
MIIS: Media Independent Information Services  
MIMO: Multiple Input Multiple Output  
MIP: Mobile Internet Protocol  
MME: Mobility Management Entity  
MMTC: Massive Machine Type Communications  
MN: Mobile Node  
MPLS: MultiProtocol Label Switching  
MR: Mobile Router  
MSC: Mobile Switching Centre  
MU-MIMO: Multi-Users, Multiple-Input, Multiple-Output

## N

NAHO: Networks Assisted Handover  
NAP: Networks Access Provider  
NAR: Next Access Router  
NAS: Non-Access Stratum  
NCHO: Networks Controlled Handover Decision  
NEMO BS: Networks Mobility Basic Support  
NEMO: Networks Mobility  
NG-AP: Next Generation-Application Protocol  
NGCN: Next/New Generation Core Networks  
ng-eNB: Next/New Generation Node Base Station  
NG-RAN: Next/New Generation RAN  
NLoS: No Line of Sight  
NR: New Radio  
NRM: Networks Reference Model  
NSP: Networks Service Provider  
NSS: Networks Sub-System  
NSSF: Networks Slice Selection Function  
SSCS: Service Specific Convergence Sublayer

## O

OAM: Operation, Administration and Management  
OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing  
OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access  
ONF: Open Networking Foundation  
OPEX: OPerating Expenses  
OSI: Open System Interconnexion  
OSPF: Open Shortest Path First  
OXM: OpenFlow eXtensible Match

## P

PS: Packet Switched  
PAR: Previous Access Router  
PCF: Policy Charging Function  
PCR: Policy and Charging Rules  
PCRF: Policy and Charging Rules Function  
PDN-GW: Packet Data Network Gateway/Packet Gateway  
PDU: tunnel –PDU  
PFCP: Packet Forwarding Control Plane  
P-GW: Packet-Switch GetWay  
PKM: Privacy Key Management

PMIPv6: Proxy MobileIPv6

PN: Prog Net

PS: Packet Switched

PS: Privacy Sub-layer

## R

RA: Router Advertisement

RAN: Radio Access Networks

RAT: Radio Access Technologies

RIB: Routing Information Base

RLC: Radio Link Control

RNC: Radio Networks Controller

RRC: Connection Reconfiguration

RSA: Rives-Shamir-Adleman

RSS: Radio Signal Strength

RSSI: Radio Signal Strength Indicator

## S

SAP: Service Access Point

SC-FDMA: Single Carrier FDMA:  
Frequency Division Multiple Access

SCTP: Stream Control Transmission  
Protocol

SDMN: Software Defined Mobile  
Networks

SDN: Software Defined Networks

SDWN: Software Defined Wireless  
Networks

SGSN: Serving GPRS Support Node

SGW: Serving Gateway

SINR: Signal to Interference Noise Ratio

SIP: Session Initiation Protocol

SMF: Session Management Function

SMM: Standby Management Module

SNR: Signal to Noise Ratio

S-OFDMA: Scalable Orthogonal  
Frequency Division Multiple Access

SPF: Shortest Path First algorithm

SRNC: Serving RNC Radio Networks  
Controller

SS/MS: Subscriber Station/Mobile Station

SS: Subscriber Station

## T

TAI: Tracking Area identity

TCAM: Ternary Content Addressable  
Memory

TAI: Tracking Area identity

TLV: Type Length Value

TTL: Time to Live

## U

UDM: Unified Data Management

UE: Equipement de l'utilisateur

UIT: Union Internationale des  
Télécommunications

UMBB: Ultra-reliable and Low Enhanced  
Mobile Broadband

UMTS: Universal Mobile  
Telecommunications Systems

UPF: User plane Function

URLLC: Ultra-reliable and Low Latency  
Communications

UTRAN: Universal Terrestrial Radio  
Access Networks

## V

VLAN: Virtual Local Area Networks

VLR: Visitor Location Register

VN: Virtual Networks

## W

WiFi: Wireless Fidelity

WiMAX: Worldwide Interoperability for  
Microwave Access

WMAN: Wireless Metropolitan Area  
Network

## X

Xn/AP (Xn Application Protocol)

# *Introduction et problématique*

## **1. Contexte et objectifs de notre thèse**

Les réseaux mobiles ont connu un énorme succès, ils sont devenus un outil universel indispensable pour les entreprises et la vie quotidienne de milliards d'individus. Toutefois, afin d'entretenir et perpétuer son succès, le défi de traiter des volumes de plus en plus grands de trafic dus à l'explosion du nombre des nœuds mobiles, à l'utilisation massive des réseaux sociaux et des nouvelles tendances en technologies de l'information comme l'Internet des objets, le cloud computing... En 2019, le nombre d'internautes s'élève à 4,39 milliards [1] à travers le monde. Depuis un an, le nombre a augmenté de 367 millions ce qui correspond à une croissance annuelle de +9% [2]. Il est prévu que le nombre des appareils mobiles connectés dépasse le nombre des personnes sur terre, soit plus d'un appareil par personne.

Pour relever ce défi, il est judicieux d'apporter des changements au réseau Internet et aux réseaux mobiles. En effet, l'architecture fondamentale des réseaux Internet n'a connu aucun progrès significatif pendant presque trois décennies. L'intégration des équipements réseau d'IPv4 vers IPv6, qui a commencé depuis une dizaine d'années sont toujours en cours. La conception et le déploiement de nouveaux protocoles de routage peuvent prendre entre 5 à 10 années. L'une des raisons de cette difficulté d'innover réside dans l'architecture des réseaux actuels où le plan de contrôle et le plan des données coexistent dans chaque équipement réseau. En fait, cela empêche un déploiement rapide des nouvelles fonctionnalités réseau, parce qu'elles doivent être incorporées directement dans l'équipement physique, alors que ceci dépend des cycles de production des fabricants qui sont, généralement, très longs. D'autre part, la dépendance aux fabricants augmente les coûts d'investissement liés aux infrastructures réseaux. Aussi le couplage du plan de contrôle et de données dans les équipements réseaux rend les opérations de configuration et de gestion complexe et augmente le risque des erreurs.

Les réseaux mobiles qui connaissent une évolution progressive, souffre par des coupures de communications lors de changement de cellule ce qui nuit à la qualité du Handover.

L'avènement des réseaux SDN (Software Defined Networks) permet sans doute de faciliter l'innovation dans les réseaux grâce à la simplification de la gestion de la configuration qu'ils offrent. Un principal avantage des réseaux SDN est l'abstraction du réseau, ce qui signifie que le plan de contrôle fournit une vue abstraite aux applications, ce qui permet de gérer le réseau de façon unifiée et simplifier sa gestion.

Ce nouveau concept repose sur deux principes fondamentaux consistant à :

- Faire sortir la partie décisionnelle (Plan de contrôle) des équipements et la placer au niveau des contrôleurs SDN.
- Programmer les équipements réseau à travers des Interfaces de Programmation (API) ouvertes.

SDN est une nouvelle technologie qui permet d'introduire plus d'intelligence dans les réseaux, elle offre aux fournisseurs de services (FS) la possibilité de mieux programmer et contrôler les différentes ressources de leur réseau. Elle permet d'augmenter l'efficacité du réseau physique pour que leur infrastructure logique soit plus fonctionnelle par les échanges de flux. L'utilisation de SDN permet un contrôle centralisé sur la programmation des



différentes composantes du réseau. Dans une architecture SDN, le plan de contrôle et le plan de données d'un nœud physique sont découplés. En conséquence, cette flexibilité offre aux fournisseurs la possibilité de programmer et d'automatiser le contrôle du réseau. Ils peuvent ainsi répondre rapidement aux besoins des changeants en QoS des services déployés sur un réseau virtuel (VN). Les softs SDN peuvent facilement communiquer avec le réseau via l'interface Nord pour renforcer le dialogue entre application/réseau.

Ces changements dans l'infrastructure réseau ont pour conséquence de simplifier les équipements et de les rendre indépendants des fabricants. En d'autres termes, toute la complexité est incorporée dans le plan de contrôle SDN. Ce plan joue le rôle de médiateur entre les applications et l'infrastructure réseau, devenue programmable, via des APIs. Ce qui permet un déploiement plus rapide de nouveaux services et protocoles, tout en garantissant une qualité de service acceptable, les réseaux SDN seront sans doute un pilier pour le développement de l'internet fixe et mobile, pour qu'il puisse s'adapter au trafic qui augmente d'une manière exponentielle.

## **2. Problématique et solutions proposées**

L'utilisation des réseaux mobiles permet pleinement de profiter des potentialités de l'internet mobile (navigation fluide, téléchargements rapides, vidéos en streaming, visiophonie, cloud gaming, etc.). De nos jours, le téléphone mobile est devenu une vraie nécessité de la vie quotidienne, du fait des opportunités de communications offertes. De ce fait, les réseaux mobiles doivent offrir aux utilisateurs des débits de plus en plus élevés tout en respectant les exigences du trafic. En fait, les opérateurs de réseaux mobiles se dirigent vers une nouvelle ère de services nécessitant des exigences non seulement en termes de débit, mais aussi en termes de latence, d'efficacité de coût de maintenance OPEX (Operating Expenses), de coût d'investissement CAPEX (CAPital Expenditure).

D'autre part la gestion du Handover dans les réseaux cellulaires permet de garantir un niveau de QoS pour les nœuds mobiles. Lors d'une opération de Handover plusieurs problèmes peuvent survenir et qui ont un impact direct sur la latence, la perte de paquets, la gigue et le MoS.

Dans ce contexte, nous proposons l'approche SDMN (Software Defined Mobile Networks) et SDWN (Software Defined Wireless Networks) issues des réseaux SDN pour contribuer à l'amélioration des performances des réseaux mobiles, via l'implémentation et déploiement d'un nouvel algorithme au niveau du contrôleur SDN pour identifier les cellules candidates dans l'entourage du terminal mobile et le choix de la meilleure cellule en se basant sur la puissance du signal RSS.

Parallèlement, nous avons développé un point d'accès (AP\_OF) hébergeant le protocole OpenFlow et communiquant directement avec le contrôleur SDN sans avoir besoin du commutateur OpenFlow comme passerelle.

## **3. Contributions de la thèse**

Notre thèse présente les réseaux SDN qui sont des réseaux avec une nouvelle philosophie d'architecture et un nouveau protocole. Pour mener à bien cette thèse, il était nécessaire, pour nous, de comprendre et maîtriser les concepts derrière SDN. C'est pourquoi nous avons, d'abord, débuté nos travaux par une étude bibliographique de l'approche SDN. Nous avons présenté son architecture, ses apports, et aussi le protocole OpenFlow qu'elle déploie.

La thèse a donné lieu à cinq contributions à savoir:

**Première contribution:** Analyse comparative entre le SDN et le réseau Ethernet à travers l'évaluation des performances de leurs principales topologies.

**Deuxième contribution:** Amélioration du Handover Vertical entre les deux technologies WiFi et WiMAX par l'intégration de l'approche SDN, et ce par le déploiement d'un nouvel algorithme pour améliorer le temps d'exécution du Handover vertical entre les points d'accès WiFi et les stations de base WiMAX, et la proposition d'un nouveau point d'accès qui intègre le protocole OpenFlow, ce qui nous a permis de se débarrasser le commutateur OpenFlow qui est exigé dans l'architecture SDN.

**Troisième contribution:** Amélioration du Handover horizontal dans les réseaux cellulaires 3G par l'intégration de l'approche SDN dans l'UTRAN.

**Quatrième contribution:** Amélioration du Handover horizontal dans les réseaux cellulaires 4G par l'intégration de l'approche SDN dans l'e-UTRAN.

**Cinquième contribution:** Amélioration du Handover horizontal dans les réseaux cellulaires 5G par l'intégration de l'approche SDN dans l'NG-RAN.

#### 4. Organisation de la thèse

Cette thèse est composée de quatre chapitres.

Le premier chapitre présente l'état de l'art des réseaux SDN, et dans lequel nous présentons la limitation des architectures traditionnelles, les avantages SDN, l'architecture adoptée, ses éléments en plus du protocole OpenFlow.

Dans le deuxième chapitre, nous faisons une analyse comparative sur la différence entre SDN et Ethernet, ainsi que l'évaluation des performances des principales topologies des réseaux SDN.

Le troisième chapitre aborde l'évaluation et l'amélioration du Handover Vertical entre les cellules wifi et WiMAX, par utilisation de l'approche SDN et le déploiement d'un nouvel algorithme. Cet algorithme vise à améliorer les performances des réseaux sans fil utilisant SDWN (Software Defined Wireless Networks). Aussi nous proposons un nouveau point d'accès qui héberge le protocole OpenFlow.

Le dernier chapitre traite l'évaluation et l'amélioration des performances du Handover horizontal dans les réseaux mobiles 3G, 4G et 5G, via la conception et l'implémentation d'un nouvel algorithme visant à améliorer les performances de SDMN (Software Defined Mobile Networks).

Nous terminons notre thèse par une conclusion générale qui présente une synthèse des résultats trouvés et nous énumérons certaines perspectives à notre travail.

# **Chapitre I : Etat de l'art des Réseaux SDN**

## Introduction

Dans le fonctionnement actuel des réseaux IP, chaque équipement de réseau (routeur IP, commutateur Ethernet, Firewall, équilibrage de charge, système de détection d'intrusion, NAT, etc.) exécute ses fonctions du plan de contrôle et du plan de données. SDN propose de créer un point central qui gère le plan de contrôle, tandis que les commutateurs/routeurs physiques n'ont plus à prendre en charge que le plan de données. Pour se faire, l'Open Networking Foundation (ONF) a publié OpenFlow. Il s'agit d'un protocole standard utilisé par le contrôleur pour transmettre au commutateur des instructions qui permettent de programmer leur plan de données et d'obtenir des informations de ces commutateurs afin que le contrôleur puisse disposer d'une vue globale logique (abstraction) du réseau physique. Cette vue est utilisée pour toutes les décisions que doit prendre le plan de contrôle (routage, filtrage de trafic, partage de charge, traduction d'adresse, etc.). Le contrôleur SDN fournit une API aux « applications SDN » qui inclut cette vue globale. Ces applications implémentent, via le contrôleur, des services tels que le routage de flux, la mise en œuvre de politiques de QoS pour les flux, la sécurité de bout en bout des flux, le filtrage de flux, etc.

Ce chapitre présente l'état de l'art d'un réseau SDN. Il présente son architecture, ses concepts, le protocole OpenFlow qu'il déploie, ses tables de flux et la sécurité au sein de SDN.

## I. Présentation de la technologie SDN

### I.1 Etat de l'art de SDN

Avant l'apparition des réseaux SDN [3], tels que nous les connaissons aujourd'hui, plusieurs travaux ont été proposés auparavant, notamment la programmation du réseau et la séparation des plans de contrôle et de données. Cette section présente un bref aperçu de ces travaux, qui peuvent être considérés comme des ancêtres de SDN. La première idée de programmation des réseaux a été développée en 1996, sous le nom de « Réseaux Actifs » (AN, Active Networks) [4]. Quand un nœud du réseau reçoit des paquets, il extrait et exécute les programmes, et déclenche par conséquent des actions de transmission, de modification ou de suppression de paquet. Grâce à cette approche, de nouveaux mécanismes de services et de routage dans les réseaux peuvent être implémentés sans modification des équipements réseau. Plusieurs études [5] ont été menées sur les ANs, en particulier, sur les paquets intelligents, qui sont utilisés pour transporter des programmes malveillants ; une alternative aux ANs appelée Réseaux programmables ou Prog Net (PN) a été proposée en 1999 [6]. Les PN implémentent des programmes à l'intérieur des nœuds du réseau. Ces nœuds exécutent les programmes uniquement après une phase de signalisation et de vérification dans un objectif de sécurité. Les initiatives ANs et PN ont cherché à introduire la programmabilité dans les réseaux à travers des switches programmables. D'autre part, certains projets ont essayé de séparer le plan de contrôle du plan de données pour simplifier l'architecture réseau et fournir une abstraction sur l'infrastructure physique. Par exemple, le projet de recherche dénommé DCAN (Devolved Control of ATM Networks) [7] de l'université de Cambridge dont l'objectif était de développer l'infrastructure réseau de manière à ce que les fonctions de contrôle et de gestion de plusieurs équipements soient découplées de l'équipement physique et déléguées aux entités externes tel que le gestionnaire. Mais DCAN avait besoin d'un protocole de communication entre le gestionnaire et l'infrastructure réseau. En 1998, le groupe de travail OPENSIGN [8] a

commencé une série d'ateliers dédiés à rendre les réseaux Internet et mobiles plus ouverts, extensibles et programmables. OPENSIG établit une distinction entre l'équipement physique qui transporte les paquets et le système de contrôle et de gestion du réseau. Le vif de leur proposition était de fournir un accès à l'équipement physique par des interfaces réseau programmables et ouvertes, puis laisser au fournisseur de service le choix de manipuler le réseau en utilisant des applications intermédiaires. Motivé par ces idées, le groupe de travail l'IETF [9] (Internet Engineering Task Force) a proposé un protocole général de gestion des switches GSMP [10] (General Switch Management Protocol), conçu pour contrôler les étiquettes d'un commutateur, et informer le contrôleur des événements réseaux tels qu'une rupture de liaison.

Un autre projet appelé 4D (Decision, Dissemination, Discovery, Data) [11] a été lancé en 2005, Il propose une subdivision en 4 plans à savoir : "Decision plane", "Dissemination plane", "Discovery plane" et "Data plane". Les plans de diffusion et de découverte collectent les informations sur le réseau et les envoient au plan de décision, qui possède une vision globale sur le réseau afin de contrôler la transmission du trafic qui circule dans le plan de données. Le début des réseaux SDN a commencé avec le projet Ethane [12] qui est lancé en 2006 par l'université de Stanford. En effet, le projet Ethane définit une nouvelle architecture pour les réseaux d'entreprises. L'objectif de ce projet était d'avoir un contrôleur centralisé pour gérer les règles (Rules) et la sécurité dans le réseau. Il utilise deux composantes à savoir un contrôleur pour décider si un paquet doit être transmis et un switch Ethane composé de tables et d'une chaîne de communication entre les deux. Il était une source d'inspiration pour un système d'exploitation consacré aux réseaux dénommés Nox [13] et pour un nouveau concept appelé aujourd'hui « Réseaux définis par Logiciel » ou, « Software Defined Networks » [14]. Depuis 2007, et jusqu'à maintenant, l'université Stanford travaille sur le concept SDN au sein de l'équipe de recherche de l'ONF (Open Networking Foundation) [15].

En se basant sur les travaux des auteurs Isabel Sanchez , Antonio de la Oliva, et Vincenzo Mancuso, qui proposent une mobilité distribuée pour rendre les réseaux plus flexible en terme de temps d'exécution de Handover, afin d'améliorer à l'intérieur de protocole PMIP, utilisant le célèbre protocole OpenFlow, pour la prise en charge de la mobilité, de reconfiguration du chemin de données et de transparence vers les appareils mobiles, aussi pour contrôler les points d'accès et les commutateurs réseau.

## **I.2 Modèle SDN**

Les réseaux définis par logiciel (SDN) font référence à une nouvelle approche pour la programmabilité des réseaux, qui permet aux applications de communiquer réciproquement et directement avec les réseaux. L'application annonce le comportement désiré du réseau et elle offre la capacité d'initialisation de contrôle, de modification et de la gestion dynamique du comportement réseau via des interfaces ouvertes, qui permet aux réseaux de réagir dynamiquement aux changements dans le modèle d'utilisation et à la disponibilité des ressources réseau. De ce fait, les architectures réseaux peuvent être ajustées instantanément et répondre aux demandes des utilisateurs. Les réseaux SDN fournissent une séparation entre les fonctions de plan de contrôle (Contrôleur) et le plan de données (Commutateur) en utilisant un protocole qui modifie les tables de transfert au niveau des commutateurs. Le contrôleur

SDN possède une vue complète sur l'ensemble du réseau et sur son état, et permet ainsi aux commutateurs et aux applications de communiquer en temps réel.

SDN se positionne au niveau de la limite entre la couche 2 et la couche 3 du modèle OSI [16], son principe fondamental est la séparation entre le plan de contrôle (la décision de l'acheminement des paquets) et le plan des données (Exécution des décisions) pour pouvoir optimiser chacun d'eux plus facilement et offre une vue centralisée sur le réseau distribué. Le modèle SDN vise la facilité de gestion de l'infrastructure réseau, de la qualité de service et il offre une amélioration de la tolérance aux incidents.

### 1.2.1 Couches SDN

Les réseaux SDN permettent aux réseaux d'interagir avec les applications et de se reconfigurer efficacement pour répondre aux besoins, ce qui permet d'implémenter plusieurs politiques de gestion sur un seul réseau commun [17]. Pour cela, le modèle SDN repose sur trois couches à savoir la couche: couche Infrastructure, couche Contrôleur, couche Application. La figure 1 présente le modèle SDN.

#### a. Couche Infrastructure

Cette couche regroupe les nœuds réseau, qui peuvent être des commutateurs, des routeurs, des points d'accès WiFi, ou n'importe quel périphérique, qu'il soit physique ou virtuel. Des liaisons horizontales entre les nœuds servent à transporter les données d'où l'appellation de plan de données. Par ailleurs, d'autres liaisons avec la couche de contrôle sont réservées aux échanges d'informations transportant des instructions de contrôle généralement à l'aide du protocole OpenFlow [18]. Ainsi, le contrôle est entièrement pris en charge par le plan contrôle permettant de soulager les nœuds réseau du support de protocole(s) de routage et supporte de ce fait, uniquement, des directives reçues, en temps réel du plan de contrôle. Grâce à ces instructions, les nœuds acheminent les données contribuant ainsi à leur montée en puissance de traitement vers le haut débit.

Selon les modèles conceptuels des réseaux actuels, le rôle des équipements d'interconnexion est déterminant dans l'élaboration de la topologie réseau, le calcul des routes, la construction des tables de routage 'Routing' et de transfert 'Forwarding'. Ces processus sont gérés d'une façon autonome. En effet, dans le cas des réseaux traditionnels, chaque équipement collecte les informations sur tout le réseau, selon le protocole de routage utilisé afin d'avoir une vue permettant la redirection des messages reçus, en se basant sur la table de routage. Pour cela, le routeur transfère le paquet au routeur suivant, ou à l'hôte de destination, si une correspondance est trouvée au niveau de sa table de routage. En l'absence d'une correspondance (ni adresse de destination, ni passerelle par défaut); le paquet est alors abandonné [19].

L'approche SDN décompose les équipements en deux plans à savoir le plan de données qui s'occupe du transfert de données selon la décision prise par le plan de contrôle. Ce dernier gère la politique de traitement des paquets à savoir l'instanciation et la sélection de chemin, la disponibilité des services, tels que les mécanismes de basculement des chemins, l'entretien et la découverte de la topologie... La communication entre les plans de contrôle et de données se fait via l'interface dite **Southbound interface** [20]. Cette Interface est à forte contrainte temporelle, nécessite une faible latence et parfois une bande passante élevée afin d'effectuer, en temps réel, les nombreuses opérations de mise à jour.

### b. Couche de Contrôle

Commutateurs gèrent les tableaux de flux dont les entrées peuvent être remplies uniquement par le contrôleur. Le contrôleur représente le cerveau du modèle SDN qui récolte les informations sur tous les réseaux et offre une vue centralisée du réseau global. Il prend en charge l'envoi des commandes à tous les équipements et centralise, de ce fait, l'intelligence du réseau. La communication entre le contrôleur et le commutateur utilise le protocole OpenFlow [21].

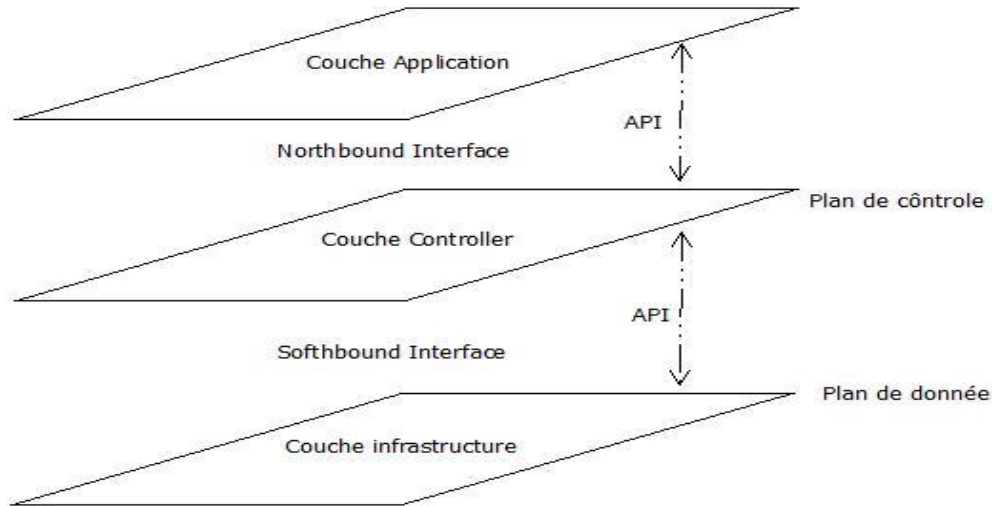


Figure 1: Modèle SDN

Le plan de contrôle SDN est responsable de la prise en charge des décisions sur la façon dont les paquets devraient être traités, par exemple la qualité de service, la sécurité [22], par un ou plusieurs périphériques réseau, en poussant de telles décisions vers les éléments réseau pour l'exécution.

Plusieurs contrôleurs ont été développés, dont la majorité sont open source et supportent le protocole OpenFlow. Ces contrôleurs diffèrent par leurs langages de programmation, la version d'OpenFlow supportée, les techniques utilisées comme le multi-threading et leurs performances [23]. Le tableau 1 résume les principales caractéristiques des contrôleurs SDN les plus connus. Nous présentons ci-dessous une liste non-exhaustive de ces contrôleurs SDN:

Contrôleurs	Langage	Version de protocole OpenFlow
<b>NOX</b>	C++	1.0, 1.1, 1.2, 1.3
<b>POX</b>	Python	1.0
<b>Ryu</b>	Python	1.0, 1.1, 1.3, 1.4, 1.5
<b>Floodlight</b>	Java	1.0, 1.1, 1.3, 1.4
<b>Openaylight</b>	Java	1.0, 1.3

Tableau 1: Caractéristiques des contrôleurs SDN [36]

**NOX** [24]: premier contrôleur disponible au public, écrit en langage C.

**POX** [25]: est un contrôleur open-source écrit en langage Python, POX est une amélioration de NOX.

**Maestro** [26]: utilise la technologie du multithreading pour effectuer le parallélisme au bas niveau, en gardant un modèle simple de programmation pour les développeurs d'applications. Il atteint ses performances à travers la distribution des tâches du cœur aux threads disponibles et la minimisation de la mémoire consommée. En plus, Maestro peut traiter les demandes de multiples flux par une seule tâche d'exécution, ce qui augmente sa résistance au facteur d'échelle.

**Beacon** [27]: développé en java par l'université de Stanford et est aussi basé sur les technologies de multithreads et est multiplateforme avec une architecture modulaire. Beacon permet au gestionnaire d'exécuter uniquement les services désirés.

**SNAC** [28]: utilise un langage de définition des règles flexibles et des interfaces faciles (web). Le contrôleur SNAC a été intégré pour configurer les équipements réseaux et contrôler leurs évènements.

**Floodlight** [29]: variante de Beacon se caractérise par sa simplicité et sa performance. Il a été testé avec les commutateurs OpenFlow physiques et virtuels. Il est aujourd'hui supporté et amélioré par une large communauté de développeurs, comprenant des industriels comme Intel, Cisco, HP, Big switch et IBM.

**McNettle** [30]: est un contrôleur SDN programmé par Nettle [31], qui est un DSL (Domain Specific Language) intégré dans Haskell et permet la programmation des réseaux en utilisant OpenFlow. McNettle opère dans des serveurs multicœurs qui partagent leurs mémoires pour atteindre une visibilité globale, une haute performance et une faible latence.

**RISE** [32]: conçu pour les expérimentations de réseaux à grande échelle, RISE est un contrôleur basé sur Trema [33] qui est un Framework programmé en Ruby et C. Trema fournit un environnement intégré de test et de débogage, incluant un ensemble d'outils pour le développement.

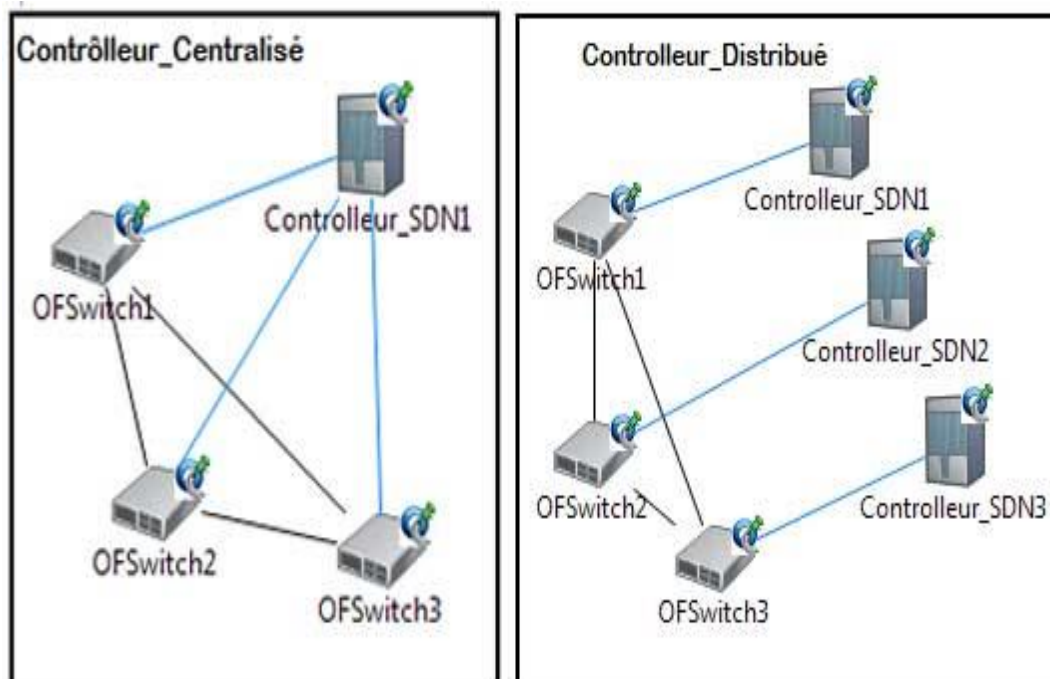


Figure 2:Contrôleurs de SDN



**Ryu:** Est un Framework développé en Python. Il permet la séparation entre les domaines sans utiliser de VLAN (Virtual Local Area Networks). Il supporte OpenFlow 1.5 [34].

**Opendaylight:** est un projet open source, implémenté en java et multi-plate-forme. Il supporte le Framework OSGi [35] pour la programmation locale du contrôleur et le REST [36] bidirectionnel. Les entreprises comme ContexTeam, IBM, NEC, Cisco, Plexxi, et Ericsson sont très actives dans ce projet [37].

La figure 2 présente le positionnement des contrôleurs SDN, au niveau réseau, soit centralisé [38] ou distribué [39].

Un contrôleur centralisé se base sur le concept de flux "Flow"; chaque flux est individuellement mis en place par le contrôleur, les entrées de flux permettant de réaliser une correspondance exacte dans les flux contenant une entrée par flux. Par contre, le contrôleur s'appuie sur le concept d'agrégation "Agregated", ce type des contrôleurs est bon pour un grand nombre de flux par exemple les backbones [40].

### c. Couche application

Cette couche regroupe les services, les plateformes d'orchestration et les applications business, telles que le routage intelligent, la sécurité et l'équilibrage de charge....

Elle offre aux concepteurs/développeurs la possibilité de créer des applications logicielles qui orientent le fonctionnement des composants du réseau [41].

## I.3 Interfaces de SDN

Ce sont des interfaces de communication entre les couches du modèle SDN pour configurer, opérer, ajouter des fonctionnalités ou déployer des services réseau. Le protocole le plus utilisé et déployé au niveau de l'interface Sud est OpenFlow. OpenFlow est régulièrement mis à jour par l'ONF, sa dernière version est 1.5.0 [42].

**Interface API Nord (Application Program Interface):** Sert à programmer les éléments de la transmission, en exploitant l'abstraction du réseau fourni par le plan de contrôle. Selon l'ONF, plusieurs niveaux d'abstraction et différents cas d'utilisation peuvent être caractérisés, ce qui signifie qu'il peut y avoir plusieurs interfaces Nord pour servir tous les cas d'utilisation [43].

**Interface API Est/Ouest:** est une interface de communication qui permet généralement la communication entre les contrôleurs dans une architecture multi-contrôleurs pour synchroniser les états du réseau [44].

Ces architectures sont très récentes et aucun standard de communication inter-contrôleur n'est actuellement disponible.

## I.4 Modes de communication

La communication inter-contrôleurs peut être assurée par trois modes à savoir le mode de notification, le mode de service et le full mode.

- **Mode de notification** [45]: utilisé pour avertir les autres contrôleurs qu'un changement est produit dans le réseau du contrôleur. Ce changement peut être un nouveau commutateur connecté ou déconnecté, un nouveau flux (Type de mode de flux) installé dans un commutateur ou un nouvel équipement découvert. Ce mode est utilisé pour la gestion et la vérification du réseau à travers les messages suivants:

**Features:** utilisé par le contrôleur pour demander l'identité, et les capacités d'un commutateur en envoyant une requête.

**Modify-State:** est envoyé pour gérer l'état dans les commutateurs, sa fonction primaire est d'ajouter, modifier ou effacer les entrées dans les tables OpenFlow.

**Read-state:** est utilisé par le contrôleur pour collecter les différentes informations du commutateur, comme sa configuration actuelle.

**Packet-Out:** est employé pour transférer les paquets reçus par les messages Packet\_in. Où, ils contiennent le paquet en entier ou l'id du buffer faisant référence au paquet stocké dans le commutateur. Ils doivent contenir aussi une liste d'actions à appliquer, s'il n'y a pas d'action définie le paquet sera détruit.

**Echo:** permet de vérifier la connectivité entre le commutateur et le contrôleur.

**Hello:** indique que la connexion est établie.

**Error:** est utilisé pour les problèmes de connexion.

- **Mode service** [46]: permet la synchronisation des informations sur les tables des flux, les tables de métriques, de bande passante, l'état des liens et les stratégies appliquées aux autres contrôleurs. Il est avantageux pour les applications de disposer d'une vue globale sur le réseau et une certaine qualité de transmission. Ce mode sert à améliorer la qualité de service, la sécurité, le routage, etc. Ce mode utilise les messages suivants:

**Packet-In:** permet au commutateur de déplacer le contrôle du paquet au contrôleur.

**Flow-removed:** notifie le contrôleur de la suppression d'une entrée dans la table des flux.

**Port-Status:** informe le contrôleur d'un changement sur un port du commutateur.

-**Full Mode** [47]: qui combine les deux modes mentionnés ci-dessus, et fait appel à d'autres messages tels que 'Packet\_in', 'Packet out' et 'Port\_status'.

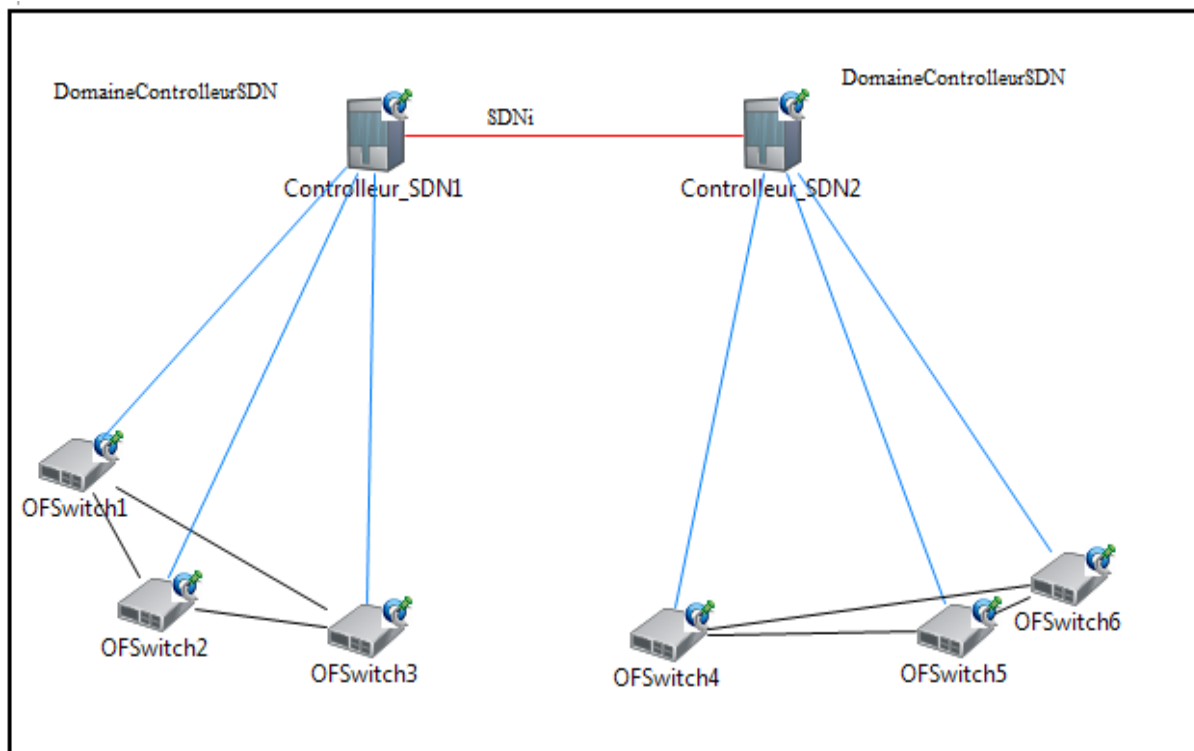


Figure 3: Structure des domaines SDN

IETF développe un protocole Est/Ouest appelé SDNi [48] pour réaliser une interconnexion entre les contrôleurs SDN. Dans ce projet, les chercheurs décrivent une interface pour échanger les informations entre plusieurs domaines supportant le SDN, afin de synchroniser la base de données réseau et coordonner les décisions entre les contrôleurs (figure 3).

Une proposition d'implémentation du SDNi est fournie par la société TATA (TCS) [49], en proposant le protocole BGP (Border Gateway Protocol) comme candidat pour implémenter SDNi.

L'existence des multiples domaines permet de créer une exigence pour chaque contrôleur pour communiquer avec chaque autre domaine par l'intermédiaire du protocole normalisé de l'échange des informations de routage qui est SDNi.

### I.5 Protocole OpenFlow

Le projet OpenFlow, initié dès 2007 par l'université de Stanford, est aujourd'hui supporté par la fondation ONF, créée en 2011. Il vise à découpler, dans un équipement réseau, la partie plan de données de la partie plan de contrôle [50]. OpenFlow gère efficacement les flux et détermine le mode de transfert des paquets entre chaque paire source et cible, il ne fournit pas les fonctions de configuration et de gestion nécessaires pour allouer des ports ou affecter des adresses IP.

OpenFlow repose sur un jeu d'instructions qui permettent de programmer le plan de contrôle d'un équipement réseau. Il définit l'interface de communication entre le contrôleur et le commutateur OpenFlow, il permet au contrôleur d'indiquer au commutateur comment traiter les paquets de données entrants/sortants.

Le commutateur OpenFlow se compose des éléments suivants, comme il est indiqué dans la figure 4.

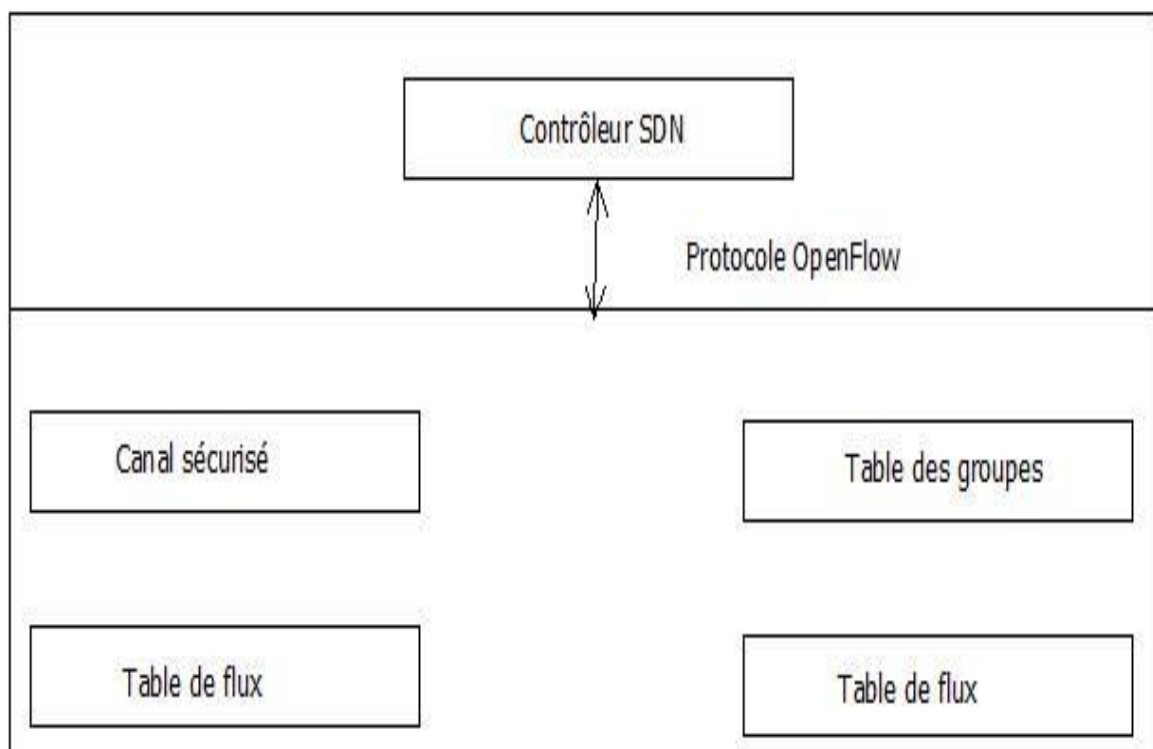


Figure 4: Protocole OpenFlow

- Plusieurs tables des flux pour la correspondance des entrées.
- Une table de groupe pour l'acheminement des paquets.
- Un canal OpenFlow est connecté à un contrôleur externe.

OpenFlow dans sa version 1.4 est publié par l'ONF [51] comme étant un protocole de communication, qui permet d'accéder directement au plan de données des périphériques réseau, tels que les routeurs et les commutateurs, à la fois physiques et virtuels. Autrement dit, il autorise le contrôle du comportement du plan de données d'une façon centralisée, dynamique et programmable.

### **1.5.1 Etat de l'art du protocole OpenFlow**

La chronologie de développement du protocole OpenFlow est la suivante :

**2006:** le doctorant Martin Casado et son équipe à Stanford proposent une architecture de sécurité de la table des flux, pour définir un contrôle centralisé de la sécurité.

**Avril 2008:** OpenFlow est en format papier dans le cadre des activités d'ACM SIGCOMM CCR [52]

**Juin 2009:** Stanford a publié la première version d'OpenFlow V1.0.0. [53]

**Février 2011:** OpenFlow 1.1 est proposée des changements significatifs par rapport à la version 1.0, notamment le pipeline des tables de flux et la table de groupe. [54]

**Décembre 2011:** OpenFlow v 1.2 a été proposé avec un support étendu des protocoles, en particulier IPv6 (Internet Protocol version 6), ICMPv6 (Internet Control Message Protocol version 6) [55].

**Juin 2012:** OpenFlow v1.3 est introduit une nouvelle fonctionnalité pour l'opération, l'administration et la gestion (OAM, Operation, Administration and Management) [56].

Octobre 2013: ONF a développé la version 1.4 d'OpenFlow, aussi elle a amélioré le support d'OXM [57].

**Décembre 2014:** ONF a évolué la version 1.5 d'OpenFlow avec l'amélioration de la notion des tables de sortie [58].

### **1.5.2 Fonctions OpenFlow**

Les instructions OpenFlow [59] sont transmises d'un contrôleur vers un commutateur selon le concept de « flux ». Chaque flux individuel contient des champs de correspondance de paquets, une priorité des flux, divers compteurs, des instructions de traitement de paquets, des délais d'écoulement. L'ensemble de ces informations sont organisées en tables. Un paquet entrant peut-être traité par des flux dans plusieurs tables "pipelined" avant de quitter le port de sortie.

Pour cela, le contrôleur SDN maintient des canaux de communication du protocole OpenFlow vers les commutateurs. Il expose une API Northbound aux applications OpenFlow, et permet aux applications OpenFlow de lire l'état du réseau et de l'ordonner à la manière d'effectuer diverses tâches.

Les commutateurs OpenFlow utilisent une mémoire de type TCAM (Ternary Content Addressable Memory) qui permet une recherche rapide, pour filtrer les paquets, quand ils entrent sur le réseau, et par conséquent, ils peuvent agir en tant que pare-feu simples à la périphérie du réseau. Ils sont la première interface de communication standard définie entre les couches d'une architecture SDN.

Le mécanisme de transmission utilisé par le protocole OpenFlow est illustré dans la figure 1.5, quand un switch reçoit un paquet, il compare son en-tête avec les règles de la table des flux. Si le masque configuré dans le champ d'en-tête d'une règle correspond à l'en-tête du paquet, la règle avec la plus haute priorité est sélectionnée, puis le switch actualise son compteur pour cette règle. Finalement, le switch effectue les actions spécifiées par la règle sur le paquet (Ex: le switch envoie le paquet vers un port de sortie). Sinon, le switch notifie son contrôleur concernant ce paquet abrité dans la mémoire tampon. Il encapsule le paquet ou le 1er octet du paquet utilisant un message Packet\_in et l'envoie au contrôleur; il est très commun d'encapsuler l'en-tête et le nombre d'octets du paquet. Le contrôleur reçoit ce message et identifie l'action appropriée à ce paquet, il installe une ou plusieurs entrées dans le switch.

Par la suite, les paquets tamponnés sont transmis selon les règles; en insérant l'ID du tampon dans le flux ou explicitement dans les messages Packet-out. Souvent, le contrôleur installe le chemin complet pour le paquet dans le réseau en modifiant les tables de flux de l'ensemble des switches constituant le chemin [60].

La correspondance des paquets commence par la première entrée, elle peut continuer dans le cas où plusieurs tables de flux existent. Les entrées font la correspondance selon la priorité. Si une correspondance est trouvée, les instructions associées à cette entrée sont exécutées.

S'il n'y a pas de correspondance dans la table des flux: le paquet est soit commuté vers le contrôleur via le canal sécurisé OpenFlow; ou sera abandonné; ou va continuer vers la table des flux qui suit (traitement de Pipeline [61]). Le traitement s'arrête quand l'ensemble des instructions associées à une entrée ne spécifie plus de table, le paquet est modifié, il s'achemine vers la destination.

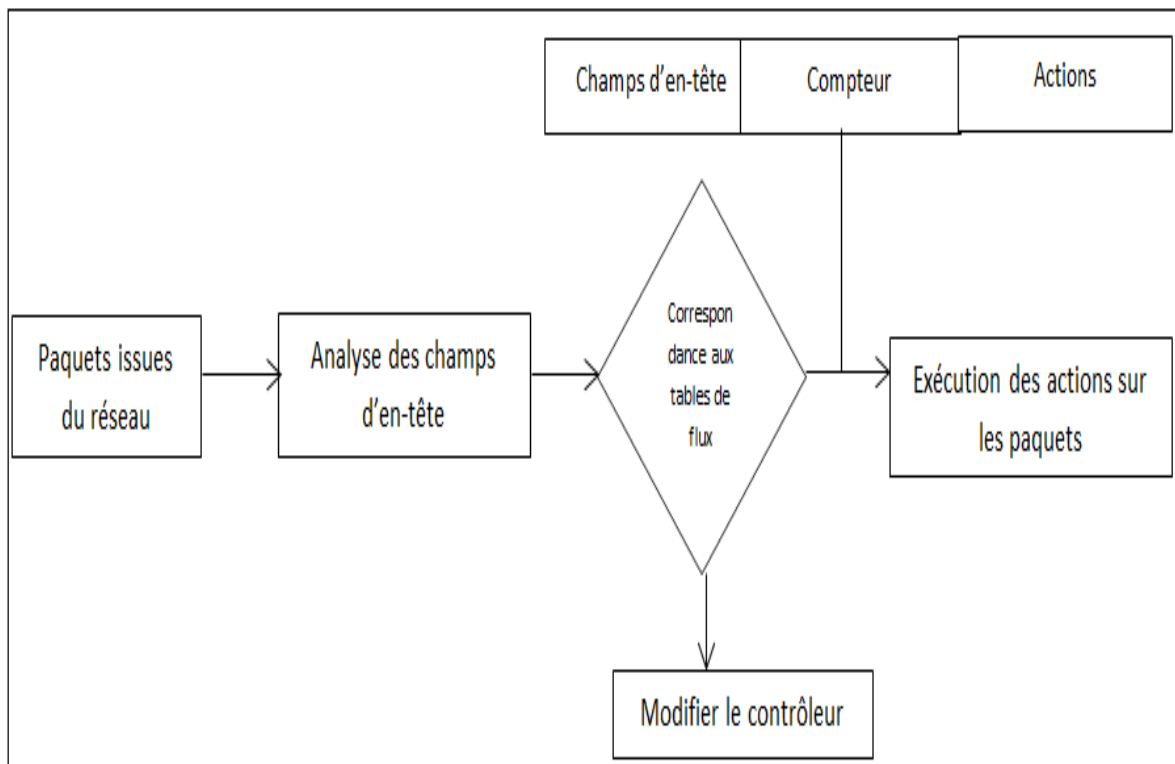


Figure 5: Processus de transmission des paquets avec OpenFlow 1.0 au sein d'un commutateur

A la réception d'un paquet, le commutateur OpenFlow réalise les fonctions illustrées dans la figure 5. Il commence par faire une recherche dans la première table des flux, et, en se basant sur le traitement par pipeline, il peut aussi effectuer une recherche dans les autres tables des flux.

### 1.5.3 Ports OpenFlow

Les commutateurs OpenFlow se connectent logiquement entre eux via leurs ports OpenFlow. Les paquets OpenFlow sont reçus sur un port d'entrée (Ingress port), puis ils sont traités par le pipeline OpenFlow, qui peut les transmettre à un port de sortie (Output port). Le port d'entrée de paquet est une propriété de la trame dans le pipeline OpenFlow, et représente le port OpenFlow sur lequel le paquet a été reçu par le commutateur OpenFlow. Le port d'entrée peut être utilisé lors de la correspondance des paquets. Le pipeline OpenFlow peut décider d'envoyer le paquet sur un port de sortie, qui définit le retour du paquet sur le réseau.

Une configuration d'un commutateur à l'aide de protocole OpenFlow, peut ajouter, supprimer des ports à tout moment. Toute modification de ces ports doit être communiquée à l'automate OpenFlow. Le contrôleur peut également modifier la configuration des ports. L'ajout, la modification ou la suppression des ports ne modifie jamais le contenu des tables de flux, en particulier les entrées de flux référençant ces ports ne sont ni modifiées ni supprimées (les entrées de flux peuvent indiquer des ports via la correspondance, ou les actions). Les paquets transférés vers des ports inexistants sont simplement abandonnés. De même. Si un port est supprimé et que son numéro de port est ultérieurement réutilisé pour un port physique ou logique différent, toutes les entrées de flux restantes ou les entrées de groupe faisant toujours référence à ce numéro de port peuvent être effectivement réciblées. Par conséquent, lorsqu'un port est supprimé, il appartient au contrôleur de nettoyer toutes les entrées de flux ou les entrées de groupe désignant ce port si nécessaire.

#### a. Types de Ports OpenFlow

Un commutateur OpenFlow doit prendre en charge quatre types des ports OpenFlow à savoir les ports physiques, les ports logiques et les ports réservés [62].

**Ports standard:** définis en tant que ports physiques, ports logiques et ports réservés localement [63].

Les ports standard peuvent être utilisés comme ports d'entrées et de sortie, ils peuvent être utilisés en groupes et possèdent des compteurs de ports et ont un état et une configuration.

**Ports physiques:** définis par le commutateur qui correspondent à une interface matérielle du commutateur [64]. Dans certains déploiements, le commutateur OpenFlow peut être virtualisé sur le matériel du commutateur. Dans ces cas, un port physique OpenFlow peut représenter une tranche virtuelle de l'interface matérielle correspondante du commutateur.

**Ports logiques:** définis par le commutateur qui ne correspondent pas directement à une interface matérielle du commutateur. Les ports logiques sont des abstractions de niveau supérieur qui peuvent être définies dans le commutateur utilisant des méthodes d'OpenFlow (groupes d'agrégation de liens, tunnels, interfaces de bouclage, par exemple). Ils peuvent inclure une encapsulation de paquet et mapper vers divers ports physiques [65].

La seule différence entre les ports physiques et les ports logiques c'est qu'un paquet associé à un port logique peut être associé à un champ de pipeline supplémentaire appelé ID de tunnel et lorsqu'un paquet reçu sur un port logique est envoyé au contrôleur, son port logique et son port physique sous-jacent sont signalés au contrôleur.

**Ports réservés** [66]: spécifient les actions de transfert génériques, telles que l'envoi vers le contrôleur, l'inondation, le transfert ou le traitement de commutateur « normal ». Un commutateur n'est pas obligé de prendre en charge tous les ports réservés, mais uniquement les ports all.

#### 1.5.4 Paquets OpenFlow

La figure 6 présente un paquet OpenFlow, chaque message des trames OpenFlow [67] commence par la même structure d'en-tête. Cette structure est utilisée dans toutes les versions d'OpenFlow.

Tout d'abord, le champ version indique la version d'OpenFlow à laquelle ce message appartient. Deuxièmement, le champ longueur indique la fin du message dans le flux d'octets à partir du premier octet de l'en-tête. Troisièmement, le xid, ou l'identifiant de transaction est une valeur unique utilisée pour faire correspondre les demandes aux réponses. Le champ qui indique quel type de message est présent et comment interpréter la charge utile dépend de la version, et pour le champ «Payload ou Données utiles» est codé sur N bits. Il contient les données chiffrées.

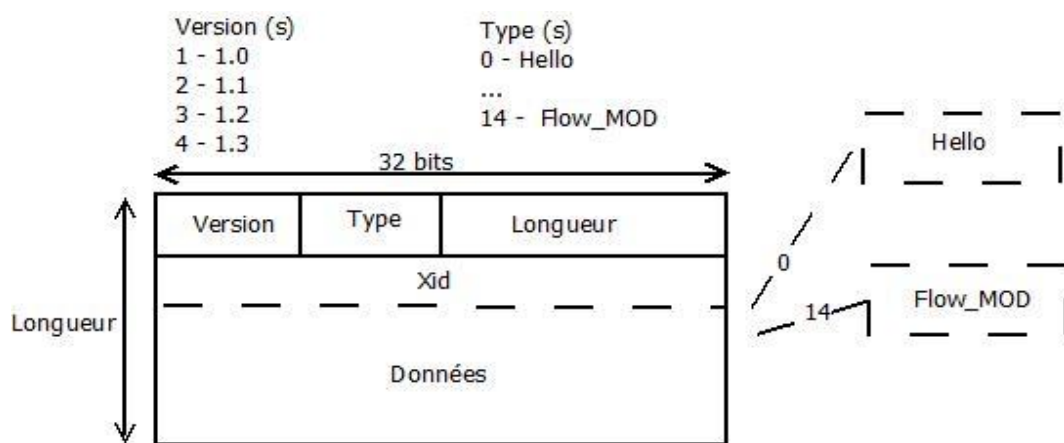


Figure 6: Trame d'OpenFlow

#### 1.5.5 Traitement de Pipeline

Chaque commutateur contient plusieurs tables de flux et chaque table contient plusieurs entrées. Le traitement pipeline OpenFlow décrit et définit comment les paquets interagissent avec les tables des flux.

La figure 7 présente les tables des flux d'un commutateur OpenFlow [68] qui sont séquentiellement énumérées, commençant par 0. Le traitement par Pipeline commence toujours avec la première table des Flux. Le commutateur fait la correspondance de paquet selon les entrées de la table des flux 0. Il y a d'autres tables des flux qui peuvent être utilisées selon le résultat obtenu, lors de la première vérification de correspondance faite dans la première table; si le paquet correspond à une entrée dans la table, l'instruction sera exécutée.

Les instructions dans les tables de flux peuvent explicitement diriger le paquet vers une autre table utilisant l'instruction Goto qui indique la prochaine table des flux dans le traitement pipeline.

Une entrée x dans une table des flux n peut enchaîner le traitement du paquet en l'envoyant vers une autre table des flux, si seulement cette dernière dispose d'un numéro n supérieur à celui de la table où l'entrée x se trouve, la dernière table du pipeline ne peut inclure l'instruction Goto. Si l'entrée dans la table ne redirige pas le paquet à une autre table des flux, le traitement pipeline s'arrête. Dans ce cas, le paquet est traité avec l'action associée.

Lorsqu'un paquet est présenté à une table pour être mis en correspondance, l'entrée est constituée des éléments suivants: (Paquet, l'identité du port d'entrée, la valeur de métadonnées affiliée, l'action associée). Pour la table 0, la valeur des métadonnées est vide et l'ensemble d'actions est nul. Le traitement se déroule comme suit:

- Rechercher l'entrée des flux correspondant à la plus prioritaire, s'il n'y a pas d'entrée de la table manquante, le paquet est supprimé, s'il y a une ressemblance sur une entrée de la table manquante, alors cette entrée spécifie l'une des trois actions suivantes:

- Envoyer le paquet au contrôleur: cette action permettra au contrôleur de définir un nouveau flux pour ce paquet et pour d'autres similaires, ou décidera alors de laisser tomber le paquet.

- Diriger le paquet vers une autre table des flux plus loin dans le pipeline [69].

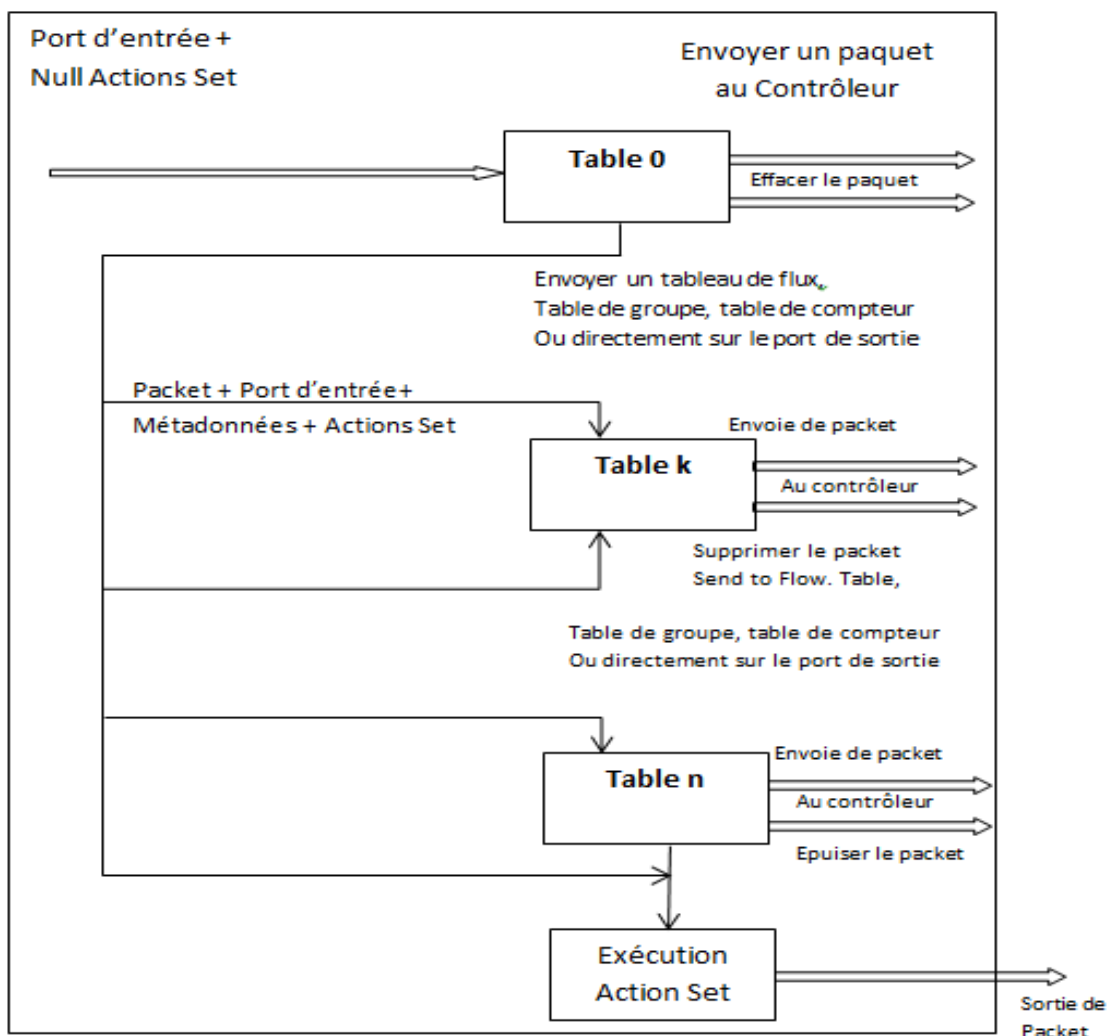


Figure 7: Flux des paquets dans un commutateur OpenFlow



S'il existe une correspondance sur une ou plusieurs entrées, elle est définie comme ayant l'entrée la plus prioritaire. Les actions suivantes peuvent ensuite être effectuées:

- Mettre à jour tous les compteurs associés à cette entrée.
- Exécuter les instructions adjointes à cette entrée. Elles peuvent inclure la mise à jour de l'action et de l'exécution.
- Le paquet est ensuite transmis à une table des flux plus loin dans le pipeline, à la table de groupe ou à la table de compteur, ou il peut être dirigé vers un port de sortie.

Pour la table finale, dans le pipeline, le transfert vers une autre table des flux n'est pas optionnel.

Si le paquet est dirigé vers un port de sortie, l'ensemble des actions accumulées est exécuté, puis le paquet est mis en file d'attente pour la sortie.

### I.5.6 Tableaux de flux

Chaque tableau de flux dans un commutateur contient un ensemble des entrées (Tableau 2).

Les principaux éléments d'une entrée dans un tableau de flux sont:

- **En-tête:** est la partie sur laquelle le contrôleur se base pour faire la correspondance des paquets, cela consiste à vérifier le port d'entrée ou l'entête du paquet afin d'y appliquer une action X.
- **Compteurs:** sont utilisés pour collecter les statistiques concernant les paquets traités par ce groupe.
- **Instructions (Actions):** est l'opération ou l'action à appliquer aux paquets telle que:
  - Transférer les paquets à un ou plusieurs ports;
  - encapsulation et transmission au contrôleur;
  - envoyer en pipeline le traitement normal ;
  - modification du champ;

En-tête	Compteurs	Actions
---------	-----------	---------

Tableau 2: Tableau de flux d'un commutateur OpenFlow

### I.5.7 Trame de SDN

Le tableau 3 montre les champs d'en-tête d'une trame SDN [70].

1 Bit	48 Bits	48 Bits	6 Bits	12 Bits	32 Bits	32 Bits	8 Bits	16 Bits	16 Bits
Ingress port	@MAC source Ether	@MAC Destination Ether	Ether Type	VLAN Id	IP Source	IP Destination	IP Proto	TCP UDP source port	TCP UDP destination port

Tableau 3: Champs d'en-tête de la trame SDN

**Ingress Port:** est l'identifiant du port sur le commutateur où le paquet est arrivé, il peut être un port physique ou un port virtuel défini par le commutateur.

**L'adresse MAC source:** caractérise l'interface physique de la machine émettrice.

**L'adresse MAC destination:** est déterminant physique de la machine réceptrice.

**Ether Type:** type de trame Ethernet, ou Token Ring, ou Token bus ou autre.

**VLAN id:** tous les paquets d'Ethernet de type 0x8100

**IP Source:** est l'adresse IP de la machine émettrice.

**IP Destination:** est l'adresse IP de la machine réceptrice.

**Protocole IP:** ce champ indique la nature des données transportées par ce datagramme IP. Il y a trois protocoles qui sont principalement utilisés dans l'encapsulation au-dessus du protocole IP : ICMP (Internet Control Message Protocol), "Code 1", TCP (Transmission Control Protocol) "Code 6" et UDP (User Datagram Protocol) "Code 17".

**TCP/UDP Port Source:** spécifie le port source utilisé.

**TCP/UDP Port Destination:** précise le port de destination utilisé.

### 1.5.8 Versions d'OpenFlow

La figure 8 présente les différentes spécifications d'OpenFlow, en se focalisant sur les opérations supportées, les changements entre les versions et les fonctionnalités des différentes versions.

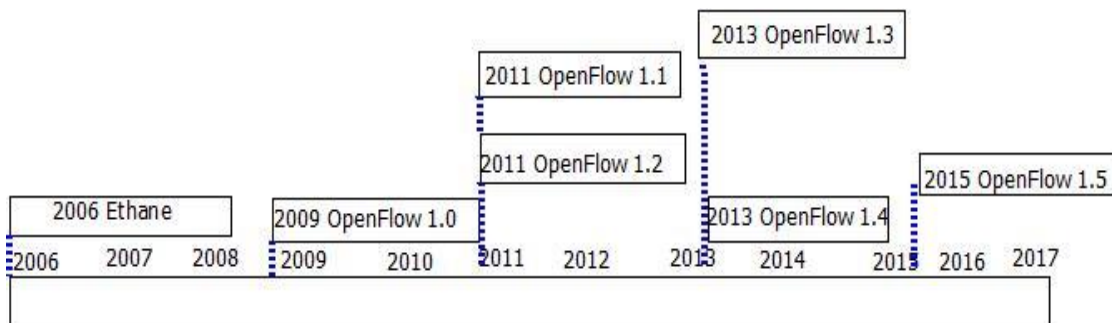


Figure 8: Versions d'OpenFlow

#### a. OpenFlow v 1.0

La spécification du protocole OpenFlow 1.0 est apparue en décembre 2009. Elle est aujourd'hui la version la plus déployée dans les switches industriels [71]. Les paquets Ethernet et IP sont identifiés, selon l'adresse source et de destination. En plus, les champs Ethernet-type et VLAN sont utilisés pour l'Ethernet, les champs DS (Differentiated Services), ECN (Explicit Congestion Notification) et le champ protocole sont utilisés pour l'IP. En outre, l'identification des paquets peut aussi dépendre du port source et destination de TCP ou UDP.

L'algorithme d'identification des paquets commence par une comparaison des champs Ethernet et VLAN, et continue si nécessaire avec le champ de l'en-tête d'IP. Si le type d'IP correspond au TCP ou UDP, les champs de l'en-tête de la couche de transport seront pris en compte. Plusieurs actions sont déployées par flux, la plus importante étant l'action de transmission, qui transmet le paquet à une interface spécifique ou le diffuse vers tous les ports. Le contrôleur peut demander au switch d'encapsuler tous les paquets d'un flux et de les envoyer au contrôleur. Ces actions permettent le contrôle d'accès au réseau avec OpenFlow.

Une autre action autorise la modification des champs d'en-tête du paquet, par exemple la modification des tags VLAN, de la source IP, des adresses de destination, etc. La version 1.0 du protocole OpenFlow fournit aussi un service de qualité basique supportant l'utilisation des files d'attente avec l'option de taux minimal des files d'attente (disponible uniquement dans cette version). Un switch OpenFlow peut gérer une ou plusieurs files d'attente, et chaque file est rattachée à un port. Le contrôleur OpenFlow peut s'informer sur les files d'attente disponibles au sein du switch. L'action 'Enqueue' permet l'ajout des paquets aux files d'attente, ces paquets seront traités selon les propriétés des files d'attente. Les contrôleurs OpenFlow peuvent seulement s'informer sur les files d'attente et sur leurs propriétés. Mais avec la version 1.2 du protocole OpenFlow, le protocole OF-CONFIG permet la modification des propriétés des files d'attente.

### b. OpenFlow v 1.1.

La version 1.1 d'OpenFlow est disponible depuis février 2011 [72]. Elle propose des changements significatifs par rapport à la version 1.0, notamment le pipeline des tables de flux multiples et la table de groupe. Dans la version 1.0, une liste d'actions est appliquée aux paquets de flux après leur identification, ces actions sont spécifiées directement dans les entrées de la table de flux (tableau 2). Avec la version 1.1, l'ensemble des actions sont cumulées lors de l'exécution du pipeline (figure 9), et sont appliquées au paquet à la fin du pipeline.

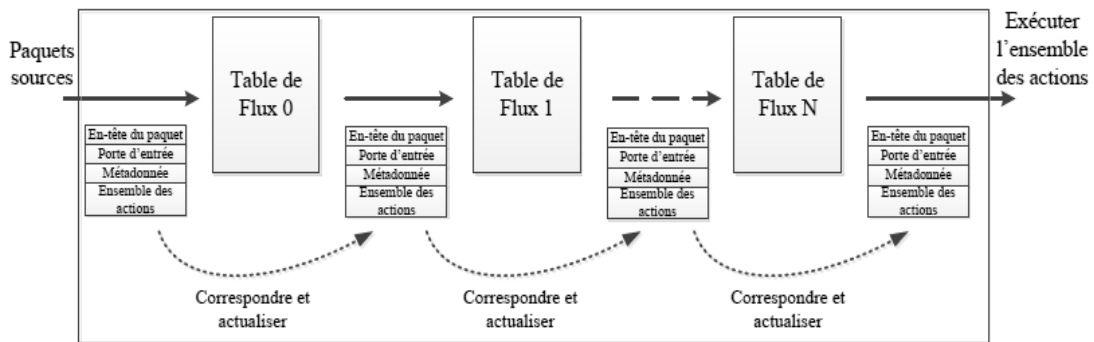


Figure 9: Pipeline d'OpenFlow 1.1

De nouvelles informations ont été ajoutées pour l'exécution des pipelines comme le champ des Métadonnées (Metadata), les instructions et la liste des actions (Actions sets). Le champ des Métadonnées peut collecter les Métadonnées d'un paquet durant la phase d'identification et les transmettre d'une étape de pipeline à la suivante. Les entrées de la table de flux contiennent les instructions au lieu des actions (tableau 4).

Instruction	Argument	Sémantique
Apply-Actions	Action(s)	Appliquer les actions immédiatement sans les ajouter à l'ensemble des actions
Write-Actions	Action(s)	Configurer une action spécifique dans le champ des actions
Clear-Actions	-	Supprimer les actions
Write-Metadata	Métadonnées	Actualiser le champ de Métadonnée
Goto-Table	ID de la table	Faire correspondre à la table suivante

Tableau 4: Liste des instructions pour la version 1.1 d'OpenFlow

L'instruction 'Apply-Action' applique directement l'action sur le paquet sans attendre que le pipeline se termine. Ces actions ne seront pas ajoutées à la liste des actions. L'instruction 'Write-Actions' ajoute des actions dans la liste des actions. De son côté, l'instruction 'Clear-Actions' efface la liste des actions. Tandis que 'Write-metadata' actualise le champ des métadonnées, et finalement, 'Goto' se réfère à l'ID de la table de flux suivante où l'identification prendra place.

Pour éviter une boucle infinie, seule la table avec l'ID de la table actuelle est permise dans le champ 'Goto'. S'il n'y a pas d'instruction 'Goto', le pipeline se termine et les actions accumulées sont appliquées au paquet [73].

Le deuxième changement apporté par cette version est l'ajout d'une nouvelle table appelée table de groupe. La table de groupe supporte les fonctions complexes de transmission, qui peuvent s'appliquer à un groupe de flux. Cela consiste en des entrées de la table de groupe comme présentée dans les tableaux 5 et 6. Une entrée de la table de groupe peut être appliquée si l'entrée de la table de flux utilise une instruction appropriée qui se réfère à son identifiant de groupe (group identifier).

En particulier, les entrées de la table de flux multiples peuvent pointer sur un identificateur de groupe (tableau 6) pour que l'entrée de la table de groupe s'effectue sur les flux multiples [74].

L'entrée de la table de groupe contient le type de groupe, un champ compteur et un champ pour la liste des actions. Les compteurs sont utilisés pour collecter les statistiques concernant les paquets traités par ce groupe, et la liste des actions stocke l'ensemble des actions qui seront exécutées selon le type du groupe (all, select, indirect, fast failover, ...). Comme fonctionnalité optionnelle, OpenFlow 1.1 effectue l'identification des labels MPLS, les classes de trafic et les actions spécifiques à MPLS (MultiProtocol Label Switching) comme l'insertion ou la suppression des labels MPLS. En général, le nombre d'actions supportées par la version 1.1 est supérieur à celui de la version 1.0. Par exemple, le champ TTL ou durée de vie (Time To Live) dans l'en-tête IP peut décrémenter, ce qui n'est pas supporté par la version précédente. OpenFlow v 1.1 fournit des champs de statistiques additionnels. Par conséquent, les contrôleurs peuvent collecter les statistiques de la table et les entrées de groupe, ainsi que les listes d'actions [75].

Identifiant du groupe	Type du groupe	Compteurs	Liste des actions
-----------------------	----------------	-----------	-------------------

Tableau 5: Entrées de la table du groupe pour la version 1.1 ou plus d'OpenFlow

Identificateur de mesure	Meter band	Compteurs
--------------------------	------------	-----------

Tableau 6: Entrées de la table de mesure OpenFlow 1.3

### c. OpenFlow v 1.2

OpenFlow v 1.2 a été proposé en décembre 2011 [76], il est livré avec un support étendu de protocoles, en particulier IPv6. Cette version peut identifier les paquets IPv6 selon les adresses source et de destination, le label de flux, la classe du trafic et le champ d'ICMPv6. Les industriels font des nouvelles possibilités pour étendre OpenFlow afin de supporter d'autres capacités d'identification. Le support du protocole IPv6 est dû au nouveau modèle de correspondance appelé OXM (OpenFlow eXtensible Match). L'OXM utilise la structure TLV (Type-Length-Value) pour remplacer la structure de correspondance statique avec une nouvelle très flexible. Avec la version 1.2, un switch peut simultanément être connecté et administré par un ensemble de contrôleurs. Le switch initialise la connexion, et les contrôleurs acceptent la tentative de connexion. Un contrôleur est défini comme maître qui programme le switch, l'autre contrôleur est esclave et peut prendre la fonction du maître, si cette dernière tombe en panne [78].

#### d. OpenFlow v 1.3

L'OpenFlow version 1.3 est apparue en juin 2012 [79], introduit une nouvelle fonctionnalité OAM (Operation, Administration and Management) pour l'opération, l'administration et la gestion des paquets. Pour cette version, la table de mesure a été rajoutée dans l'architecture des switches OpenFlow. Le tableau 1.6 présente la structure des entrées de la table de mesure.

La mesure est directement attachée à une entrée de la table de flux par son identificateur de mesure, qui fournit le taux de paquets assignés à l'entrée. La 'Meter band' est utilisée pour contrôler le nombre de paquets en éliminant ceux qui excèdent une certaine limite. Ce qui permet l'implémentation des framework de QoS simples ou complexes.

Le support des contrôleurs multiples s'est étendu, dans la version précédente (1.2), seule la tolérance aux pannes est ciblée par le schéma du maître/esclave. Avec la version 1.3, des connexions supplémentaires peuvent être utilisées entre le switch et le contrôleur maître pour équilibrer la charge entre les lignes de connexion. En plus, le filtrage des événements par connexion est introduit, cela permet aux contrôleurs de capter uniquement les types de messages qui les intéressent, par exemple, un contrôleur responsable de la collecte des statistiques réseaux peut être considéré comme un contrôleur auxiliaire et enregistrer uniquement les statistiques des événements générés par les switches. OpenFlow 1.3 supporte aussi les en-têtes extensibles d'IPv6, qui incluent l'identification des en-têtes ESP (Encrypted Security Payload), ainsi que l'authentification et le saut après saut (hop-by-hop) d'IPv6 [80].

#### e. OpenFlow 1.4

L'ONF améliore le support d'OXM dans la version 1.4 d'OpenFlow en octobre 2013 [81]. La structure TLV, pour les ports, les tables et les files d'attente, a été rajoutée au protocole, et la configuration des ports optiques est devenue possible. En plus, les contrôleurs peuvent envoyer les messages de contrôle sous un seul message aux switches. Des améliorations mineures ont été aussi incluses dans cette version comme les tables de groupe, le contrôle de fonctionnalités et la suppression des flux dans le cas des tables pleines.

#### f. OpenFlow 1.5

La version 1.5 d'OpenFlow en décembre 2014 [82], est apparue avec beaucoup d'améliorations comme la notion de tables de sortie, en plus de 18 changements opérés. Avec la version 1.4, tout le traitement se fait selon la table d'entrées, cependant dans la version 1.5, le traitement se fait selon les tables d'entrées et de sorties (Figure 10).

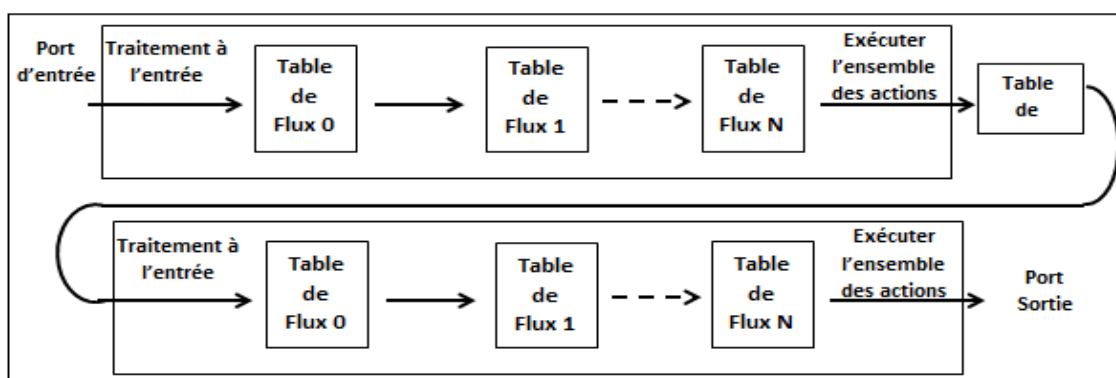


Figure 10: Pipeline d'OpenFlow 1.5

### **I.5.9 Sécurité dans SDN**

Grâce à l'architecture centralisée de SDN, le contrôleur peut détecter les attaques rapidement et limiter leurs effets. Plusieurs chercheurs ont présenté des mécanismes pour détecter les attaques par déni de service DoS (Denial of Service) et DDos (Distributed DoS). Par exemple, dans [83] les auteurs proposent d'isoler le périphérique réseau des attaques intra-LAN à l'aide d'OpenFlow. Dans l'architecture suggérée, le composant IDS est chargé de détecter les attaques en reconnaissant les équipements non sécurisés, et d'informer le contrôleur. Les résultats ont montré que cette architecture est assez efficace sur un réseau LAN réel. Un nouveau plan de sécurité a été proposé dans [84]. Le rôle de ce plan est d'inspecter tous les échanges de flux entre les switches et le contrôleur pour prévenir les attaques de type 'IP spoofing'. Cela a permis de bloquer rapidement les attaques au niveau du contrôleur et des switches et de tracer leurs sources.

### ***Conclusion***

Ce chapitre a présenté la valeur de SDN pour réduire la complexité réseau à travers une vue centralisée du réseau global et sur son état, car SDN permet de séparer les fonctions de plan de contrôle (Contrôleur) et le plan de données (Commutateur), pour pouvoir optimiser chacun d'eux plus facilement en utilisant le protocole OpenFlow pour le transfert des tables de flux au niveau du commutateur, ce qui augmente l'intelligence du réseau avec la QoS.

Le chapitre suivant montre que quel que soit la nature de la topologie SDN reste toujours plus performant par rapport à la meilleur architecture Ethernet.

## **Chapitre II : Evaluation des performances des principales topologies de SDN et Ethernet**

## Introduction

Un réseau doit fournir une capacité suffisante pour servir tous ses clients. Il doit également assurer un traitement plus rapide et plus adapté à la puissance des noeuds. Face à ces problèmes, les opérateurs doivent assurer le développement des réseaux tout en garantissant une certaine qualité de service adaptée aux services offerts. De fait, ils doivent trouver le bon compromis entre, d'une part cette QoS, et d'autre part la capacité limitée et le coût de déploiement d'un tel réseau (coût énergétique, coût de développement, coût de maintenance, ...), aussi pour le rendre programmable ce qui facilite l'optimisation des ressources avec une adaptation convenable avec les utilisateurs.

De nos jours, les réseaux programmables sont de plus utilisés. SDN appartient à la famille des réseaux programmables et promets des performances particulières.

Ce chapitre présente une solution pour l'adaptation des besoins des utilisateurs et mieux optimiser les ressources à travers l'évaluation des performances d'une architecture réseau utilisant l'approche SDN et une autre à base de l'Ethernet. Il aborde aussi une comparaison des différentes topologies SDN et montre leurs performances en cas de forte demande pour les différents topologies SDN: arborescence, anneau, et centralisé.

En effet, les réseaux SDN offrent une meilleure qualité de service par rapport à Ethernet.

## I. Comparaison entre SDN et les réseaux Ethernet

Les figures 11 et 12 décrivent les différents plans, qui sont utilisés par les réseaux Ethernet, pour contrôler le routage, gérer la configuration, et la transmission de données, mais le problème c'est que tous ces plans (plan d'Application, plan de contrôle, plan de données) des réseaux se positionnent au niveau de même équipement qui est le routeur, aussi les réseaux Ethernet s'appuient sur un système de contrôle distribué, ce qui rend le réseau plus complexe et n'est pas flexible. Cependant SDN permet une gestion dynamique et flexible du réseau via la séparation des plans de contrôle et de données par l'utilisation d'un canal OpenFlow.

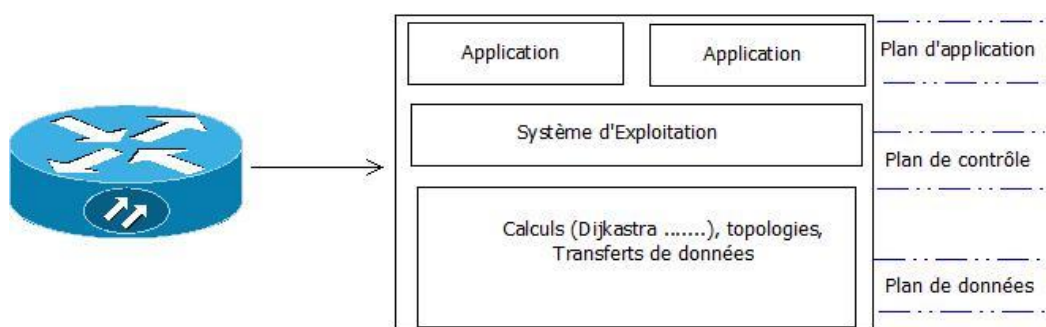


Figure 11:Plans des routeurs

Le contrôleur maintient une vue globale du réseau, ce qui permet d'une part un contrôle centralisé et d'autre part de configurer, d'administrer, de sécuriser et d'optimiser les réseaux rapidement grâce à des applications SDN dynamiques et automatisés.

En effet, les règles régissant la gestion des paquets dans un réseau SDN sont élaborées par l'administrateur au niveau du contrôleur qui les envoie aux commutateurs OpenFlow pour définir le comportement du réseau vis-à-vis des paquets entrants. Ainsi l'affectation des priorités, le blocage de certains types de paquets deviennent une tâche facile [85].



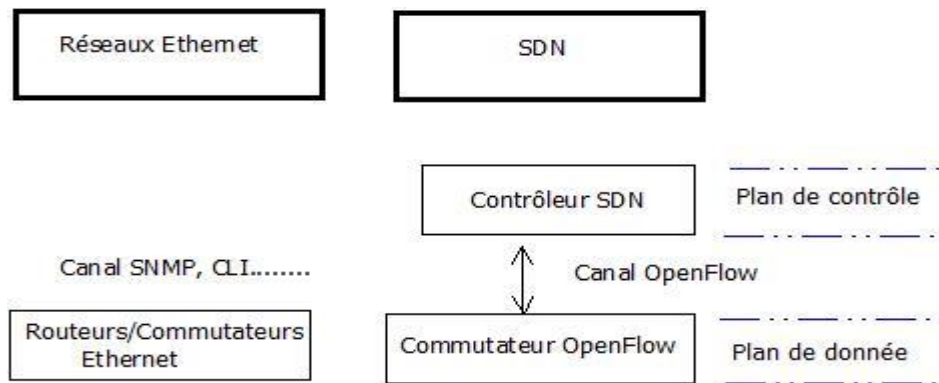


Figure 12: Comparaison entre SDN et les réseaux Ethernet

Le plan de données des commutateurs Ethernet présente un tableau d'acheminement selon laquelle les paquets entrants vers un commutateur Ethernet seront transférés. Les tables de transfert (tableau de routage) sont constituées des entrées, qui indiquent vers quel port de sortie les trames Ethernet reçues doivent être envoyées. Le remplissage de la table de routage avec ces entrées est faite au niveau du plan de contrôle. Le contrôle de la gestion de la topologie s'accompagne souvent d'une charge de calcul significative.

Le remplissage de la table de routage et le transfert de données sont gérés d'une façon autonome. Chaque équipement collecte les informations sur tout le réseau, selon le protocole de routage utilisé afin d'avoir une vue permettant la redirection des messages reçus. Ce qui génère la redondance de données et accroître le trafic. Lorsqu'un routeur reçoit un paquet, il effectue selon sa table de routage l'une des opérations suivantes: il transfère le paquet au routeur suivant, ou à l'hôte de destination, si une correspondance est trouvée dans la table de routage, ou rejette le paquet en cas d'absence d'une correspondance (ni adresse de destination, ni passerelle par défaut).

## II. Méthodologie et environnement d'évaluation des expériences

Dans toutes les expériences, on évalue les performances des différentes topologies lors de transmission de VoIP codée par le codeur G729 [86] à un débit de 8 kbit/s. Nous utilisons le protocole OSPFv2 comme un protocole de routage dans le réseau Ethernet et le protocole OpenFlowV1.3 dans les topologies SDN.

### II.1 Simulateur OMNeT 4.6++

OMNeT [87] est un simulateur Open Source à événements discrets orienté objet, basé sur C++. Il été conçu pour simuler les systèmes réseaux de communications, les systèmes multi processeurs, et d'autres systèmes distribués. OMNeT 4.6++ est lancé en 1992 par Andras Vargas à l'université de Budapest. Nous avons utilisé dans nos travaux la version 4.6 de ce simulateur.

OMNeT 4.6++ offre la possibilité d'intégrer de nouveaux modules ou modifier ce qui est déjà implémentés. Un module peut être soit module simple ou bien soit un module composé. Chaque module simple correspond au deux fichier .cc et un fichier.h. Un module composé est constitué par de simples modules ou d'autres composés connectés entre eux. Les paramètres, les sous modules et les ports de chaque module sont spécifiés dans un fichier.ned

La conception des réseaux OMNeT 4.6 ++ se fait dans un fichier.ned et les différents paramètres de chaque module sont spécifiés dans un fichier .ini. Par ailleurs, OMNeT++

génère à la fin de chaque simulation deux nouveaux fichiers omnet.vec et omnet.sca qui permettent de tracer les courbes et calculer les statistiques.

## II.2 Scénarios d'évaluation des performances

Quatre expériences ont été menées pour pouvoir montrer les performances des réseaux SDN par rapport aux réseaux Ethernet, en fonction des métriques délais de bout en bout, gigue, paquets perdus et MoS. Ceci dans l'objectif de justifier l'impact de l'apport du concept SDN pour la QoS.

Un réseau SDN se compose au moins d'un commutateur OpenFlow et d'un contrôleur, qui programme de manière dynamique le comportement des autres équipements du réseau. La topologie en bus n'est pas possible avec SDN, car il y a le problème de CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection) [88]. Les figures 13, 14, 15 et 16 donnent un aperçu de quatre expériences à l'aide de OMNeT 4.6++

**Expérience 1:** Topologie SDN en arborescence implémentée avec un contrôleur SDN, 04 commutateurs OpenFlow et 08 nœuds (figure 13)

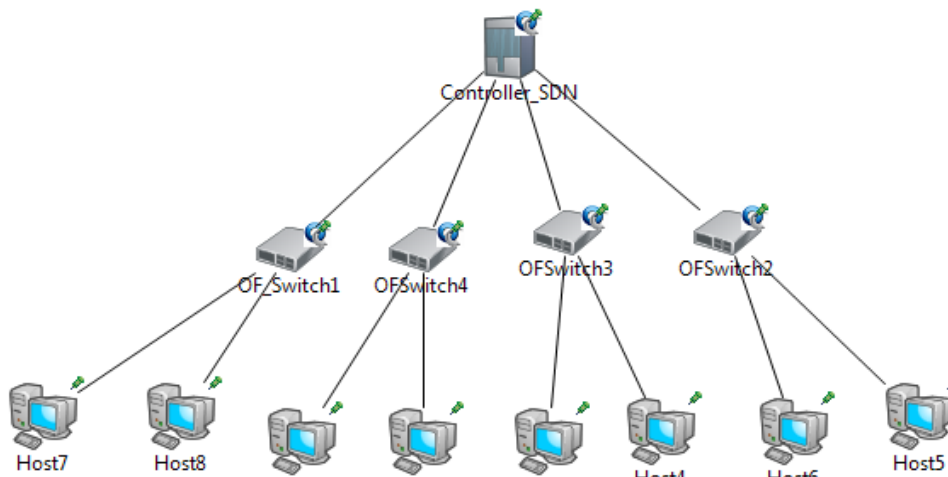


Figure 13: Expérience 1: Topologie SDN en arborescence

**Expérience 2:** Topologie SDN en anneau, implémentée avec un contrôleur SDN, 04 commutateurs OpenFlow et 08 nœuds (figure 14)

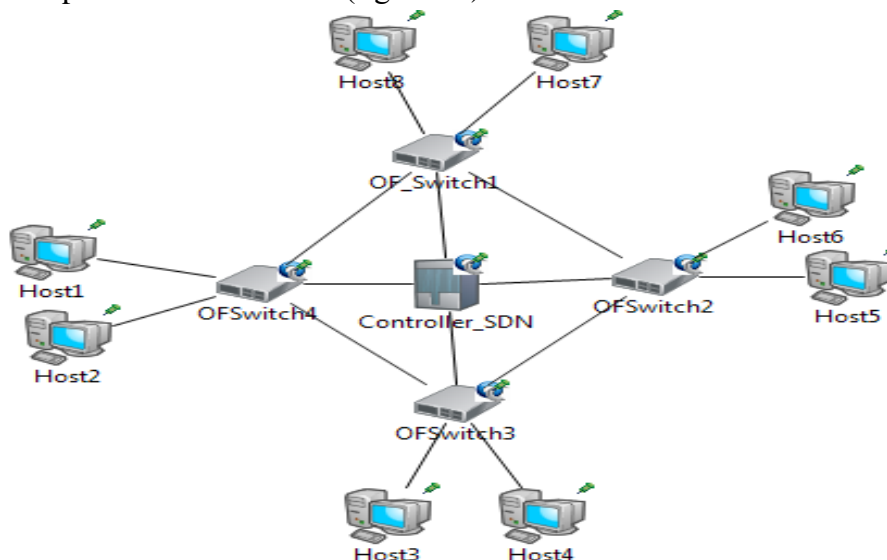


Figure 14: Expérience 2: Topologie SDN en anneau

**Expérience 3:** Topologie SDN centralisée implémentée avec un contrôleur SDN, 04 commutateurs OpenFlow et 08 nœuds (figure 15)

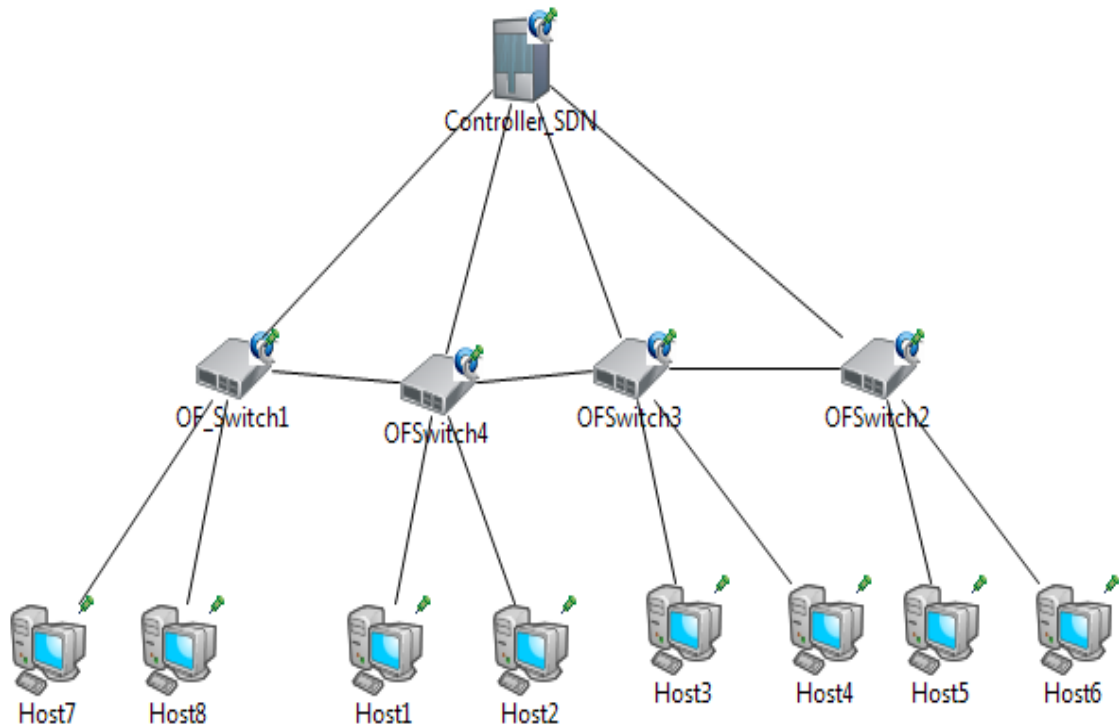


Figure 15: Expérience 3: Topologie centralisée de SDN

**Expérience 4:** Topologie Ethernet implémentée avec un routeur, 04 commutateurs Ethernet et 08 nœuds (figure 16)

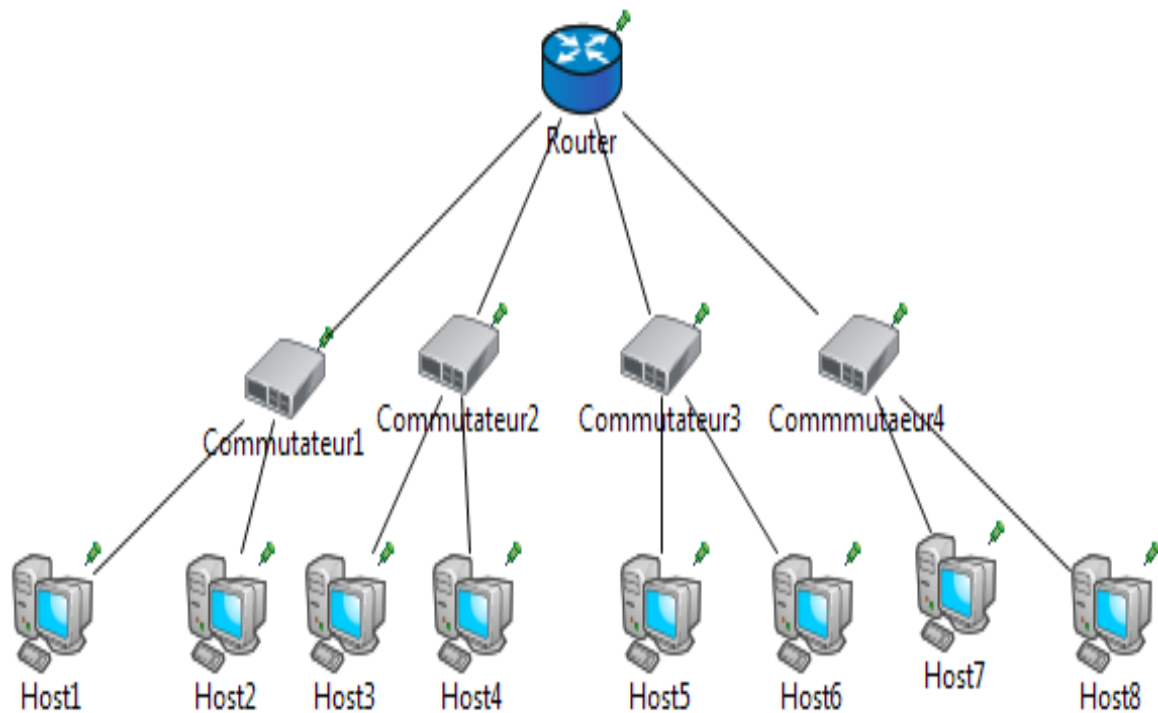


Figure 16: Expérience 4: Topologie Ethernet

### II.3 Evaluation des performances SDN et Ethernet

Cette partie présente une synthèse et une comparaison des performances des Topologies avec l'approche SDN et Ethernet, pour la transmission de la voix sur un réseau IP. Les simulations des performances sont faites via le simulateur Open source OMNeT4.6 ++, qui permet d'évaluer les paramètres suivants:

- Délai de bout en bout;
- Gigue;
- Nombre des paquets perdus;
- Perception utilisateur à travers le MOS.

Une analyse des résultats de la simulation pour les quatre topologies sera faite en fonction des métriques : délais de bout en bout, gigue, paquets perdus et MoS. Ceci dans l'objectif de justifier l'impact de l'apport de SDN pour améliorer la QoS.

#### a. Impact sur le délai de bout en bout

Le délai de bout en bout [89] s'exprime en ms, et désigne le temps nécessaire depuis l'émission d'un paquet par la source, jusqu'à la réception par la destination.

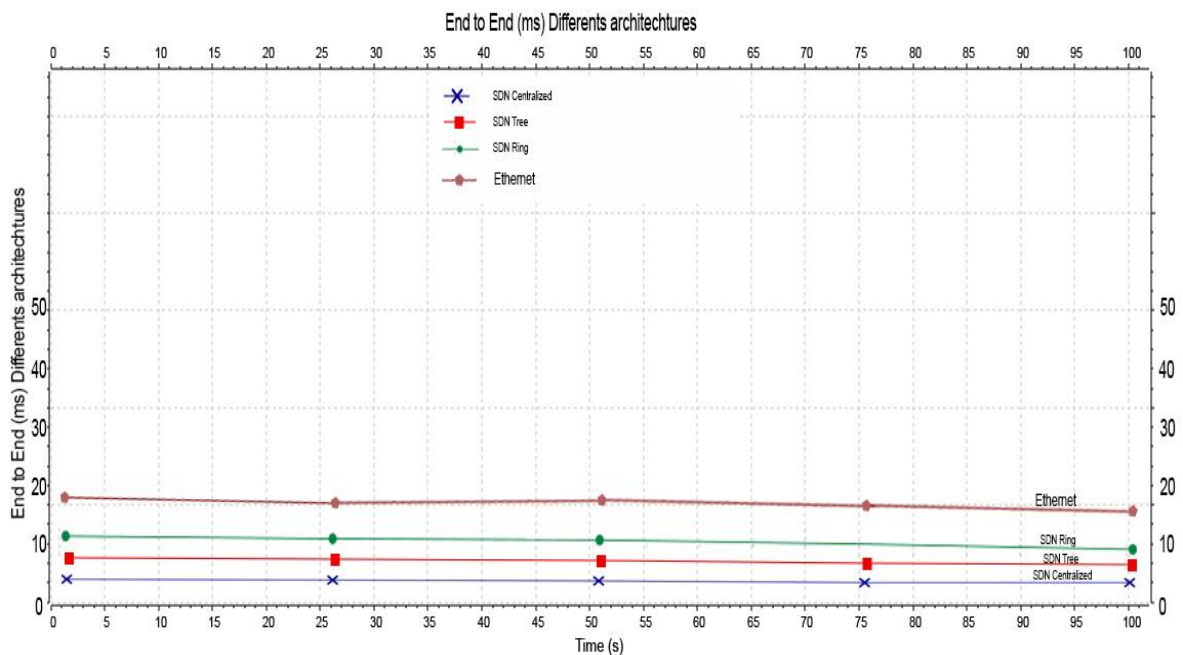


Figure 17: Délai de bout en bout dans les principales topologies SDN et Ethernet

Les résultats de comparaison des performances des principales topologie SDN et Ethernet sont illustrés par la figure 17 qui montre que le délai de bout en bout dans les topologies SDN est plus faible par rapport à Ethernet, ce qui explique que la technologie SDN est bénéfique par rapport à Ethernet.

#### b. Impact sur la gigue

La gigue [90] désigne la variation du délai de transmission, d'un paquet envoyé à partir de la source vers la destination, elle s'exprime en ms. La figure 18 illustre une évaluation des performances de la gigue dans un réseau SDN et Ethernet. Nous constatons que la gigue des architectures SDN est inférieure à celle d'un réseau Ethernet.

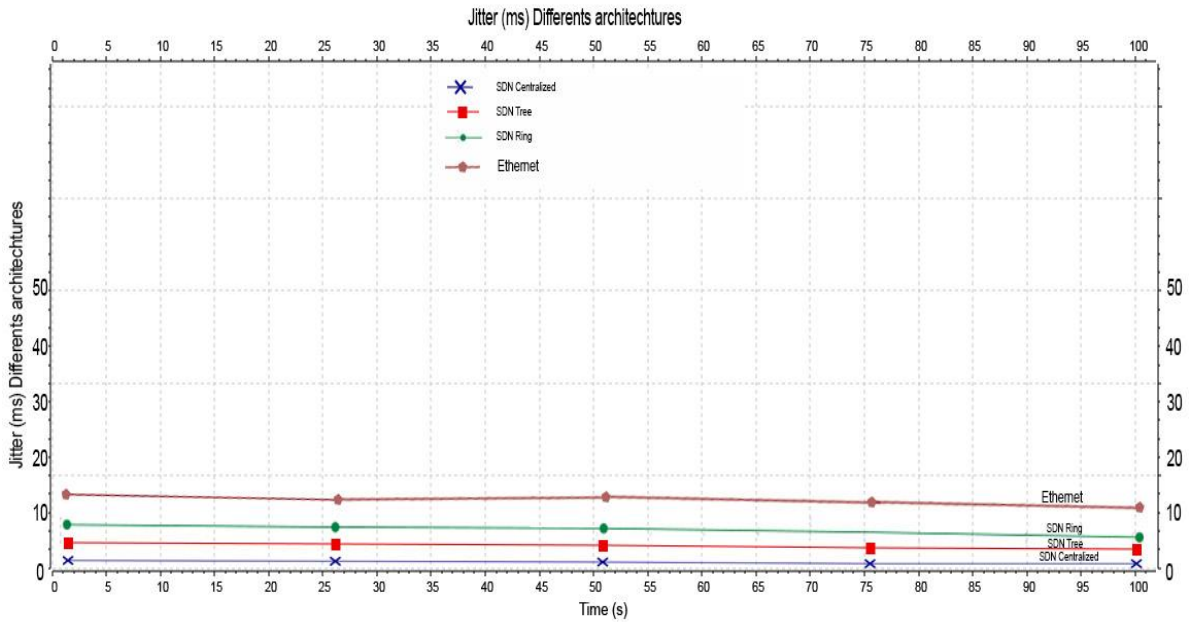


Figure 18: Gigue dans les principales topologies SDN et Ethernet

### c. Impact sur la perte des paquets

Le taux de perte [91] désigne la probabilité maximale de perte de données ou de paquets.

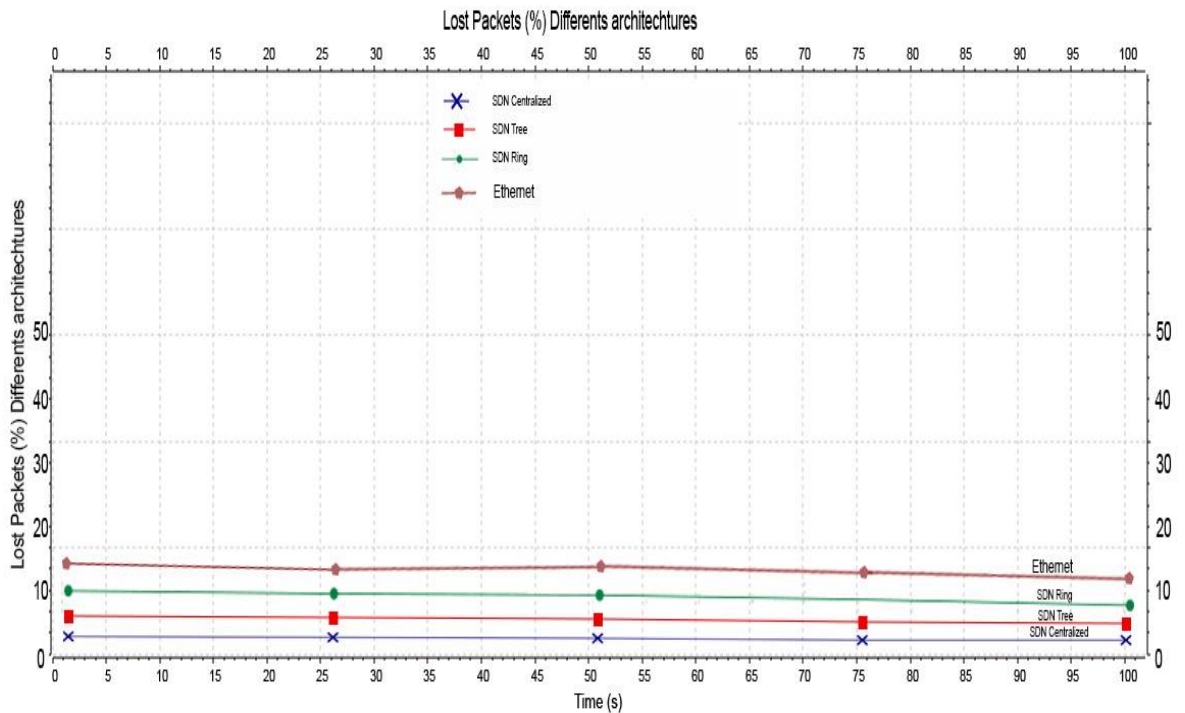


Figure 19: Paquets perdus dans les principales topologies SDN et Ethernet

La figure 19 présente les résultats de comparaison de l'évaluation des performances des réseaux Ethernet et SDN en termes de paquets perdus. Nous remarquons que les topologies SDN génèrent moins de paquets perdus par rapport au cas Ethernet. Ceci explique que la technologie SDN est plus performant par rapport à Ethernet, car sous SDN le plan de contrôle

est le responsable de la prise des décisions, sur la façon dont les paquets devraient être transmis par un ou plusieurs périphériques réseau.

#### d. Impact sur le MoS

MOS (Mean Opinion Score) est un paramètre permet l'évaluation subjective de la qualité de service en attribuant une note comprise entre 1 et 5 pour évaluer le degré de satisfaction par rapport aux performances d'un processus donné.

La note peut varier entre 1 et 5 (Très mauvais, Médiocre, Passable, Bonne et excellent).

La formule utilisée pour calculer le MoS est donnée par :

$$\text{MoS} = 4 - \ln(\text{loss}) - 0,7 * \ln(\text{size}) \text{ [92]}$$

La figure 20 montre une évaluation des performances du MOS dans les réseaux SDN et dans le réseau Ethernet. Nous constatons que le MOS dans les architectures SDN est supérieur au cas d'Ethernet.

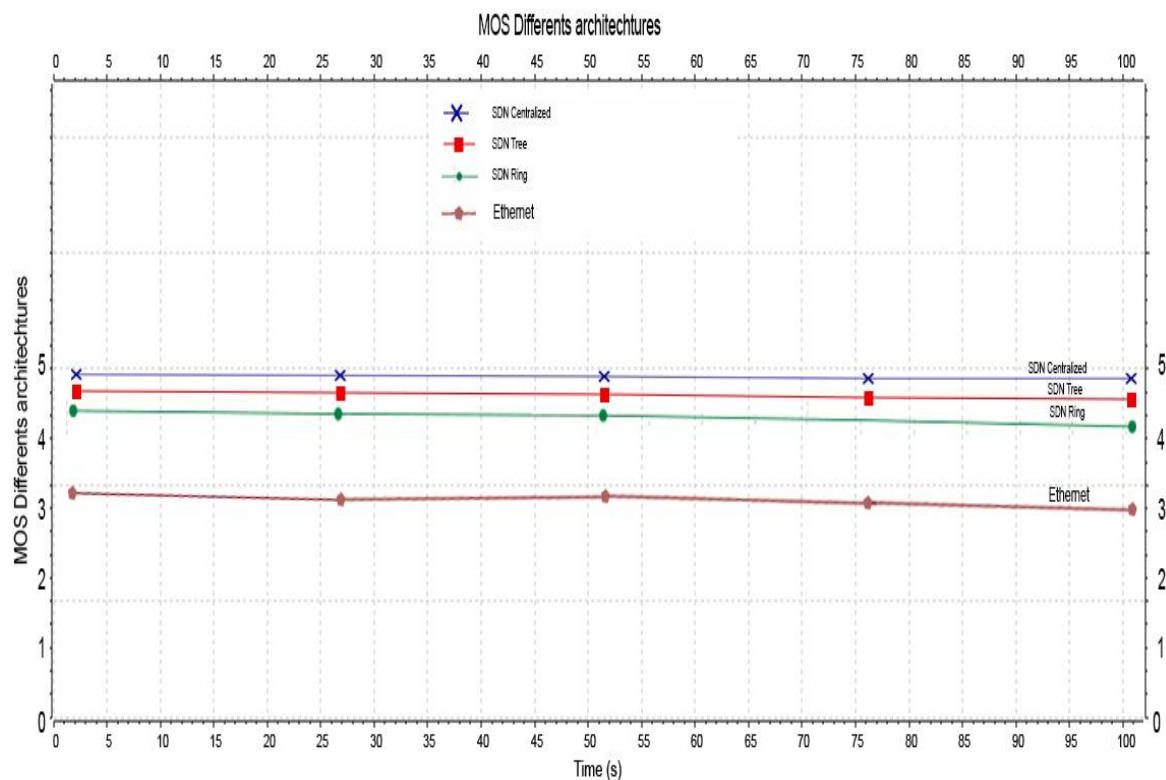


Figure 20: MOS dans les principales topologies SDN et Ethernet

## II.4 Synthèse et Interprétation des résultats

Les réseaux SDN offrent une meilleure QoS par rapport aux réseaux Ethernets. Pour la topologie centralisée se caractérise par le fait que tous les nœuds réseau se connectent à un contrôleur SDN, cela facilite la centralisation de la totalité du trafic du réseau.

La topologie en arborescence connue sous le nom de topologie en arbre, dans laquelle le réseau est divisé en niveaux. Le contrôleur SDN est connecté à plusieurs nœuds de niveau inférieur. Dans la hiérarchie, ces nœuds peuvent être eux-mêmes connectés à plusieurs nœuds de niveau inférieur.



Une topologie en anneau se base sur le principe que toutes ses stations sont connectées en chaîne les unes aux autres par un contrôleur SDN. Chaque station joue le rôle de station intermédiaire, qui reçoit une trame, l'interprète et la retransmet à la station suivante de la boucle si c'est nécessaire, ce qui évite les coupures des connexions à travers la redondance des commutateurs OpenFlow, mais cette boucle prend plus de temps ce qui réduit les performances de cette topologie.

### **Conclusion**

Ce chapitre présente l'évaluation des performances des différentes topologies SDN et Ethernet.

Nous avons montré que la QoS dans toutes les topologies des réseaux SDN est meilleur par rapport à celle offerte par les réseaux Ethernet. Cependant la topologie centralisée offre plus de performances.

Nous déployons dans le chapitre suivant, l'approche SDN pour l'amélioration de la qualité de service dans les réseaux sans fil WiFi et WiMAX.

## **Chapitre III: Apport de l'approche SDN dans l'amélioration du Handover vertical entre les cellules WiMAX et WiFi**



## Introduction

Les réseaux sans fil constituent une solution émergente pour l'accès des utilisateurs aux réseaux et aux services, quelles que soient leurs positions géographiques, le succès de ces réseaux a suscité un grand intérêt de la part des particuliers, des entreprises et des industriels. Le nombre d'utilisateurs de ces réseaux ne cesse d'augmenter. Ces réseaux peuvent se présenter sous forme de cellule de différentes tailles pour assurer une meilleure couverture et servir un grand nombre de clients tout en minimisant l'énergie. Une grande importance pour les opérateurs et leurs clients. En outre, ces derniers souhaitent d'assurer le maintien des communications même lors du déplacement entre les cellules de différentes technologies (Handover vertical) telles que 2G, 3G, 4G, 5G, WiFi, et WiMAX, pour les stations mobiles multi-RAT (Radio Access Technologies) supportent une multitude de technologie d'accès et qui sont devenues maintenant à la portée de tous les clients.

Dans ce chapitre, nous avons implémenté un point d'accès qui intègre le protocole OpenFlow (Point d'accès-OpenFlow) et permet l'échange de données avec le contrôleur, afin de centraliser le processus de gestion du transfert, et le traitement de données sans besoin du commutateur OpenFlow, qui est exigé dans les architectures SDN. Cette architecture permet de réduire le coût matériel, le retard lié au changement de point d'accès via l'authentification centralisée au niveau du contrôleur.

Lorsqu'un terminal mobile change son point d'accès du WiFi vers la zone de couverture de la station de base de WiMAX ou l'inverse, le Handover vertical se dégrade immédiatement. En effet, Nous proposons un algorithme qui permet de choisir le réseau de destination, en se basant sur la puissance du signal le plus fort, via l'intégration de l'approche SDWN (Software Defined Wireless Networks), ou les Réseaux Définis par Logiciel pour les réseaux sans fil, pour effectuer efficacement le Handover et améliorer son temps d'exécution.

## I. Réseaux sans fil

### I.1 Technologie WiFi

Les réseaux WiFi (Wireless Fidelity) [93] sont normalisés sous la norme IEEE 802.11 [94] et fournissent une connectivité à large bande pour les réseaux locaux.

Les standards 802.11 ont été complétés et améliorés à plusieurs reprises. Ces principaux standards et leurs caractéristiques sont décrits par le tableau 7.

	Débit théorique maximum	Bande de fréquence	Portée maximale	MIMO
<b>802.11b</b>	11 Mbps	2,4 GHz	100 m	Oui
<b>802.11a</b>	54 Mbps	5 GHz	100 m	Non
<b>802.11g</b>	54 Mbps	2,4 GHz	100 m	Oui
<b>802.11ac</b>	2,4 GHz et 5 GHz	5 GHz	100 m	Oui

Tableau 7: Standards IEEE 802.11

La norme IEEE 802.11 décrit les deux couches du modèle OSI : Couche physique et la couche liaison de données.

- **Couche physique (PHY)** [95] : est la couche basse, elle propose les types de codage de l'information notamment DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) [96], FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum) [97], OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [98],... et définit la modulation et les caractéristiques de la signalisation pour la transmission de données.

- **Couche liaison de données** [99]: assure l'interface entre le bus de la machine et la couche physique, elle regroupe les méthodes d'accès proche de celle utilisée dans le standard Ethernet et les règles de communication entre les différentes stations. Elle comporte de deux sous-couches:

-- La sous couche LLC (Logical Link Control) pour le contrôle de la liaison logique [100];

-- La sous couche MAC (Medium Access Control) pour le contrôle d'accès au support [101].

Nous distinguons deux modes d'architecture des réseaux WiFi à savoir le mode infrastructure et le mode ad-hoc.

#### a. Mode infrastructure

Dans le mode infrastructure, un réseau wifi est conçu autour d'un point d'accès qui assure la liaison entre les stations. La zone de couverture du point d'accès est appelée cellule.

Chaque point d'accès AP (Access Point) est identifié par un identifiant représenté sur 6 octets appelé BSSID (Basic Service Set Identifier) [102].

Il est possible de relier plusieurs points d'accès entre eux (ou plus exactement plusieurs BSS) par une liaison appelée Système de Distribution DS (Distribution System) [103] afin de constituer un ensemble de Services Étendu ESS (Extended Service Set) [104]. Un ESS est repéré par un ESSID (Service Set Identifier) [105]. Le SSID représente le nom de la cellule WiFi et constitue un premier niveau de sécurité dans la mesure où la connaissance du SSID est nécessaire pour qu'une station puisse se connecter au réseau étendu. Lorsqu'un utilisateur passe d'une BSS à une autre lors de son déplacement au sein de l'ESS, l'adaptateur réseau sans fil de sa machine est capable de changer le point d'accès selon la qualité de réception des signaux provenant des différents points d'accès. Les points d'accès communiquent entre eux grâce au DS afin d'échanger les informations sur les stations et permettre le cas échéant de transmettre les données des stations mobiles.

Lorsqu'une AP dans une nouvelle cellule, elle diffuse sur chaque canal une requête de sondage (Probe request) contenant l'ESSID pour lequel, elle est configurée, et que les débits de son adaptateur sans fil le supportent. Si aucun ESSID n'est configuré, la station écoute le réseau à la recherche d'un SSID. En effet, chaque point d'accès diffuse régulièrement une trame balise (Beacon) donnant les informations sur son BSSID, L'ESSID s'il n'est pas caché pour raison de sécurité, il est automatiquement diffusé. A chaque requête de sondage reçue, le point d'accès vérifie l'ESSID et la demande des débits présents dans la trame balise. Si l'ESSID correspond à celui du point d'accès, ce dernier envoie une réponse contenant des informations sur sa charge et des données de synchronisation. La station recevant la réponse peut mesurer la qualité du signal émis par le point d'accès et déterminer la distance qui le sépare par le point d'accès. En effet d'une manière générale, plus un point d'accès est proche, le débit est meilleur. Une station se trouve à la portée de plusieurs points d'accès (possédant bien évidemment le même SSID) aura le meilleur compromis de débit et de la charge.

### b. Mode ad hoc

En mode ad hoc [106], les machines sans fil se connectent les unes aux autres afin de constituer un réseau point à point (Peer to peer), c'est-à-dire un réseau dans lequel chaque machine joue en même temps le rôle de nœud et le rôle de point d'accès. L'ensemble formé par les différentes stations est appelé ensemble des services de base indépendants IBSS (Independent Basic Service Set) [107]. Un IBSS est constitué au minimum de deux stations et ne nécessite pas de point d'accès. Il est identifié aussi par un SSID.

Dans un réseau ad hoc, la portée du BSS est indépendante, elle est déterminée par la portée de chaque station, cela signifie que si deux stations du réseau sont hors de portée l'une de l'autre, elles ne pourront pas communiquer, même s'elles voient d'autres stations. En effet, contrairement au mode infrastructure, le mode ad hoc ne propose pas un système de distribution capable de transmettre les trames d'une station à une autre.

## I.2 Technologie WiMAX

Le WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) est standardisé via IEEE 802.16 [108] est une technologie capable de fournir un accès haut débit sans fil à l'échelle d'une ville sur une longue distance avec ou sans visibilité directe entre les nœuds et la station de base.

La couverture de WiMAX peut atteindre 8 km en zone urbaine, 15 km en zone périurbaine et plus de 20 km en zone rurale [109]. Le tableau 8 illustre les principales normes IEEE 802.16 avec leurs significations et leurs statuts actuels.

<b>Standard</b>	<b>Bande de fréquence</b>	<b>Date de partition</b>
IEEE802.16	Définit des réseaux métropolitains sans fil utilisant des fréquences supérieures à 10 Ghz (jusqu'à 66 Ghz)	8 Avril 2002
IEEE802.16c	Définit les options (profils) possibles pour les réseaux des fréquences entre 10 et 66 Ghz	15 Janvier 2003
IEEE802.16a	Amendement au standard IEEE 802.16 pour les fréquences entre 2 et 11 Ghz	1 Avril 2003
IEEE802.16d	Révision (actualisation) des standards de base IEEE 802.16, 802.16a, et 802.16c	1 Octobre 2004
IEEE802.16e	Apporte les possibilités d'utilisation en situation mobile du standard, jusqu'à 120 km/h.	7 Décembre 2005
IEEE802.16f	Spécifie la MIB (Management Information Base), pour les couches MAC et PHY (intègre dans IEEE 802.16d)	22 janvier 2016
IEEE802.16g	Définis les procédures de supervisions et de management pour les réseaux WiMAX (intégrée dans IEEE 802.16e)	31 Décembre 2007

Tableau 8: Différentes normes de WiMAX

Le WiMAX est une technologie WMAN (Wireless Metropolitan Area Networks) [110], conçue pour les utilisateurs fixes, nomade (Portables), et mobile, offre deux modes de fonctionnement à savoir la desserte et la collecte.

**Desserte de WiMAX** [111]: est la liaison entre le client WiMAX est dite sans visibilité direct NLOS (No Line of Sight) [112], c'est-à-dire que le client ne se trouve pas en vue directe avec l'antenne.

**Collecte de WiMAX** [113]: se fait en visibilité direct LOS (Line of Sight) [114], grâce à des antennes placées suffisamment en haut par rapport aux obstacles.

### 1.2.1 Architecture et le modèle de référence WiMAX

Le modèle de référence de l'architecture NRM (Networks Reference Model) [115] est une présentation logique de l'architecture WiMAX, les figures 21 et 22 présentent les points de références, et les entités fonctionnelles du réseau entre lesquels peut être réalisée l'interopérabilité. Le NRM comprend trois parties logiques à savoir la partie Radio, le réseau cœur et les équipements noeuds.

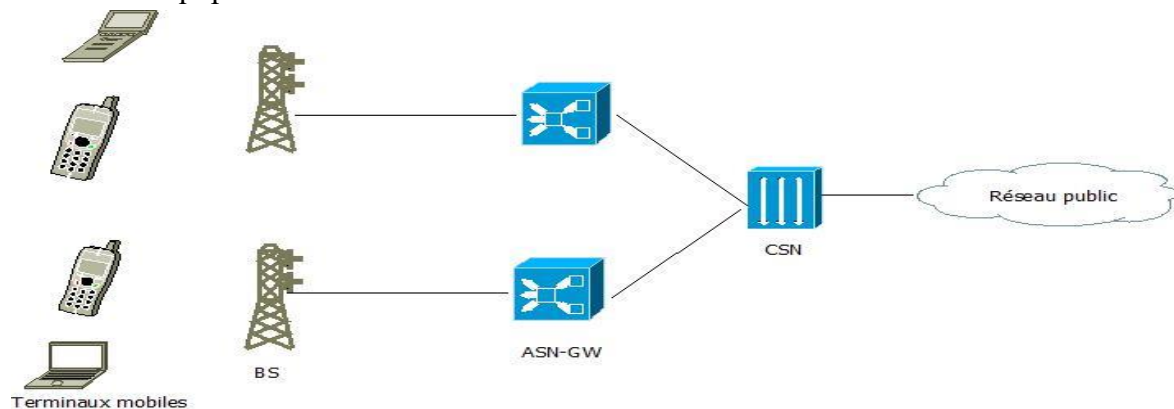


Figure 21: Architecture des réseaux WiMAX

**Equipements noeuds:** se sont les équipements de l'utilisateur (terminaux fixes ou mobiles) qui permettent d'avoir une connexion avec le réseau WiMAX;

**Réseau d'accès Radio WiMAX:** est aussi appelé ASN (Access Service Networks) [116], il est responsable de la gestion des accès des terminaux, de la gestion des ressources radio, mobilité, qualité de service, l'interopérabilité avec d'autres ASN et de la sécurité. Il joue le rôle d'interface entre les nœuds mobiles et le cœur du réseau [117]. Il est constitué de la station de base (BS) et de passerelles ASN-GW [118].

- *Station de base:* offre les fonctionnalités radio, et sert d'interface sans fil entre le réseau et les équipements d'accès. Elle peut prendre en charge optionnellement les fonctionnalités d'ordonnancement de gestion de la micromobilité à savoir le déclenchement du transfert et l'établissement de tunnel entre ASN et CSN.

- *ASN-GW:* c'est une passerelle qui permet de prendre en charge le trafic de la couche 2 en gérant la QoS, la sécurité (clés de chiffrement, fonctionnalité de client AAA), la mobilité, les interactions avec d'autres réseaux d'accès, la gestion des ressources radio, le contrôle d'admission, la mise en cache des profils d'abonnés, la création et la gestion d'un tunnel avec les stations de base, ainsi que le routage vers le réseau de service de connectivité.

**Réseau cœur de service de connectivité CSN (Core Service Networks)** [119]: remplit un ensemble de fonctions dans le but de fournir aux abonnés des services de connectivité, il effectue la gestion des abonnés et fournit des services de transport, de commutation, d'authentification, de facturation, etc. Il est chargé de fournir l'itinérance entre les fournisseurs de services réseau et est responsable de la sécurité des utilisateurs et de la qualité de service.

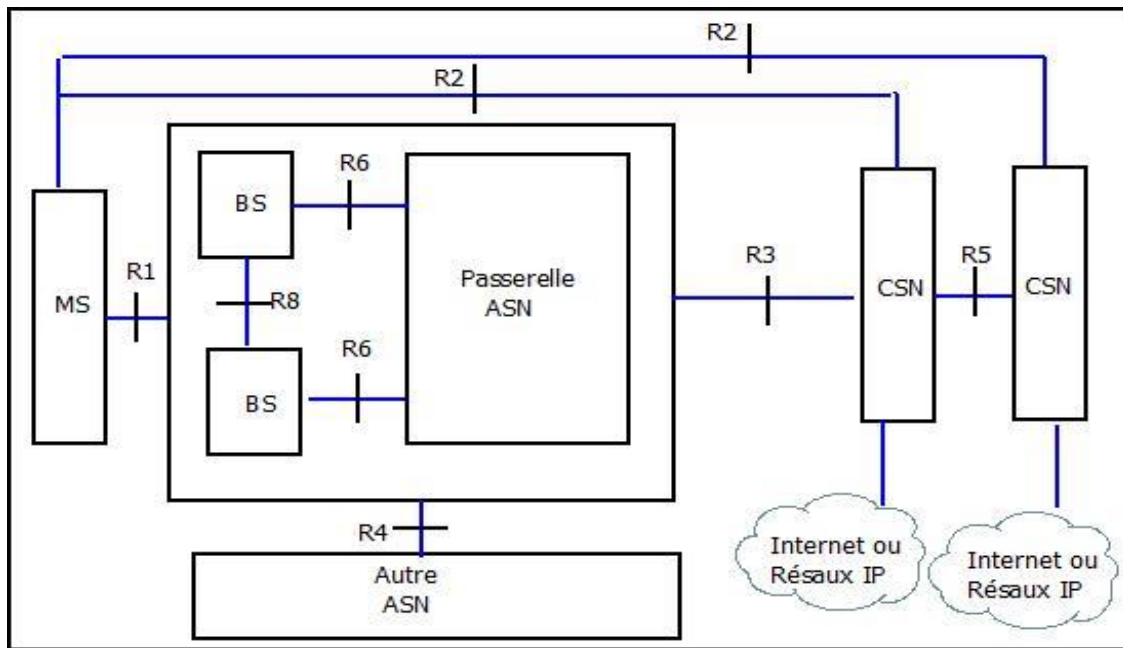


Figure 22: Modèle de référence du réseau WiMAX

Les points de références sont des liaisons conceptuelles, qui permettent la connexion entre les différentes entités fonctionnelles de l'architecture telle que le ASN et CSN, ce qui est résumé dans le tableau 9 avec les fonctions attribuées aux différents points de références.

Points de références	Fonctions
<b>R1</b>	Interface entre les nœuds mobiles et le réseau d'accès ASN. Elle joue le rôle d'interface sans fil;
<b>R2</b>	Interface entre les nœuds et le CSN, elle est associée à l'authentification, autorisations, gestion de la mobilité et de la configuration d'IP abonnée. C'est une interface logique.
<b>R3</b>	Interface entre le réseau d'accès ASN et le réseau CSN. Elle offre les fonctionnalités d'authentification, d'autorisation et de facturation, elle assure l'application des politiques liées aux profils des utilisateurs et la gestion de la mobilité;
<b>R4</b>	Point de référence entre le réseau d'accès ASN. Elle permet de gérer la mobilité;
<b>R5</b>	Interface entre CSN. Elle permet d'assurer l'interconnexion et l'itinérance; L'interface peut servir à l'échange des informations d'états du MAC avec les BS voisins.
<b>R6</b>	Interface entre la station de base et la passerelle ASN-GW. Elle permet d'assurer la gestion de tunnel IP afin d'établir et de libérer la connexion à la station mobile;
<b>R7</b>	Point d'attachement interne de la passerelle ASN;
<b>R8</b>	Interface entre les stations de base, elle permet de faire le transfert.

Tableau 9: Fonctions des différents points des références [120]

## 1.2.2 Pile protocolaire du WiMAX

La norme IEEE 802.16 concerne la couche physique et la couche liaison de données, mais dans la spécification de l'IUT, elle ne présente que la couche PHY et la couche MAC. La figure 23 illustre la structure avec les composants du MAC ainsi que les interfaces qui séparent des différentes entités telles que le PHY-SAP, le MAC-SAP et le CS-SAP sous une forme bien hiérarchisée.

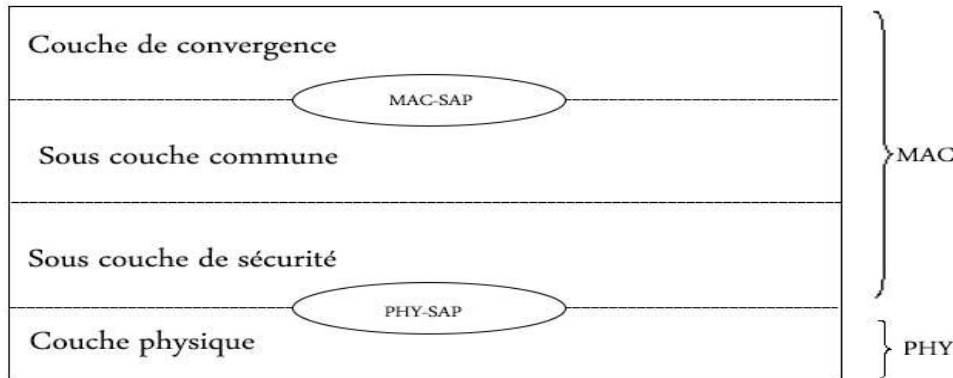


Figure 23: Structure en couche de la norme 802.16

**Couche PHY** [121]: assure les fonctions de modulation, multiplexage, et la méthode d'accès.

**Couche MAC** [122]: permet le contrôle et la gestion des ressources du canal radio, et les trames de données (Fragmentation des paquets descendants et assemblage des trames montantes) et les erreurs de transmission; elle est divisée en trois sous-couches:

- *Sous-couche spécifique de convergence de services* [123]: la SSCS (Service-Specific Convergence Sublayer) fournit toute transformation de données ou le mappage des réseaux externes reçus par la CPS. Son rôle principal est de classer les données par rapport aux types de services demandés, la gestion de la QoS, et l'activation de l'allocation de la bande passante à la demande.

- *Sous-couche commune CPS (Common Part Sublayer)* [124]: s'occupe des fonctions clés de la couche MAC, car elle détermine quel média va être partagé. Elle se charge de l'établissement et la maintenance des connexions, et de palier aux problèmes liés aux liaisons point à multipoint, c'est-à-dire au départ de ce protocole, une station mère diffuse un signal pour servir les stations clientes.

- *Sous-couche de protection PS (Privacy Sublayer)* [125]: permet le cryptage de paquets de messages de type MAC PDU (Medium Access Control-Protocol Data Unit). La station réceptrice décryptera le message grâce à l'en-tête du paquet envoyé. Elle utilise les algorithmes RSA (Rivest-Shamir-Adleman) [126] pour la gestion des clés PKM (Privacy Key Management) [127].

## II. Etat de l'art de la gestion du Handover

Le standard IEEE 802.21 (MIH) a fait l'objet de nombreux travaux de recherche, dont plusieurs dans le cadre de projets internationaux tels que le projet FP7 HURRICANE (2008-2010) de l'UE qui a traité la problématique d'interopérabilité entre l'architecture courante du MIH et le 3GPP, ou le projet QoEHand (Brésil, Italie, Portugal) qui s'intéresse à la gestion de la QoS et QoE pendant le Handover.

Des améliorations de MIH ont été explorées dans la littérature sur plusieurs niveaux :

- Implémentation du MIIS, facilitant le choix du meilleur réseau destination;

- Ajout de nouveaux messages pour faciliter l'exploitation de MIH et améliorer la QoS durant la période du Handover;
- Elaboration d'algorithmes pour le choix du réseau de destination basés sur différents types de paramètres de QoS;
- Amélioration du temps de Handover

Concernant les paramètres réseau qui peuvent affecter le Handover, on peut citer les travaux suivants: Silva et al. [128], étudient le temps de Handover et le taux de perte des paquets en allant du WiFi à WiMAX. Ils affirment que le délai du Handover est directement relié à l'intervalle d'envoi de RA (Router Advertisement) pour les annonces des liens local d'adresses de routeurs IPv6 et ses préfixes au moyen du protocole Neighbor Discovery Protocol (NDP). En effet, le RFC3775 [129] définit le MinRtrAdvInterval à 0.03s et le MaxRtrAdvInterval à 0.07s.

Quand l'intervalle des messages RA est configuré à son temps minimum, le temps du Handover se diminue car le terminal mobile peut détecter plus rapidement ses mouvements et décide du meilleur moment pour le déclenchement du Handover. Tiwari et al. [130] comparent les performances du MIH avec trois variantes du TCP: TCP Westwood+, TCP NewReno et TCP Vegas. Les paramètres étudiés sont "débit", "Handover latency" et "perte des paquets". Il étudie le cas du Handover entre réseau WiFi et WiMAX. Chandavarkar et al. [131], proposent un algorithme, pour chaque cas de Handover WiFi – WiMAX et WiMAX - WiFi basé sur la durée de vie de la batterie, la vitesse du mobile et le rayon de couverture de l'AP. Normalement, le Handover se fait en 3 étapes: Initiation, Sélection et Exécution. Jiadi et al. [132] proposent une nouvelle procédure de Handover qui intervient seulement au niveau des deux premières étapes.

Ying et al. [133] proposent une amélioration au MIH en ajoutant un certain nombre d'événements et des composantes coté réseau et coté client pour permettre le déclenchement du Handover du coté client (L2 et L4) ou coté réseau (aussi niveau L2 et L4).

On se basant sur ces recherches citées, nous proposons une amélioration dans le temps de l'exécution de Handover vertical entre les points d'accès WiFi et la zone de couverture de WiMAX ou l'inverse sans provoquer des pertes de paquets, et d'influencer sur les délais de transmission des autres paquets ce qui permet d'augmenter la qualité de Handover vertical à travers l'intégration de l'approche SDWN.

### III. Gestion de la mobilité

Les réseaux sans fil ont pris une grande ampleur dans différents domaines de façon qu'on ne puisse presque plus imaginer un monde sans moyen de communication sans fil, avec cette dernier, le transfert de données à travers différents types de réseaux (réseau de données ou bien le réseau téléphonique) se fait par l'intermédiaire de l'onde radio. Ce progrès exige, d'un côté, une compatibilité entre les différentes technologies existantes et, d'un autre côté, il donne une richesse et permet la continuité de l'évolution de la technologie. Ainsi, l'apparition d'une nouvelle génération de réseau cellulaire n'élimine pas nécessairement la précédente. Il n'existe pas un réseau cellulaire capable de satisfaire tous les participants: utilisateur et opérateur. De ce fait, l'environnement qui entoure un terminal mobile sera formé par un ensemble des réseaux mobiles et sans fil de types différents (WiFi, WiMAX, 3G, 4G, 5G etc...) qui coexistent les uns avec les autres. Ce nouvel environnement est considéré comme

étant un environnement hétérogène. Dans un tel environnement, un terminal mobile doit rester toujours bien servi et ceci n'importe quand et de n'importe quel endroit imposant.

Pour assurer une meilleure qualité de service et satisfaire les besoins de l'utilisateur, un terminal mobile aura besoin de se déplacer entre ces différents accès radio. Ceci invoque plusieurs défis techniques à surmonter. En effet, durant le temps de transfert entre un réseau et un autre appelé le temps de Handover (ou temps de latence du Handover), la station mobile est incapable de recevoir des paquets du réseau, qu'elle est en train de quitter et ne peut pas encore recevoir des paquets du réseau sur lequel elle est destinée.

Le fait de quitter le réseau mobile courant et de se connecter sur un nouveau réseau c'est le processus de Handover. Il existe plusieurs techniques de Handover. Parmi celles-ci, citons: le Make-Before-Break [134] dans lequel le terminal mobile se connecte sur le nouveau réseau avant de se déconnecter du réseau mobile courant et le Break-Before-Make [135] dans lequel un terminal mobile se déconnecte du réseau courant pour ensuite se connecter sur le nouveau réseau. Quelle que soit la méthode utilisée, il reste primordial que le processus de Handover se fasse d'une façon transparente pour l'utilisateur et de façon plus rapide pour éviter une grande perte de paquets, par conséquent, une détérioration de la qualité du service. Il est utile de mentionner que la décision du Handover se fait soit complètement au niveau de l'opérateur réseau (c'est le cas réel de toutes les compagnies de télécommunication), soit au niveau du terminal mobile (c'est souvent le cas des études théoriques) ou bien encore cette décision peut être un partage entre les deux côtés (utilisateur mobile et opérateur réseau).

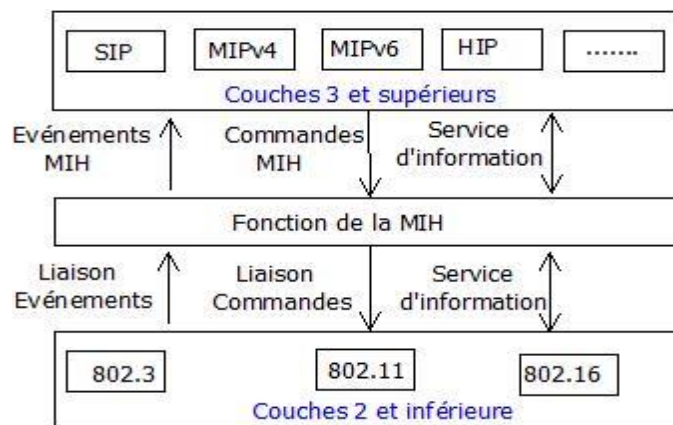


Figure 24:Fonctionnement de MIH

Pour répondre à ces défis et aidé le terminal mobile à faire un Handover transparent, plusieurs standards ont été proposés. Media Independent Handover (MIH) [136] (figure 24), qui est défini par l'organisme IEEE 802.21 dont le rôle est d'aider à accomplir une transition transparente à l'utilisateur entre les différents réseaux. La composante MIH s'intercale entre la couche liaison (L2) et la couche réseau (L3). Ce standard comporte une composante appelée Media Independent Handover Function (MIHF) [137] qui offre trois services: Media Independent Event Services (MIES) [138] dont le rôle est de détecter l'état des liens aux niveaux L2 et physique, Media Independent Command Services (MICS) [139] dont le rôle est de contrôler l'état des liens à partir des couches supérieures et Media Independent Information Services (MIIS) [140] qui représente une base de données contenant un grand nombre des informations sur les réseaux disponibles dans l'entourage du terminale mobile. Ce dernier



peut utiliser ce standard pour faire un Handover transparent lorsqu'il change son point de connexion d'un réseau à un autre.

### **III.1 Protocoles de Handover**

Dans le but de maintenir une connexion ininterrompue lors d'une transition d'un réseau à un autre, IEEE 802.21 définit ce passage indépendamment du support média MIH. Cette fonction opérant entre la couche 2 et la couche 3 du modèle OSI (Open System Interconnexion) permet une mobilité entre les réseaux hétérogènes. En autorisant les équipements clients et réseaux à travailler ensemble durant ces transitions, la norme IEEE 802.21 offre des mécanismes afin d'optimiser le passage entre des réseaux de types Wifi, WiMAX et mobiles.

#### **III.1.1 Protocole de Handover Indépendant des Médias (MIH)**

Les réseaux omniprésents dans l'environnement du terminal mobile sont hétérogènes. Le Handover est un processus clé pour garantir la qualité de service offerte dans un tel environnement. Il est donc nécessaire de savoir, continuellement, l'état de lien du noeud mobile avec son réseau courant et de connaître la liste des réseaux qui sont disponibles dans l'environnement du mobile. Le standard IEEE 802.21 répond à ce besoin en développant des spécifications capables de transmettre des informations sur l'état des liens et d'autres informations utiles des couches inférieures (couche L2 et la couche physique) vers les couches supérieures (couche L3 et plus) par MIH. Ce standard est capable de communiquer avec toute sorte de réseaux de la famille IEEE 802.x. D'autre part, MIH est capable de communiquer avec des réseaux mobiles tels que 3G, 4G, 5G [141].

L'état des liens entre le terminal mobile et le réseau se localise au niveau de la sous couche MAC et la couche physique. À chaque fois qu'il y a un changement dans l'état des liens, des événements seront générés et envoyés vers le MIHF pour l'informer du nouvel état des liens. Ces informations vont aider à déterminer s'il y a besoin d'initier un Handover ou non. Le Handover peut être initié par le terminal mobile ou bien par le réseau. La source des événements qui vont déterminer le besoin d'initier le Handover peut être locale ou distante. Plusieurs entités de couches supérieures pourraient être intéressées par la réception de ces événements. Donc, le MIHF doit être en mesure de distribuer des événements à des destinations multiples. Ces événements sont de nature discrète et asynchrone, et toute entité-MIH qui aimerait recevoir ces événements devrait s'enregistrer à ce service auparavant avec MIHF, cette procédure se fait par des requêtes d'inscription mutuelle entre les deux entités-MIH.

Il y a des services permettent d'assurer la communication des informations nécessaires entre la couche L2 et la couche L3 et qui seront utilisées pour la sélection du réseau de destination. Ces services sont:

##### **a. Service de Commande Indépendant des Médias (MICS)**

Ce service permet aux couches supérieures d'effectuer certaines reconfigurations de paramètres du réseau ou de provoquer le passage à un autre réseau voisin. La nécessité d'une telle reconfiguration pourrait survenir lorsqu'un changement est détecté dans la couche de liaison ou dans les conditions du réseau. MICS utilise deux types des événements: commande de liens et commande MIH.

#### **b. Service d'information Indépendant des Médias (MIIS)**

Le MIIS est une sorte de base de données qui stocke les informations utiles relatives aux réseaux voisins. Ces données sont pertinentes pour toute logique de sélection de réseau destination. Comme les services MIES et MICS, le MIIS a une portée locale et d'autre distante. Ces informations sont délivrées par le MIIS au MN sous forme des éléments d'information IE (Information Element). Les informations collectées sont destinées au module qui implémente la fonction de prise de décision du Handover.

#### **c. Protocole des Fonctions de Transfert Independent des Medias (MIHF)**

La communication entre les couches a lieu à travers des points d'accès de service bien défini. Des stations utilisant le MIH peuvent envoyer des rapports et autres types d'information. Le seul problème, elles doivent envoyer des données sur un lien physique, le protocole MIHF prend alors soin de l'encapsulation en trames MIH et de l'envoi sur les liens physiques. Chaque lien physique peut nécessiter une implémentation légèrement différente mais tout est prévu par les modèles de références.

Le protocole MIHF permet à des entités paires MIHF d'interagir entre elles. La nature d'une communication MIH peut impliquer l'utilisation de services de transport en mode non-connecté afin de réduire l'en-tête transport, assurer une efficacité et diminuer la latence pour délivrer les messages MIHF.

### **III.1.2 Différents types de Handover**

Il existe deux types de Handover: Handover horizontale et le Handover vertical. Le Handover horizontale c'est le déplacement entre deux cellules de même technologie alors que le Handover vertical c'est le déplacement entre deux cellules utilisant des technologies différentes.

La prise de décision et l'exécution du Handover peut être complètement prise en charge par l'opérateur, ou peut être complètement du côté du terminal mobile ou bien un partage entre les deux côtés. Dans ce qui suit, nous détaillons les différents types de prise de décision de Handover.

#### **a. Décision de Transfert Contrôlé par le Mobile (MCHO)**

MCHO (Mobile Controlled Handover Decision), le terminal mobile prend la décision du Handover en se basant sur des informations locales telles que: la puissance du signal RSS (Radio Signal Strength) [142], l'interférence sur le canal radio SINR (Signal to Noise Interférence Ratio), le BER (Blocking Error Rate) [143], les préférences de l'utilisateur, la vitesse du terminal mobile, etc. Le contrôle du Handover par le terminal peut être assisté par le réseau dans le sens où le réseau peut fournir la valeur de certains paramètres de qualité de service comme la bande passante et le taux de perte des paquets. Ces paramètres peuvent aussi être pris en compte par la station mobile pour décider le réseau de destination.

#### **b. Décision de Transfert Contrôlé par le Réseau (NCHO)**

NCHO (Networks Controlled Handover Decision), dans ce mode de Handover, c'est le réseau qui prend la décision. Ce type de Handover peut être initié par le terminal mobile (Mobile Initiated) ou bien assisté par un mobile (Mobile Assisted). Selon le premier cas, (Handover initié par le mobile), le terminal mobile détecte la présence d'une nouvelle station de base et estime qu'il y a un meilleur réseau dans son entourage (Handover Initiation), le terminal

mobile informe alors le réseau qui va accepter ou rejeter le Handover. Dans le cas où le terminal mobile assiste le Handover, c'est le réseau qui initie le Handover (Handover Initiation), mais le terminal mobile assiste seulement ce processus MAHO (Mobile Assisted Handover) [144] en lui offrant des mesures sur des paramètres qui aideront le réseau à prendre la décision.

#### IV. Handover dans les réseaux Wi-Fi

Au début de l'apparition du Wi-Fi, la notion de la mobilité était limitée aux réseaux cellulaires. Le standard IEEE 802.11 n'implémente aucun moyen pour sélectionner un réseau de destination. Une nouvelle norme a été proposée par IEEE sous le nom de IEEE 802.11f pour traiter le Handover. Cette solution reste limitée et inacceptable pour les applications temps-réel [145]. De plus, deux autres normes supposées suivre le IEEE 802.11f pour offrir une amélioration du Handover ont été annoncées, mais n'ont jamais vu le jour.

#### V. Handover dans les réseaux WiMAX

Le standard IEEE 802.16e (WiMAX mobile) implémente deux types de Handover appelés: Hard Handover et Soft Handover.

Selon le mode Hard Handover, le terminal mobile qui aimerait changer de cellule réseau, commence par couper ses liens avec la cellule courante avant de se connecter à la cellule destination. Ce type de Handover est aussi appelé Break-Before-Make [146]. Le choix d'une nouvelle cellule de destination fait intervenir un ensemble des échanges de messages entre le terminal mobile et la station de base (figure 25).

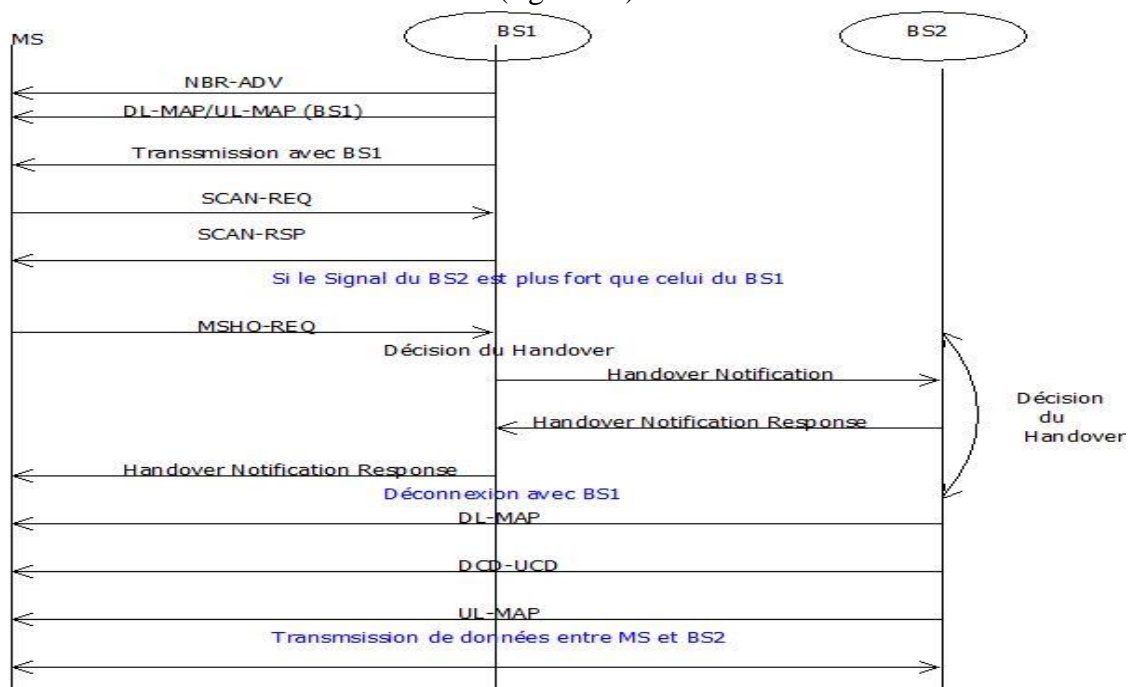


Figure 25: Mécanisme du Hard Handover

Pour le mode Soft Handover, le terminal mobile qui aimerait changer la cellule réseau doit d'abord trouver une cellule de destination à laquelle, il va se connecter avant de couper ses liens avec la cellule courante. Ce type de Handover est aussi appelé Make-Before-Break[147]. Pendant la connexion/déconnexion, le terminal mobile communique en même

temps avec deux cellules réseaux, ce qui entraîne une consommation des ressources plus importante par rapport au Hard Handover [148].

L'avantage de ce type est que la perte de paquets est minimisée, car il se connecte sur le réseau de destination avant de couper la connexion avec le réseau courant. Cet avantage rend le Handover valable pour les cas des terminaux mobiles se déplaçant à haute vitesse. Le WiMAX implémente cette procédure de Handover selon deux techniques: MDHO (Macro Diversity Handover) [149] et FBSS (Fast BS Switching) [150].

## VI. Méthodologie et environnement d'évaluation

Quand le terminal mobile se déconnecte du point d'accès WiFi, vers la zone de couverture de station de base WiMAX, il change immédiatement son point de connexion du WiFi vers le WiMAX ou l'inverse. Mais, avec la vitesse de déplacement, plusieurs problèmes peuvent survenir, qui ont un impact direct sur le Handover vertical. En effet, nous proposons un algorithme qui permet de choisir le RSS le plus fort du réseau, avec une gestion centralisée par le contrôleur SDN, pour réduire le temps de traitement, la prise de décision de Handover et le changement transparent du point de connexion. Nous intégrons un control centralisé des équipements par le contrôleur SDN, et nous hébergeons le protocole OpenFlow dans les points d'accès pour nous débarrasser des commutateurs OpenFlow et minimiser davantage les délais.

Le tableau 10 montre les différents protocoles utilisés pour la réalisation du HO entre WiFi et WiMAX ou l'inverse, à différents niveaux, qui sont présentés par le modèle OSI, pour gérer la mobilité des nœuds de nos expériences.

Protocole Utilisé pour HO	Niveau de la couche	Paramètres Significatifs [21]
Session Initiation Protocol (SIP) [148]	Couche Session	- Préférence utilisateurs - Alerte de sécurité - Information sur le contexte - Paramètre de QoS
Media Independent Handover (MIH)	Entre la couche Liaison et la couche Réseau	- Puissance du signal - Paramètre de la sous couche MAC - Autre paramètres qui peut être extraits des services MIH comme le MIES, MICS et MIIS.
Stream Control Transmission Protocol (SCTP)	Couche Transport	- Charge réseau (Load) - Topologie du réseau et les informations sur le routage
Mobile IP et ses variantes (MIPv6, FMIPv6, HMIPv6)	Couche Réseau	- Agent externe disponible - Configuration réseau et pré-authentification
Fast Base Station Switching (FBSS) [170]	Couche Liaison	- État des liens - Paramètres des liens - Condition d'accès radio
Cross Layer [149]	Peut-être à différents niveaux	- Paramètre de QoS - Authentication - Puissance du signal

Tableau 10: Protocoles utilisés pour la réalisation du HO entre WiFi et WiMAX

L'organigramme 26 présente les différents processus effectués par le terminal mobile pour la prise de décision du Handover d'un point d'accès WiFi vers une station de base WiMAX ou

l'inverse, dans les deux cas, la puissance de signal radio RSS sont mesurés à des intervalles de temps réguliers avec une valeur de moyenne MRSS [151], qui est calculée pour chaque signal RSS au niveau de contrôleur SDN.

Considérant d'abord le cas où le terminal mobile s'approche du point d'accès. Si la valeur calculée du MRSS est inférieure ou égale la sensibilité du récepteur (R), cela signifie que le terminal mobile a déjà quitté la zone de réception WiFi. Dans ce cas, le Handover du WiFi vers la zone de couverture de WiMAX, le Handover est immédiatement déclenché par le contrôleur SDN. En revanche, si la valeur MRSS dépasse la sensibilité du récepteur du WiMAX, la position et la vitesse actuelle du terminal mobile sont calculées. Ces deux valeurs permettent de déterminer le temps restant avant que le terminal ne franchisse la frontière de réception WiFi, cela signifie que le terminal mobile est déjà dans la zone de réception. Dans ce cas, le Handover initie du WiMAX au WiFi. Le contrôleur SDN permet de garantir la réussite du Handover entre le réseau WiMAX et WiFi.

Notre algorithme permet d'évaluer et améliorer les performances du temps d'exécution de Handover vertical afin de réduire le délai de bout en bout, la gigue, les paquets perdus lors du Handover, et le temps d'exécution du Handover ce qui augmente le débit, entre le WiFi et le WiMAX.

La distance de réception maximale pour le réseau WiFi se produit lorsque l'affaiblissement au trajet, est égal à la différence entre la puissance d'émission et la sensibilité du récepteur.

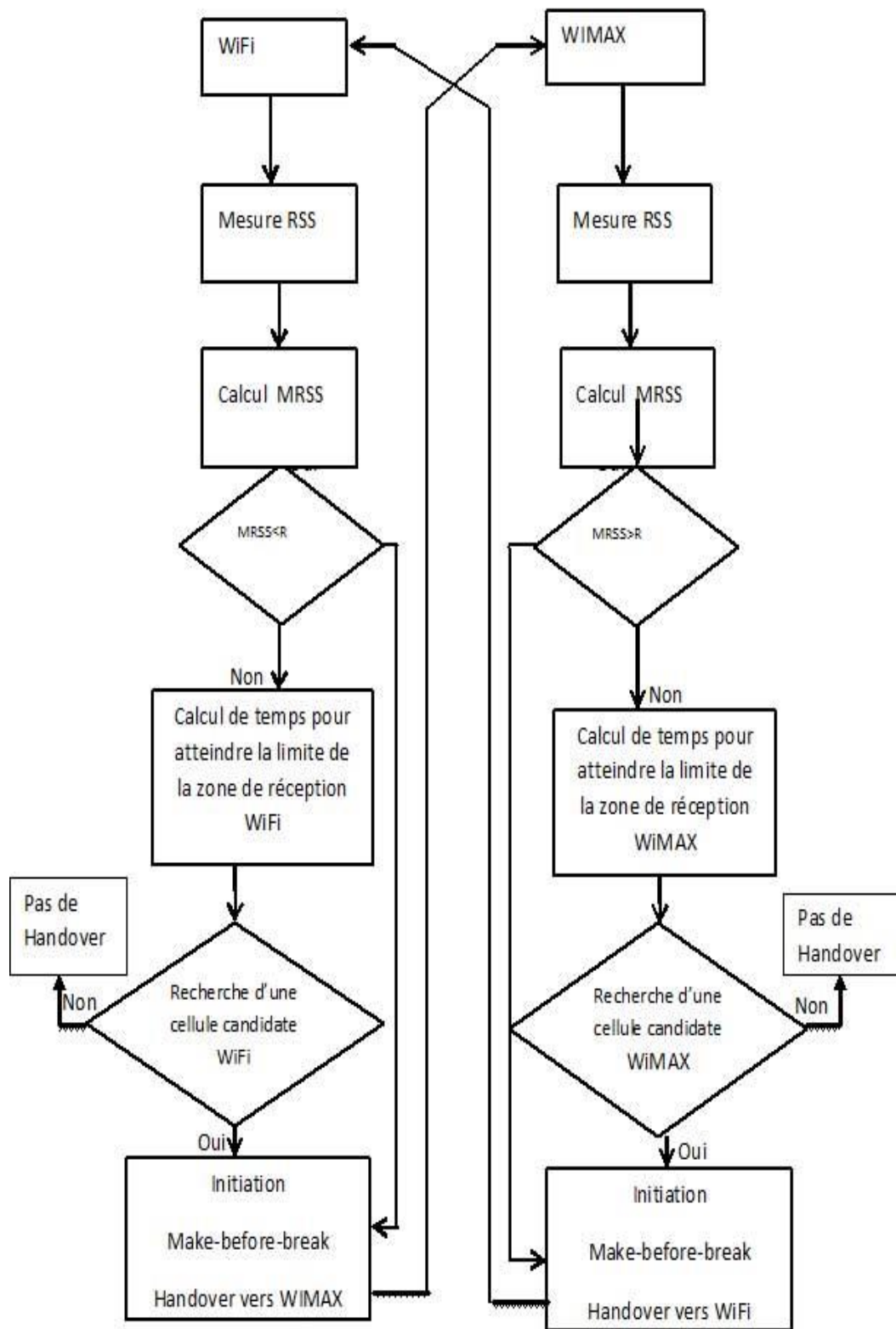


Figure 26: Organigramme de l'algorithme de Handover vertical proposé

Les paquets reçus du client seront transmis d'un côté à l'autre. La décision de transmettre ou non, un paquet est prise en consultant les tables des flux, qui sont gérées par le contrôleur via l'interface OpenFlow. Si le point d'accès activé par OpenFlow ne trouve aucune règle correspondante dans la table de flux d'un paquet, il demande au contrôleur de traiter le paquet.

Le contrôleur SDN coordonne la transmission entre les points d'accès, pour réduire les conflits et la retransmission.

## VII. Synthèse et analyse des critères d'évaluation des performances

Cette partie présente une synthèse des résultats de l'évaluation des performances des réseaux "WiFi et WiMAX", avant et après l'intégration de notre approche et le débarras du commutateur OpenFlow, avec centralisation de son rôle au niveau du AP. Nous évaluons aussi le temps d'exécution du Handover entre les cellules WiFi et WiMAX pour montrer l'apport de notre approche.

Les simulations sont réalisées par OMNeT4.6 ++, pour évaluer:

- le délai de bout en bout;
- le débit;
- la gigue;
- paquets perdus lors du Handover;
- temps d'exécution du Handover entre WiMAX et WiFi;

## VIII. Description des expériences

Dans les scénarios de nos expériences, les clients WiMAX sont équipés d'un récepteur CPE (Customer Premise Equipment) [152]. La transmission est en mode NLOS (No Line of Sight).

Pour montrer les performances de notre proposition, qui consiste à utiliser un contrôleur SDN, nous effectuons deux expériences permettant de vérifier le temps d'exécution du Handover vertical. Une première expérience a été faite sans SDN alors que l'autre est réalisé en introduisant le contrôleur SDN et déploiement d'un AP-OF avec le débarras de switch OpenFlow.

Le type du trafic utilisé dans nos expériences de simulation est VOIP, OMNeT4.6++ nous permet de créer une topologie de réseau qui simule bien l'état réel en déterminant le rayon de la zone de couverture, le type de l'antenne, la fréquence désirée et le modèle de la propagation radio. Chaque simulation sera répétée plusieurs fois, et le résultat final sera la moyenne de l'ensemble des simulations.

Pour le réseau WiFi, nous avons utilisé la zone de couverture de 150 mètres, la fréquence désirée est 2,4 GHz, le modèle de la propagation radio de type "TwoRayGround", seuil de détection (CXTresh) de  $1.058.13 \text{ e-}10 \text{ W}$ , et pour le seuil de réception (RXThresh) est  $1.058.13 \text{ e-}10 \text{ W}$ , une puissance du signal de  $0.030 \text{ W}$ , et la sensibilité de récepteur est  $-85 \text{ dB}$ .

Pour le réseau WiMAX, nous avons utilisé la zone de couverture de 2000 mètres, la fréquence désirée est 3,5 GHz, le modèle de la propagation radio de type "TwoRayGround", seuil de détection (CXTresh) de  $2.4 \text{ e-}11 \text{ W}$ , et pour le seuil de réception (RXThresh) est  $3\text{e-}11 \text{ W}$ , avec une puissance du signal de  $40 \text{ W}$ , et la sensibilité de récepteur est  $-1001,07 \text{ dB}$ .

La trajectoire est définie comme suit:

- Pour le réseau WiMAX, la vitesse de mobilité est fixée à 20 km /heure;
- Deux mètres par seconde dans un réseau WiFi;

Par défaut, les points d'accès sont stationnaires (StationaryMobility), mais ils peuvent également être configurés par le paramètre MobilityType.

**Expérience 1:** Evaluation du temps d'exécution vertical entre WiFi et WiMAX sans SDN: Nous avons déployé dans cette expérience 03 points d'accès, 07 Clients WiFi, 07 Clients WiMAX, et 03 BS (figure 27)

**Expérience 2:** Amélioration du temps d'exécution vertical entre WiFi et WiMAX avec SDN: Nous avons utilisés dans cette expérience 03 points d'accès OpenFlow, 07 Clients WiFi, 07 Clients WiMAX, et 03 BS, 02 contrôleurs SDN, 01 commutateur OpenFlow (figure 30)

## IX. Résultats de simulation

Notre environnement est hétérogène, il est constitué des points d'accès Wi-Fi (AP) et des stations de base (BS) WiMAX, le terminal mobile selon la première expérience (Handover de Wi-Fi et WiMAX sans SDN, se dirige vers le centre de la zone de couverture de la station de base WiMAX (BS) et arrive à la limite de la zone de couverture de ce point d'accès. Ce processus provoque l'émergence, par MIH, d'un évènement "Link\_Going\_Down" annonçant le besoin de changer le réseau. Puisque le seul réseau disponible est le WiMAX, le noeud mobile va se connecter à ce dernier.

Les figures 27, 30, 31, 32, 33, 34 et 35 présentent les résultats des expériences.

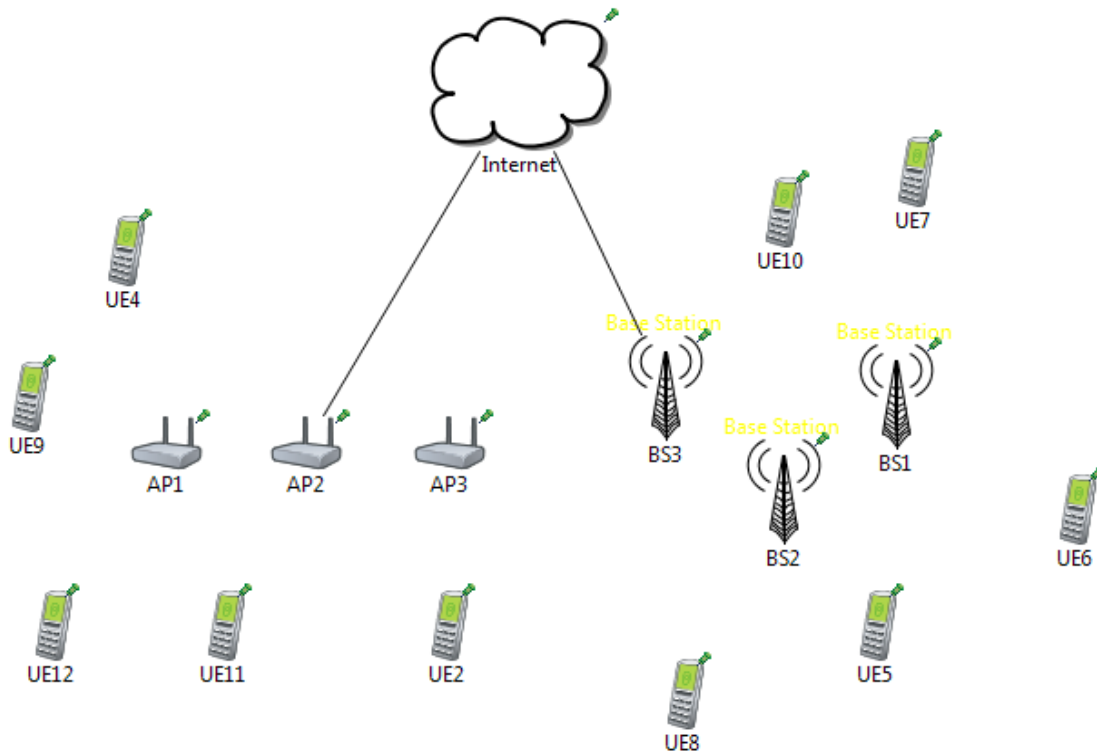


Figure 27: Handover Vertical et horizontale entre Wi-Fi et WiMAX sans SDN

Le processus de Handover se fait à travers 3 phases comme l'indique la figure 28.

### Phase I: Initiation du Handover et collecte d'informations

Le processus de Handover commencer quand un noeud mobile quitte son point d'attachement au réseau courant pour aller se connecter sur un autre réseau où la qualité de service sera



meilleure. Généralement, la raison peut être une faible puissance du signal ou bien une valeur d'un ou de plusieurs paramètres de la qualité de service qui tombent en dessous d'un certain seuil. Durant cette phase, le noeud mobile scrute d'une façon continue, les réseaux dans son entourage en collectant les paramètres à savoir RSS, BER, SINR.

### Phase II: Sélection du réseau destination

Durant cette phase, les informations qui ont été collectées de la phase précédente vont être compilées pour choisir un réseau parmi plusieurs disponibles dans l'environnement du mobile. Le mécanisme de sélection d'un nouveau réseau est laissé au choix de l'utilisateur.

### Phase III: Exécution du Handover

Dans la phase précédente, nous avons choisi le réseau auquel le mobile doit se connecter. Durant cette phase, l'exécution de la coupure des liens avec l'ancien réseau et la connexion avec le nouveau réseau est réalisée. Cette exécution peut se faire selon l'un des 4 cas suivant:

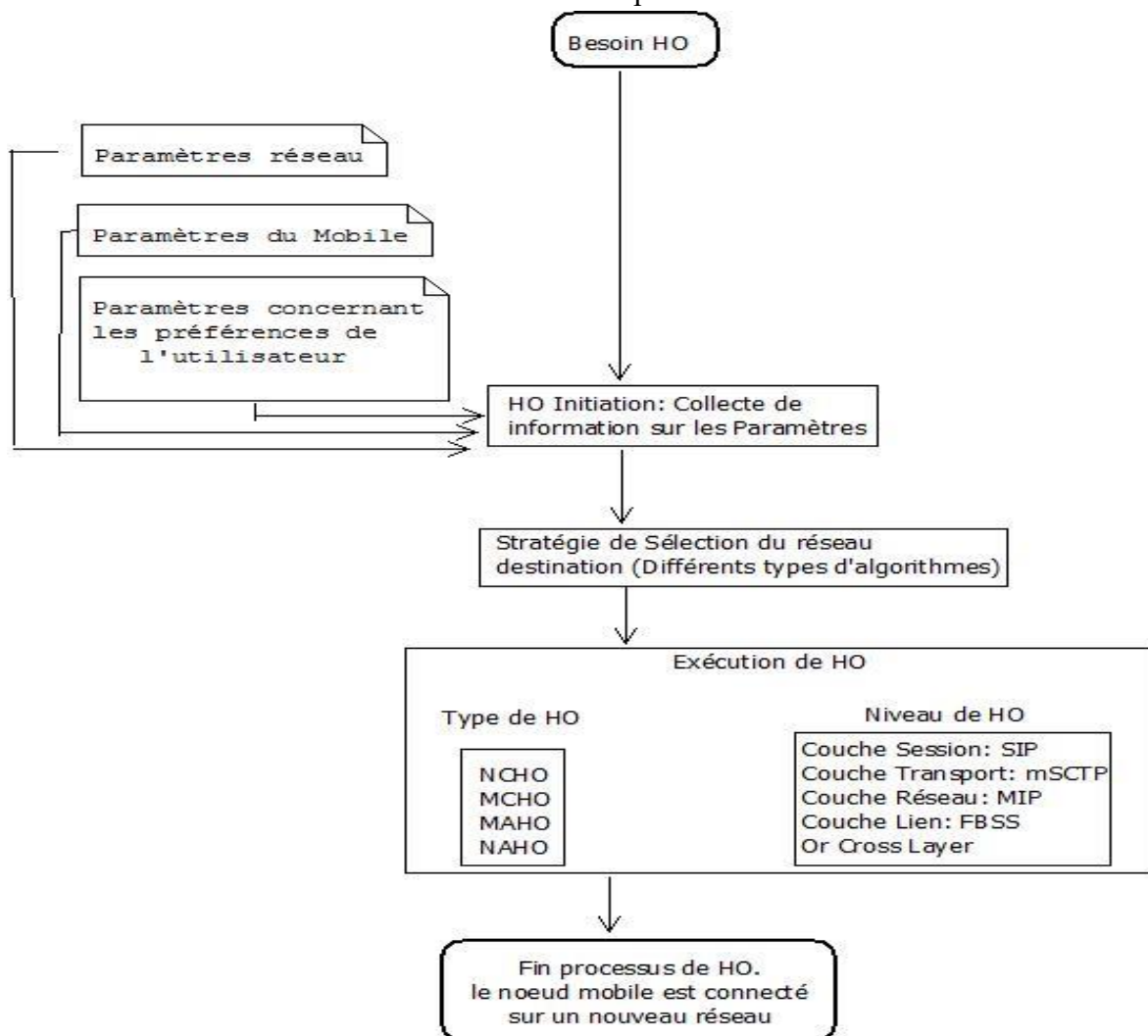


Figure 28:Processus du Handover vertical entre les réseaux WiMAX et WiFi

- 1- Décision contrôlée par le réseau NCHO habituellement utilisé par les opérateurs pour répartir les charges réseaux.
- 2- Décision contrôlée par le terminal mobile MCHO.
- 3- Handover initié par le réseau et assisté par le mobile (MAHO).

4- Handover lancé par le terminal mobile et assisté par le réseau NAHO (Networks Assisted Handover) [153].

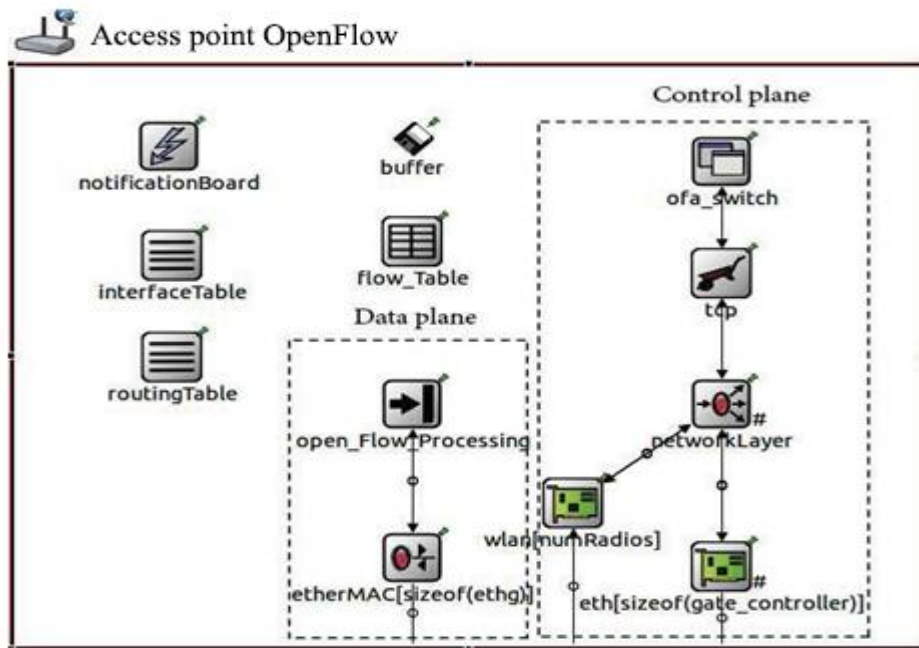


Figure 29: Point d'accès OpenFlow

Dans notre recherche on s'intéresse à la gestion de la mobilité assistée par le contrôleur, (par le réseau), ce dernier se base sur notre algorithme qui permet de sélectionner les stations de base candidates, puis les mettre dans une liste, après le contrôleur s'appuie sur la puissance la plus forte, pour choisir quel type de Handover à déclencher, pour faciliter la communication entre les terminaux et les points d'accès directement sans passer par le commutateur OpenFlow, car nous avons intégré le protocole OpenFlow au niveau de Point d'Accès (figure 29).

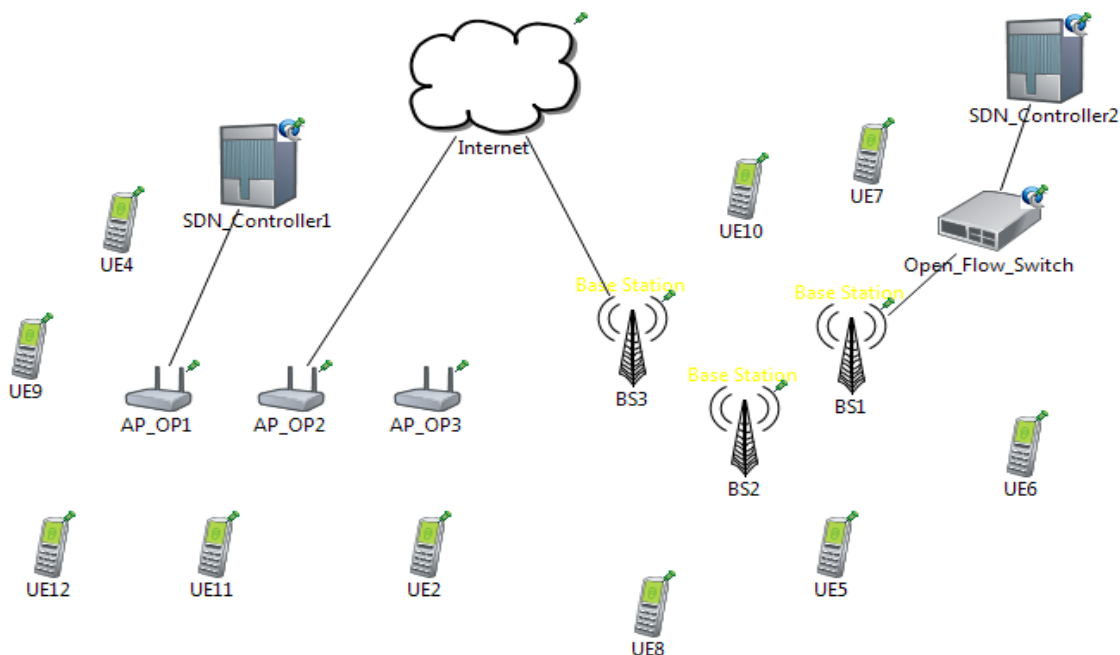


Figure 30: Handover Vertical entre Wi-Fi et WiMAX avec SDN

Dans le cas du Handover horizontale, le terminal mobile reçoit le message qui contient les informations du nouvel point d'attachement qui offre le meilleur service et le plus proche, après l'exécution de l'algorithme au niveau du contrôleur, aussi l'authentification est totalement permise par ce dernier.

L'architecture INET Framework pour les réseaux sans fil (module composite d'interface IEEE 802.11) est divisée en quatre sous-modules [154]:

**Agent:** la couche de gestion d'effectuer l'analyse, l'authentification et l'association, puis déclenche le transfert.

**Gestion:** effectue l'association et la dissociation avec les points d'accès, le balayage des canaux.

**MAC:** transmet et reçoit des trames conformément à la procédure d'accès au support IEEE 802.11.

**Radio:** traite la modélisation, la transmission et la réception des trames.

Pour un point d'accès sans fil, seuls les trois derniers sous-modules sont trouvés.

#### a. Impact de SDN sur Handover dans le contexte de grande vitesse

La figure 31 montre une amélioration des performances de nombre des paquets perdus entre les expériences WiFi et WiMAX à travers déploiement du protocole OpenFlow dans AP, et l'intégration de l'approche SDN.

Nous trouvons que SDWN permet de réduire le taux de perte des paquets même avec l'augmentation de la vitesse lors du Handover entre WiFi et WiMAX.

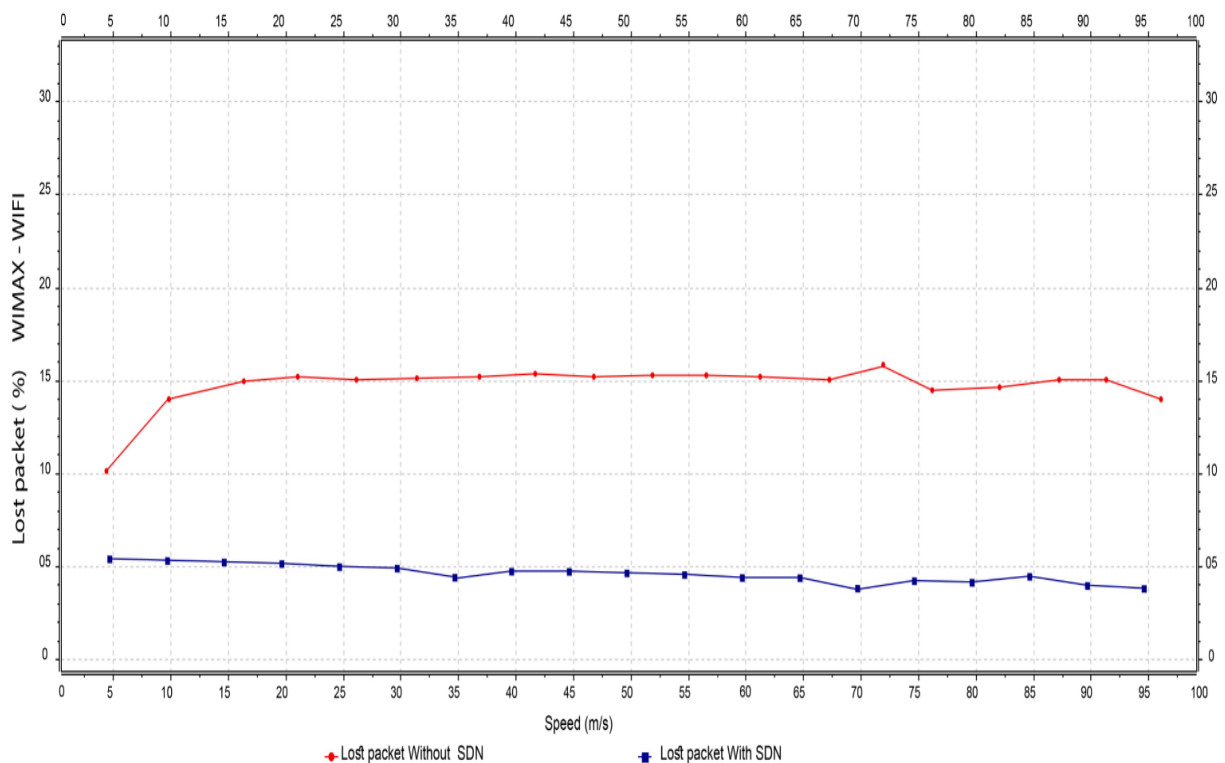


Figure 31: Paquets perdus lors du HO WiFi-WiMAX avec et sans SDN

La charge de traitement sera déléguée au contrôleur qui indiquera aux autres appareils la façon de transporter le trafic, le contrôle du réseau devient directement programmable, via des

points d'accès intégrant la fonction switch compatible avec le protocole OpenFlow, qui est responsable de la mise à jour de ses tables des flux, ce qui permet un gain de 10%.

### b. Temps d'exécution de Handover entre WiMAX et WiFi

La figure 32 présente le temps d'exécution entre les expériences WiFi et WiMAX.

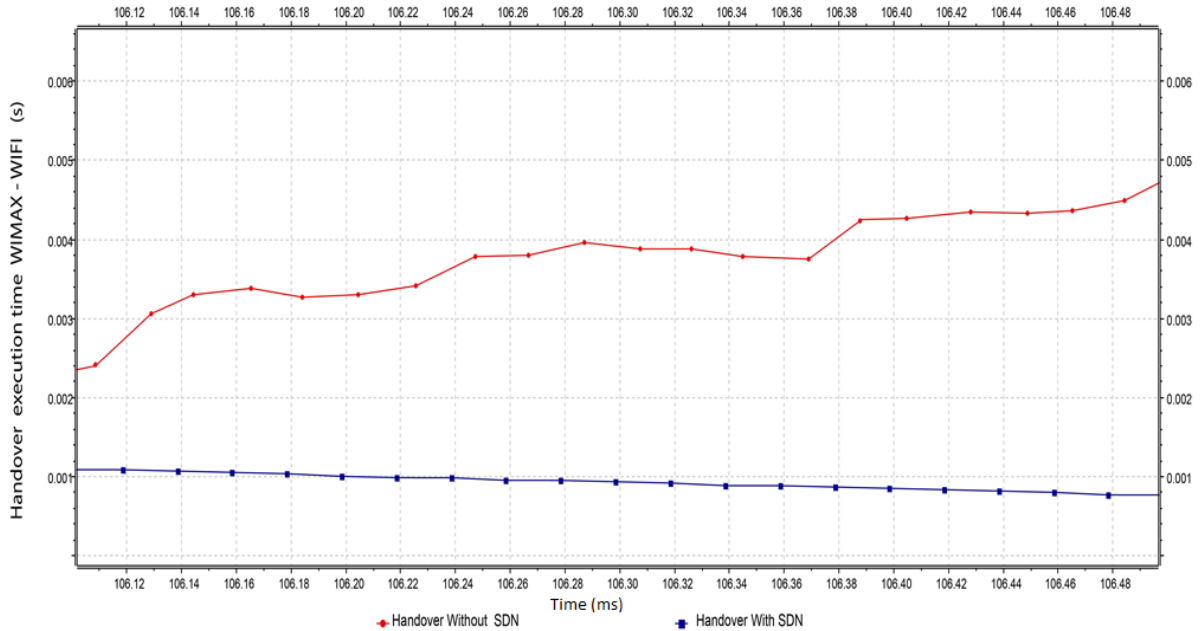


Figure 32: Temps d'exécution du Handover entre les réseaux WiFi et WiMAX avec et sans SDN

Nous observons que l'intégration de l'approche SDWN entre les points d'accès WiFi et les stations de base WiMAX a permis de diminuer le temps d'exécution de Handover avec un gain de 40%.

### c. Amélioration du délai de bout en bout entre le WiFi et WiMAX

La figure 33 présente l'évaluation du délai de transmission de tous les paquets reçus par les MAC de WiMAX ou de WiFi de tous les nœuds du réseau, avec et sans SDN.

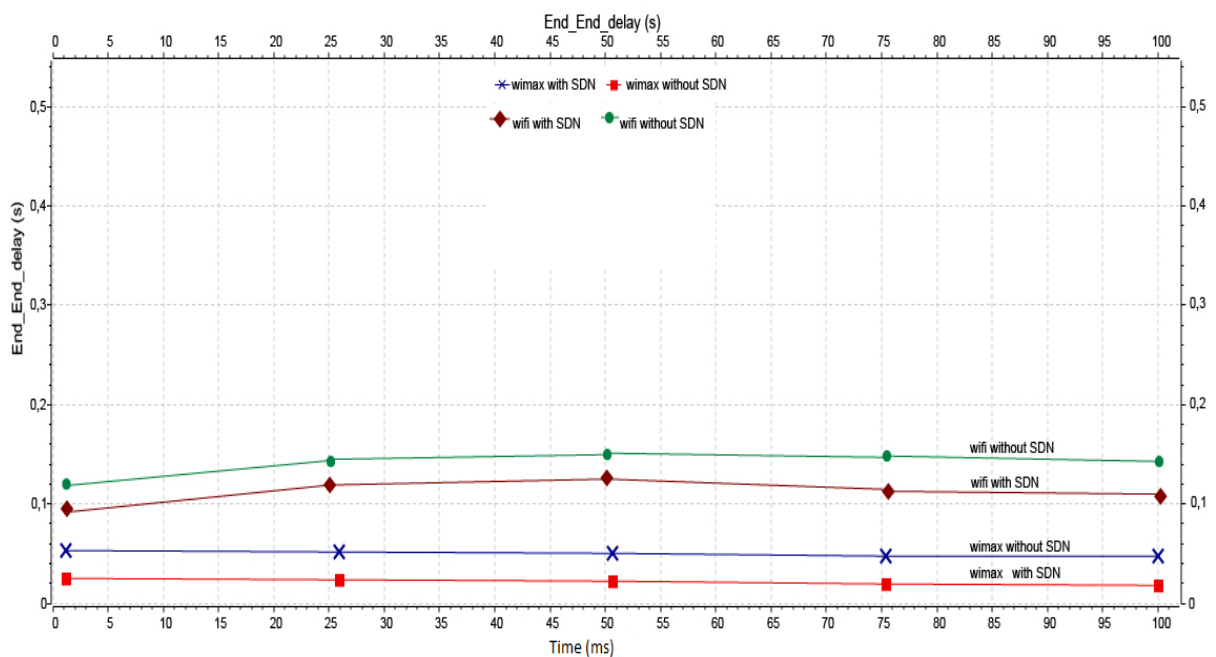


Figure 33: Délai de bout en bout dans les réseaux WiFi et WiMAX avec et sans SDN

Nous remarquons que le délai de transmission dans le réseau SDWN est faible par 20% que celui exigé entre le réseau WiFi et WiMAX sans SDN.

#### d. Amélioration des débits entre le WiFi et WiMAX

La figure 34 présente une évaluation des débits offerts par le WiMAX et WiFi. Nous constatons qu'une amélioration des débits de 20% par l'intégration de l'approche SDWN entre les deux réseaux.

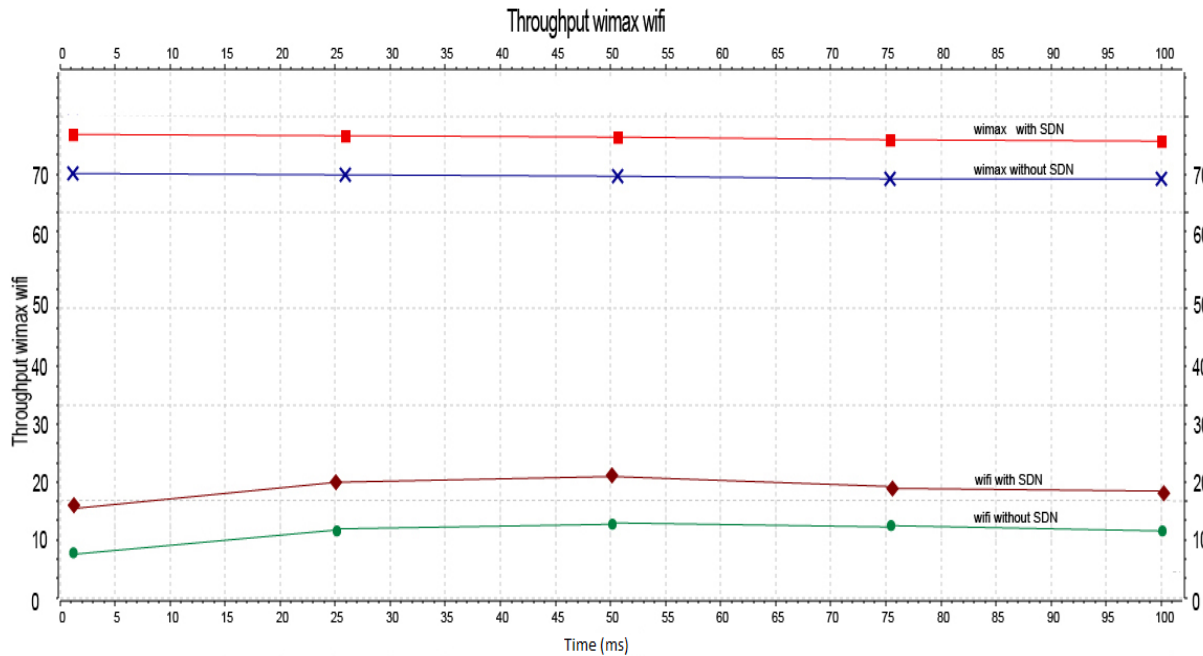


Figure 34: Débit offert dans les réseaux WiFi et WiMAX avec et sans SDN

#### e. Amélioration de la gigue entre les réseaux WiFi et WiMAX

La gigue offerte par les réseaux WiMAX et WiFi dans la figure 35 avec l'utilisation de SDWN a été améliorée par 10% par rapport à sans SDN.

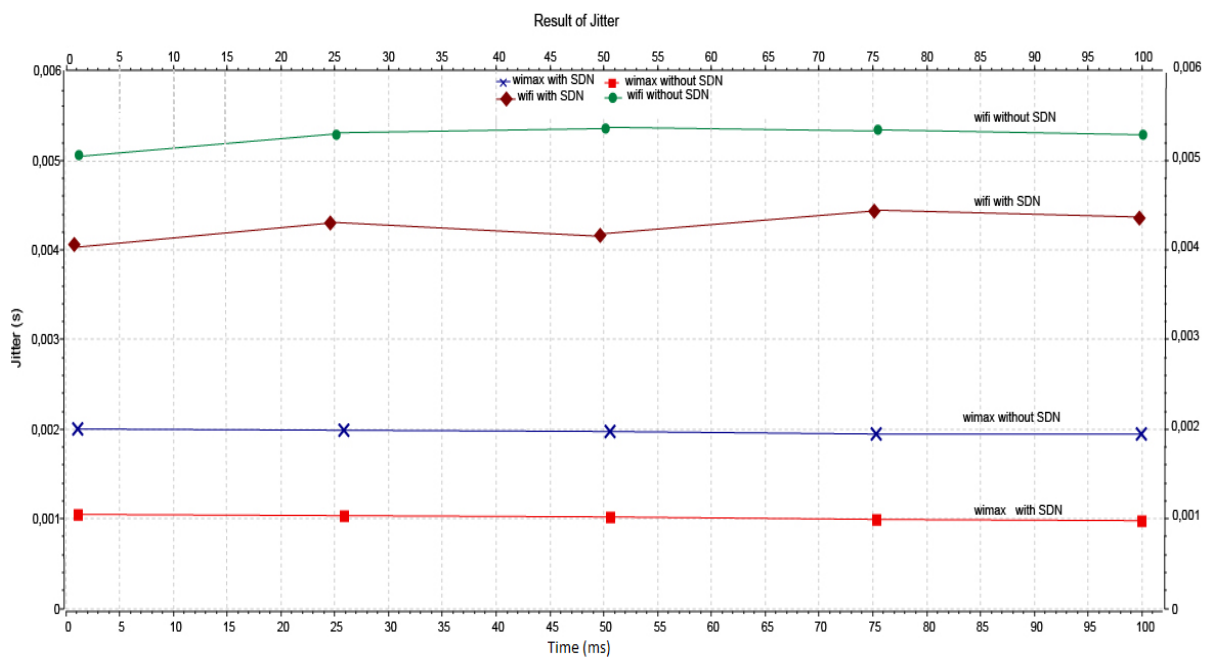


Figure 35: Gigue dans les réseaux WiFi et WiMAX avec et sans SDN

## **X. Discussion des résultats**

Les écarts des performances entre les stations de base WiMAX et la zone de couverture de WiFi sans SDN et avec SDWN sont dû à la capacité de transmission du contrôleur SDN, parce que ce dernier décide en avance quels sont les points d'accès et les stations de base qui ont le signal le plus fort, ce qui améliore les performances du Handover vertical dans les réseaux sans fil, car notre algorithme permet de collecter les informations sur les cellules candidates, qui ont le RSS le meilleur, ce qui facilite les tâches sur le contrôleur pour choisir directement le réseau de destination le plus proche. Aussi notre point d'accès qui intègre le protocole OpenFlow contient déjà le plan de données, ce qui réduit la charge de traitement par le réseau.

### ***Conclusion***

Ce chapitre a présenté un apport de l'approche SDN dans l'amélioration du Handover entre cellule WiMAX et WiFi, via l'implémentation et déploiement d'un nouvel algorithme de transfert intercellulaire sans fil basé sur RSS utilisant OMNeT4.6++, cet algorithme est mieux placé pour anticiper et initier la mobilité de manière centralisée avant qui ne soit requise, en réduisant le temps requis pour l'authentification du terminal mobile, cela inclurait l'identification et la configuration des connexions sans fil au prochain point d'accès avant le processus de transfert effectif.

Parallèlement nous avons déployé un AP qui intègre le protocole OpenFlow et communique avec le contrôleur avec un débarras du commutateur OpenFlow, ce qui réduit les messages de signalisation, le coût matériel du switch OpenFlow, le retard lié au changement du AP vers le commutateur.

La gestion centralisée du Handover au niveau du contrôleur SDN a permis de réduire le temps d'exécution de ces réseaux de points de vue débit, latence, gigue, aussi le taux de réussite du Handover entre WiMAX et WiFi a été amélioré.

Un contrôleur SDN s'occupe de déclencher d'une manière intelligente le Handover basant sur les protocoles MIH, et MIP suivant les paramètres inspectés du réseau pour équilibrer la charge, et améliorer la QoS.

L'intégration de l'approche SDWN dans les réseaux WiMAX et WiFi a amélioré les performances en réduisant le temps requis pour l'authentification du terminal mobile au contrôleur.

Nous déployons dans le chapitre suivant, l'approche SDN pour l'amélioration de Handover dans les réseaux de nouvelle génération 3G, 4G et 5G.

## **Chapitre IV : Apport de l'approche SDN dans l'amélioration du Handover dans les réseaux cellulaires 3G, 4G et 5G**

## ***Introduction***

Les environnements mobiles se caractérisent par la présence de plusieurs noeuds portables ayant chacun un ou plusieurs moyens de communication. Les interfaces de communication permettent aux noeuds de se déplacer et de communiquer entre eux avec des stations fixes. Ces environnements présentent de grandes différences par rapport aux environnements traditionnels (fixes), les noeuds portables disposent de ressources moins importantes par rapport à celles qu'offrent les stations fixes. On affiche un désir de la part des utilisateurs à bénéficier d'un accès Internet sans discontinuité de leurs applications réseaux usuelles lors de leurs déplacements, de sorte à disposer du niveau de qualité de service souhaité.

Lorsqu'un terminal mobile en train de quitter la zone de couverture de la cellule source vers la cellule de destination, un transfert d'appel se produit, si la cellule serveuse ne peut pas soutenir l'appel, alors le transfert échouera et la communication sera perdue, par conséquent l'échec du Handover à cause de l'absence des ressources dans la nouvelle cellule.

Nous proposons un algorithme de prise de décision du Handover, qui permet d'identifier en avance les cellules candidates disponibles dans l'entourage du terminal mobile, et le choix d'une seule cellule parmi plusieurs à travers l'intégration de l'approche SDN, en se basant sur RSS le plus fort.

## **I. Etat de l'art**

La première génération analogique de téléphones mobiles ou 1G (First Generation) [155] voit le jour vers 1980, et introduits sur le marché par Motorola [156]. Au début des années 1990, les téléphones de la deuxième génération 2G (Second Generation) [157] fut développés avec une évolution vers les réseaux numériques. Les débits des échanges de données pour ces téléphones étaient bien inférieurs à 1000 bits par seconde (bps), mais des améliorations significatives en termes de performance ont été introduites en 2000 avec la génération « 2,5G » [158]. Après la troisième génération 3G (Third Generation) [159] est apparue très connue par UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) [160], avec des débits de 2 à 42 Mb/s [161]. L'amélioration était considérable, puisqu'il devenait possible de transmettre des appels vidéos et de fournir des connexions internet avec des vitesses raisonnables en 3.5G [162] Vers 2009, 3.9G [163] en 2012, puis la technologie 4G envisagée depuis 2004 [164] par l'organisme 3GPP (3rd Generation Partnership Project), qui est un projet de collaboration entre différents organismes et groupes de recherche en télécommunications. Son rôle est de normaliser la communication de la téléphonie mobile entre différents standards et ceci à l'échelle mondiale. Enfin, actuellement c'est la Cinquième Génération 5G (Fifth Generation) qui commence à être déployé en Chine et dans plusieurs pays du monde pour répondre aux besoins importants en volumes de trafic généré par les nouveaux services et les applications. Le réseau 5G [165] fournira l'infrastructure de base pour les nouveaux appareils avec des modèles de trafic moins prévisibles, qui rejoignent le réseau, car la 5G contient des nombreuses fonctionnalités de gestion, telles que la vitesse, la capacité et la réduction de la latence. Il permet aux opérateurs mobiles de créer plusieurs réseaux virtuels dans un seul réseau physique 5G [166]. Dernièrement, on parle déjà de la technologie du futur à savoir la 6G [167], encours de développement par le Korea Herald.

Beaucoup de travaux de recherches ont étudiés en profondeur le comportement de Handover, Vidales et al [168] décrivent la conception et le déploiement d'une maquette pour



examiner l'intégration des réseaux sans fils hétérogènes en utilisant IP Networking Framework. Tandis que Salsano et al [169] proposent une solution de gestion de mobilité basée sur le Protocol SIP. Le but de ce dernier était de fournir un service de voie continu dans un scénario de réseaux hétérogènes (IEEE 802.11 et 3G). Par ailleurs, dans le but d'assurer un Handover sans coupure entre les réseaux UMTS, les auteurs de [170] ont proposé une solution basée sur le protocole SCTP (Stream Control Transmission Protocol). Chang [171] décrit des expériences de système de mobilité se basant sur le protocole Mobile IP. Ainsi donc, partant de la comparaison sur les solutions de Handover proposées, nous constatons qu'il n'y a pas assez de papiers qui se sont intéressés à l'étude des performances du Handover.

## II. Réseaux Mobiles à haut débit

### II.1 Troisième Génération (3G)

La 3G est une norme unifiée au niveau mondial avec une compatibilité avec les réseaux de deuxième génération (2G). Elle permet des améliorations de la 2G en termes de débit de transmission pour atteindre 144 kb/s avec une couverture totale et une utilisation nomade de 384 kb/s avec une couverture moyenne pour une utilisation piétonne. En outre, les débits peuvent atteindre jusqu'à 4 Mb/s avec une zone de couverture réduite pour une utilisation fixe. La 3G utilise une nouvelle bande de hautes fréquences, comprises entre 1885 et 2025 MHz et d'autre part entre 2110 et 2200 MHz.

#### II.1.1 Architecture globale de 3G

L'architecture 3G (figure 36) comprend trois composants fonctionnels essentiels à savoir le réseau cœur CN (Core Networks) [172], le réseau d'accès radio terrestre 3G UTRAN (Universal Terrestrial Radio Access Networks) [173] et le terminal mobile ou l'équipement utilisateur(UE).

**Réseau cœur CN (Core Networks):** assure la connexion avec les autres réseaux tels que les réseaux téléphonique, réseau GSM, réseau RNIS [174], etc, il permet la prise en charge des services de communication 3G; il gère également les informations de localisation des noeuds mobile et se compose de trois parties comprenant deux zones:

- **Domain PS (Packet Switched)** [175]: permet la commutation des paquets et, composé de plusieurs modules notamment:

-- *Serving GPRS Support Node (SGSN)* [176]: responsable de l'enregistrement des utilisateurs dans une zone géographique sous une zone de routage (RA).

-- *Gateway GPRS Support Node (GGSN)* [177]: est une passerelle pour le service des paquets 3G vers les réseaux de données externes, telles que l'Internet.

- **Domaine commuté CS (Circuit Switched)** [178]: utilisé pour établir la communication en mode commutation de circuits, et est composé de plusieurs modules:

-- *Centre de Commutation de Services Mobiles MSC (Mobile Switching Centre)* [179]: chargé d'établir un appel, son rôle est de basculer les données.

-- *Passerelle MSC (GMSC)* [180]: passerelle entre le réseau 3G et le réseau téléphonique public commuté (RTPC). Si l'équipement utilisateur contacte un autre dispositif à partir d'un réseau extérieur au réseau 3G, la communication passe par le GMSC, qui interroge le HLR pour récupérer les informations de l'utilisateur, ensuite, il achemine la communication vers le centre MSC dont l'utilisateur est le destinataire.

-- *Visitor Location Register (VLR)* [181]: base de données, similaire au HLR, rattachée à un ou plusieurs MSC. La VLR stocke l'identité temporaire de l'équipement utilisateur afin d'empêcher l'interception de l'identité d'un utilisateur. Elle est chargée d'enregistrer les utilisateurs dans une zone géographique LA (Location Area).

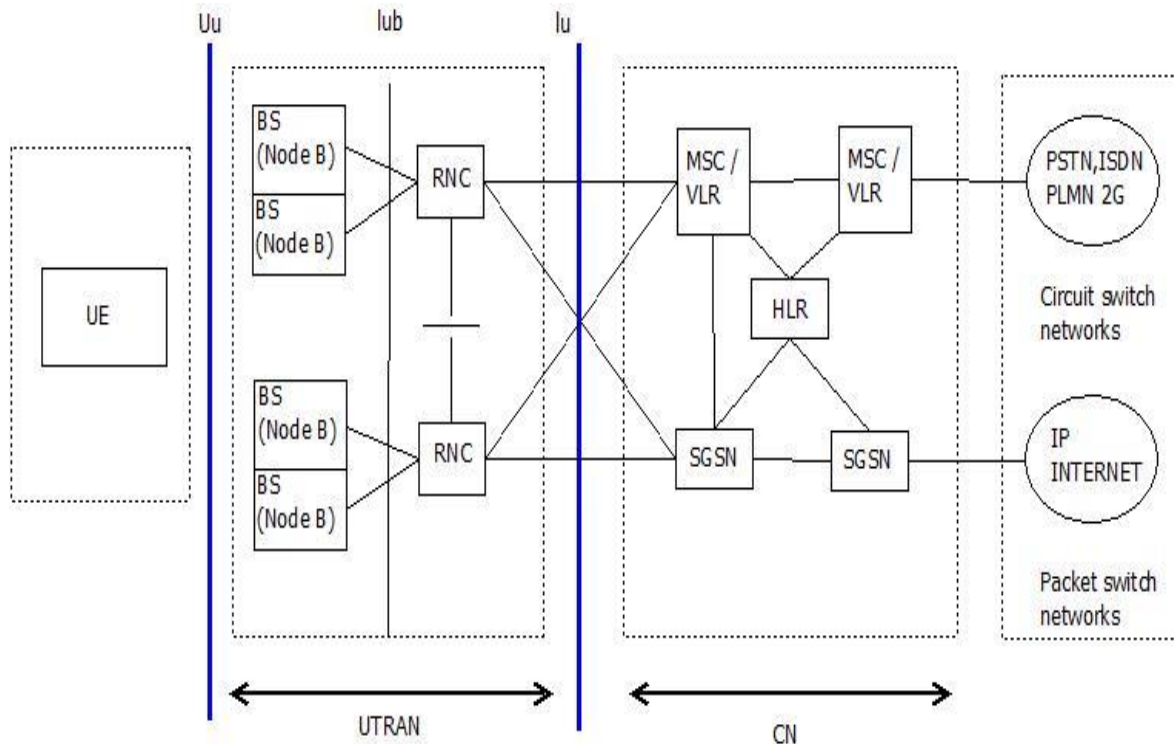


Figure 36: Architecture de la 3G

**Réseau d'Accès Radio UTRAN** [182]: ou bien réseau universel d'accès radio terrestre, il permet plusieurs fonctionnalités notamment le contrôle de la congestion du réseau, l'allocation des ressources radio, la confidentialité, l'intégrité, le transfert, le codage, le décodage des canaux, la synchronisation entre le NodeB et le contrôleur de réseau radio RNC (Radio Networks Controller) [183]. En outre, entre le RNC et le réseau central, sa fonction principale est de transférer les données générées par l'utilisateur. Il joue le rôle d'intermédiaire entre l'équipement utilisateur et le réseau central via les interfaces Uu et Iu [184].

UTRAN est composé de deux entités :

- **NodeB** [185] réparti géographiquement dans tous le pays; il est l'équivalent de la station de base BTS dans le réseau GSM. Il gère la couche physique de l'interface radio, réalise le codage de canal, l'entrelacement, l'adaptation de débit et l'étalement, communique directement avec le terminal mobile sous l'interface Uu, et avec le RNC via l'interface IU. Son rôle principal est de fournir les fonctions de réception et de transmission radio pour une ou plusieurs cellules du réseau d'accès UMTS avec l'équipement utilisateur, cela fonctionne au niveau de la couche physique.
- **Radio Networks Controller (RNC)** permet de gérer les communications entre le NodeB et le réseau central de la 3G. Il est constitué par les points d'accès de tous les services vis-à-vis du cœur de réseau. Il existe deux types de RNCs pour gérer la mobilité de l'UE, lorsqu'il se déplace d'une cellule à l'autre avec des mécanismes de transfert et de macro-diversité:

-- Serving RNC (SRNC) [186]: gère les connexions radio avec le terminal mobile, et assure le rôle de point d'attachement au réseau central via les interfaces IuPS et IuCS [187] et exécute le transfert et le contrôle de puissance.

-- *Drift RNC (DRNC)* [188] permet de gérer d'autres cellules en dehors du SRNC [189], également utilisées par le terminal mobile, pour transférer les données de façon transparente entre le terminal mobile et le SRNC.

**Équipement de l'utilisateur (UE)** est une partie importante de l'architecture globale de 3G, généralement c'est l'appareil de terminal mobile, ou l'interface utilisateur.

## II.2 Quatrième Génération

Le nombre d'utilisateurs de services mobiles est considérablement augmenté, ce qui influence sur la charge de traitement, des interférences inter et intracellulaires, à cause d'un très grand nombre des messages de signalisation et le temps de transfert.

Les réseaux cellulaires de la 4G permettent des améliorations par rapport à la 3G en terme de débit allant jusqu'à 100 Mbits/s, du faible délai de la transmission et d'une meilleure vitesse de mobilité comprise entre 120 et 350 km/h.

### II.2.1 Architecture de la 4G

Les réseaux 4G sont constitués des milliers de cellules radio, qui utilisent les mêmes fréquences, y compris dans les cellules radio mitoyennes, grâce aux codages radio OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) [190] et SC-FDMA (Single Carrier FDMA) [191]. La figure 37 présente l'architecture du réseau 4G.

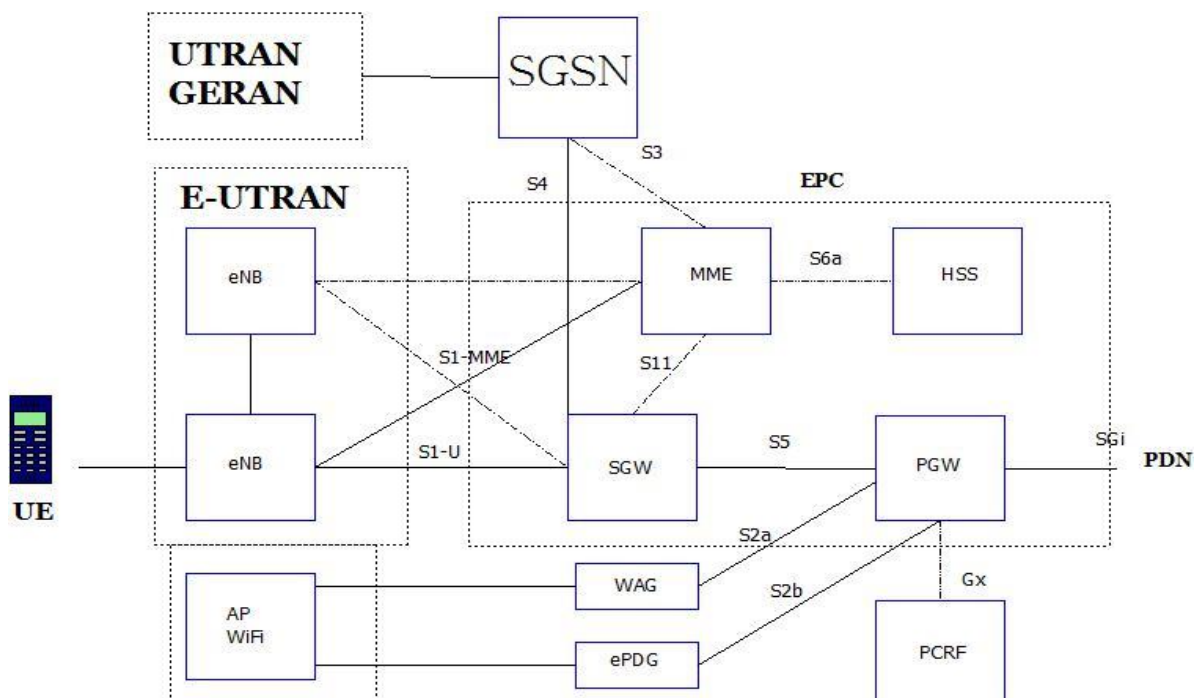


Figure 37: Architecture générale de la 4G

SAE [192] ou l'évolution des architectures des systèmes mobiles est une nouvelle architecture des réseaux cellulaires conçue pour établir une architecture similaire à celle des autres réseaux de communication IP. L'élément principal de cette architecture est le réseau cœur, nommé EPC (Evolved Packet Core) [193].

La partie réseau d'accès radio EUTRAN et la partie cœur réseau EPC forment l'EPS (Evolved Packet System) [194].

- **Réseau cœur EPC** : EPC utilise la technologie « full IP » [195], c'est-à-dire basé sur les protocoles internet pour la signalisation et permet une latence réduite, avec un transport de la voix et des données. Ce réseau permet l'interconnexion via des routeurs avec les autres eNodeB distants, aussi les réseaux des autres opérateurs mobiles et l'internet.

EPC est équivalent au sous-système de réseau NSS (Networks Sub System) [196] dans le réseau GPRS (General Packet Radio Service) [197]. Il se constitue de plusieurs éléments à savoir MME (Mobility Management Entity) [198], SGW (Serving Gateway), PDN-GW (Packet Data Networks Gateway), et PCRF (Policy and Charging Rules Function).

**Mobility Management Entity (MME)**: entité responsable de la communication avec un ensemble de stations de base typiquement d'une même région et qui récupère le profil et les données utilisateurs dans sa zone via l'interface S6A, aussi elle assure la joignabilité du terminal mobile.

**HSS (Home Subscriber Service)** [199]: est une base de données similaire au HLR (Home Location Register) [200] en GSM, et permet de stocker le profil utilisateur (identité, droits de contrôle d'accès, localisation précise des abonnés), via le protocole de signalisation Diameter.

**Packet Data Networks Gateway ou Packet Gateway (PDN-GW)** [201]: est une passerelle du chemin de données entre UE et PDN à trois segments à savoir:

- la porteuse radio entre UE et eNodeB;
- la porteuse de données entre eNodeB et SGW;
- la porteuse de données entre SGW et PGW.

**Policy and Charging Rules Function (PCRF)** [202] est responsable de la décision principale du contrôle, et fournit une QoS d'autorisation pour décider du traitement de données en respectant le profil des utilisateurs, et peut se connecter soit au PGW ou SGW, mais n'est pas les deux en même temps.

**SGW (Serving Gateway)** [203] est la jonction principale entre le réseau radio d'accès et le réseau cœur, et achemine les paquets de données. Il permet la connexion de l'inter-eNodeB Handover, puis inter système HO entre la 4G et GSM/UMTS, il réserve le contexte du terminal mobile, comme les paramètres de la porteuse service et le routage des informations.

**P-GW (Packet-Switch Gateway)** [204] fournit la connectivité au terminal mobile (UE) vers le paquet externe du réseau de l'information, il alloue les adresses IP au UE, ainsi que les applications de la QoS, et maintient la connexion du terminal mobile entre LTE/UMTS/GSM.

**SGSN (Serving GPRS Support Node)** [205] interconnecte la 4G, UMTS, et le réseau GSM pour augmenter la mobilité, et joue le rôle d'un routeur.

- **Réseau Universel Evolué d'Accès Radio Terrestre (eUTRAN)** : eUTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Networks) est simplifiée par rapport à celles des réseaux 2G (BSS) et 3G (UTRAN) [206] par l'intégration de nouvelles stations de base eNodeB et des liens IP reliant les eNodeB entre eux (liens X2), ainsi que les fonctions de contrôle qui étaient auparavant implémentées dans les RNC [207] des réseaux 3G.

Cette partie de l'architecture est responsable de la gestion des ressources radio, de la porteuse, de la compression, de la sécurité et de la connectivité vers le réseau cœur évolué.

Le eUTRAN fait appel à une multitude de eNodeB [208] est une station de base équivalente de la BTS dans le réseau GSM et NodeB dans la 3G.

- **La partie IMS (IP MultiMedia Sub-system)** [209]: est une architecture standardisée, pour les opérateurs de téléphonie, et permet de fournir des services multimédias fixes et mobiles. Cette architecture utilise la technologie VoIP, et utilise des protocoles standards IP, et une session multimédia, qui s'effectue entre deux utilisateurs IMS.

### II.3 Technologie mobile 5G

La technologie 5G permet le développement et l'exploitation d'une capacité massive et d'une connectivité lourde des infrastructures hétérogènes, complexes et puissantes. En conséquence, le réseau devrait être capable de gérer un contexte composé d'un ensemble d'opérations pour prendre en charge un ensemble de services (Villes intelligentes, automatisation industrielle, connectivité machine vers machine (M2M)) [210]. En outre, elle devrait permettre une utilisation flexible et évolutive de tous les spectres non contigus disponibles, et prendre en charge les petites cellules pour le futur accès radio. De ce fait, les principales contraintes de conception de la 5G sont le débit, la latence, la capacité et la consommation énergétique.

#### II.3.1 Architecture 5G

Le réseau 5G se compose d'un nouveau réseau d'accès radio RAN (Next/New Generation Radio Access Networks ou NG-RAN [211], et d'un nouveau réseau cœur NGCN (Next/New Generation Core Networks) [212] (figure 38).

-**Le nouveau réseau cœur 5GC (NGCN):** donne l'accès à des réseaux externes IP (Internet, Intranet, IMS) appelés réseaux de données (data Networks). Aussi, le réseau 5GC est adapté pour la virtualisation du réseau, et s'appuie sur le découpage du plan de contrôle et le plan utilisateur.

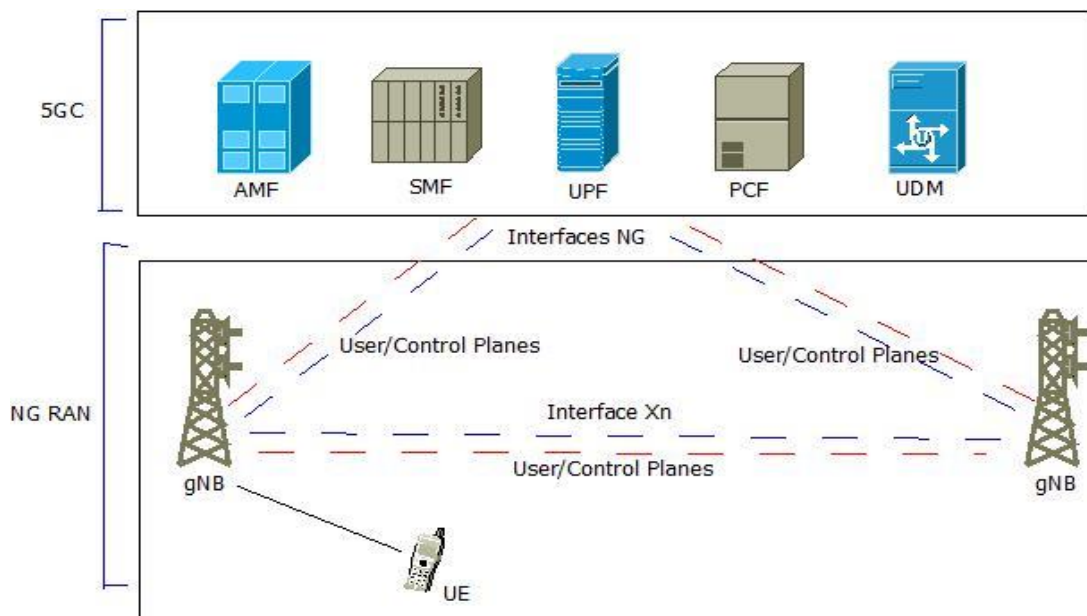


Figure 38: Architecture générale de la 5G

Le 5GC se base aussi sur l'entité AMF (Access and Mobility Management Function) [213] qui établit une connexion avec le terminal mobile pour l'enregistrement et la gestion de la localisation.

De son côté le réseau d'accès radio NG-RAN [214] est constitué des stations de base de nouvelle génération, et connecte les terminaux mobiles avec le réseau cœur (5GC).

En outre, les RANs supportent les interfaces N2 (Plan contrôle) et N3 (Plan usager). Le nouveau radio est basé sur les évolutions de future comme 4G, mmWave WiFi.

L'interface entre les nœuds NG-RAN est dite Xn [215], et interconnecte les stations de base entre elles (gNB [216] et gNB ou gNB [217] et ng-eNB [218], ou ng-eNB [219] et ng-eNB). Elle s'applique notamment à la gestion du transfert d'une cellule afin de limiter les interférences. Il existe deux types de l'interface Xn à savoir Xn-U correspond au plan utilisateur, et Xn-C pour le plan de contrôle.

**gNB (Generation Node Base Station) ou ng-eNB (Next Generation Node Base Station):** est la station de base de la 5G, qui est une évolution d'eNB qui prend en charge la connectivité avec le 5GC. Elle fournit les terminaisons de protocoles des plans utilisateur et le NR (Contrôle New Radio) [220] vers l'UE; aussi elle assure la fonction de gestion de l'accès et de la mobilité AMF et la fonction du plan d'utilisateur UPF (User plane Function) [221].

Par ailleurs, SMF (Session Management Funtion) [222] permet de contrôler les sessions PDN (Packet Data Network) [223] et, est choisie par l'entité AMF, et gère la signalisation avec le terminal mobile. Elle est responsable de la gestion du plan de contrôle. Autrement dit, elle correspond aux entités SGW-C [224] pour simplifier la gestion de la mobilité et mieux gérer l'équilibrage de la charge.

En 5G, PCRF se renomme PCF (Policy Charging Function) [225], et permet de contrôler les flux à la fois au niveau de SMF et AMF afin de pouvoir apporter une meilleure granularité sur les flux autorisés en prenant en compte la localisation du mobile UE [226].

Le profil utilisateur est sauvegardé dans une base de données accessible via UDM (Unified Data Management) [227] qui conserve le profil des sessions de données et de AMF, qui est attachée au terminal mobile UE (éventuellement les entités AMF pour un accès 3GPP et non 3GPP).

L'enregistrement du mobile nécessite une double authentification réalisée au niveau d'AMF et du terminal mobile UE à partir des vecteurs d'authentification fournis par l'entité AUSF (Authentication Server Function) [228].

### II.3.2 Interfaces de l'architecture 5G

L'architecture 5G se constitue de plusieurs interfaces. La figure 38 et le tableau 11 présentent les interfaces de la 5G avec leurs fonctions.

Interfaces de 5G	Fonctions
N1	Point de référence pour le plan de contrôle entre NGRAN et NGCN.
N2	Point de liaison pour le plan de contrôle entre NGRAN et NGCN.
N3	Point d'attachement pour le plan usager entre NGRAN et NGCN.
N6	Interface entre NGCN et le réseau de données (PDN, Packet data Networks).

Tableau 11: Interfaces de l'architecture 5G [229]

## III. Gestion du Handover

Le Handover ou le transfert intercellulaire est un mécanisme fondamental dans les communications mobiles cellulaires (3G, 4G, et 5G). Il désigne l'ensemble des opérations

mises en œuvre pour qu'un noeud puisse changer la cellule radio sans interruption de la conversation ou le transfert de données.

### III.1 Protocoles de gestion de Mobilité

Les protocoles de gestion du Mobilité (figure 39) se composent du protocole MIP (Mobile Internet Protocol IPV6) [230] et son extension NEMO.

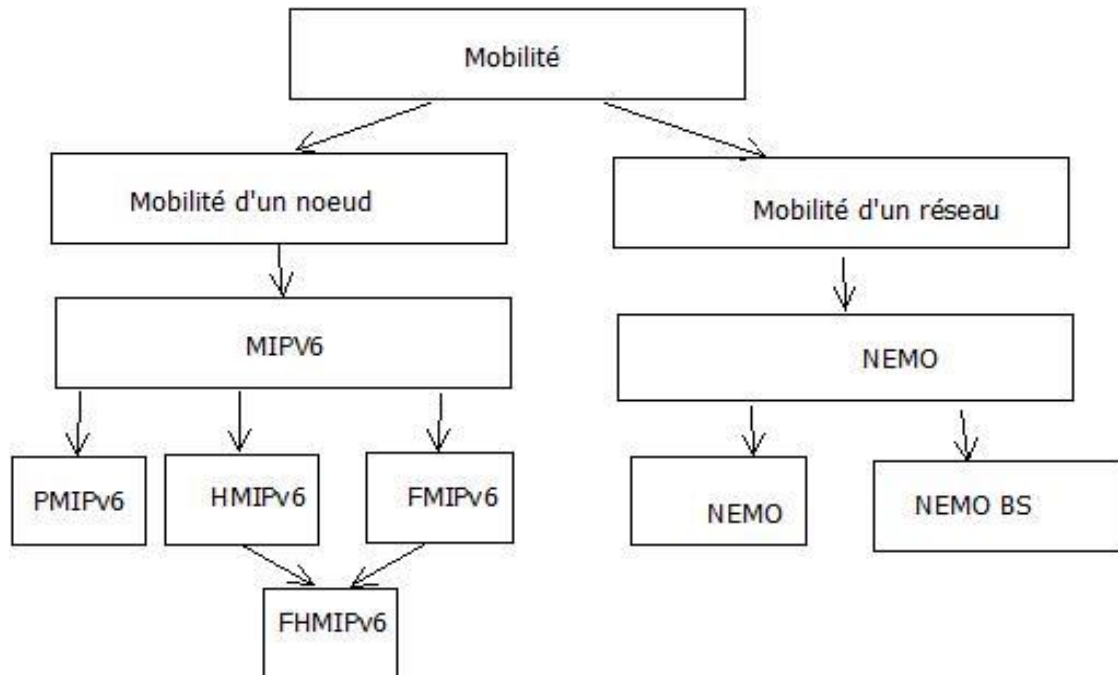


Figure 39: Protocoles de gestion de Mobilité

Le protocole Mobile IPV6 est conçu pour contrôler les mouvements d'un terminal mobile MN (Mobile Node) entre les réseaux d'IPv6. Son objectif est d'offrir une communication directe entre un terminal mobile et ses correspondants et d'éviter les ruptures des communications pendant les déplacements.

### III.2 Protocole IP Mobile

Le protocole IP identifie un terminal mobile sur l'Internet d'une manière unique grâce à son adresse IP. Il est composé de deux parties à savoir: le préfixe qui détermine le réseau sur lequel le noeud se trouve, et l'identifiant de ce noeud sur son réseau. Les routeurs ne stockent que des entrées correspondant à des réseaux en considérant que des paquets destinés à des noeuds ayant le même préfixe seront tous routés de la même manière.

Dans ce contexte, la mobilité du noeud introduit un nouveau problème de routage: le terminal mobile [231] se déplace d'un réseau vers un autre. S'il ne change pas son adresse IP, il aura un préfix différent sur ce nouveau réseau. Cependant, le noeud doit être situé sur un réseau avec le même préfixe indiqué par son adresse IP, afin de pouvoir recevoir les paquets qui lui sont destinés. Pour qu'un MN puisse changer le réseau et garder la connexion à l'Internet, il doit changer l'adresse IP à chaque fois qu'il change du réseau. Mais une fois que le MN change son adresse IP, il ne peut plus conserver les communications en cours au niveau de la couche transport ou les couches supérieures.



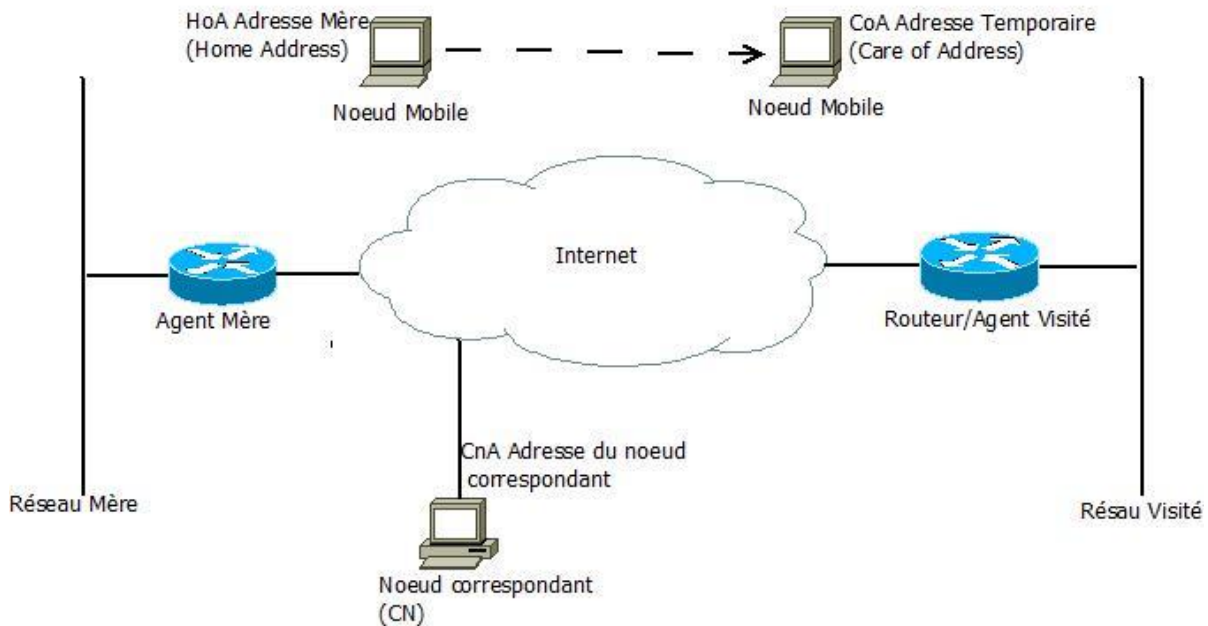


Figure 40: Architecture du protocole IP Mobile

De ce fait, pour qu'un MN puisse maintenir les communications en cours et garder la connexion à l'Internet tout en se déplaçant d'un réseau vers un autre, le protocole IP Mobile propose de gérer la mobilité du MN au niveau IP. Il permet au MN d'utiliser deux adresses IP et un mécanisme de mise à jour d'association BU (Binding Update) [232] pour masquer le changement de l'adresse IP aux applications exécutées entre le MN et ses correspondants. Par conséquent, les communications en cours peuvent être maintenues lorsque le MN change de réseau. Avant d'expliquer le fonctionnement du protocole IP Mobile, nous présentons d'abord son architecture et ses composants (figure 40)

L'architecture IP Mobile se base sur un ensemble de composantes à savoir :

**Terminal mobile MN (Mobile Node)** [233] qui est un noeud qui peut changer le point d'attachement d'un réseau à un autre.

**Adresse Mère HoA (Home Address)** [234] est l'adresse IP du MN sur son réseau mère et qui permet d'identifier le MN de façon unique sur tous les réseaux.

**Adresse Temporaire CoA (Care of Address)** [235] permet de localiser le MN sur un réseau visité afin de lui permettre d'envoyer et de recevoir des paquets sur ce réseau.

**Agent Mère HA (Home Agent)** [236] correspond à un routeur particulier situé dans le réseau mère. Il est chargé d'assurer l'association entre l'adresse mère et l'adresse temporaire du MN lorsque celui-ci est attaché à un réseau visité. Cet agent est également chargé de rediriger les paquets IP à la destination de l'adresse mère du MN vers son adresse temporaire sur son réseau visité.

**Noeud Correspondant CN (Correspondant Node)** [237] qui est un noeud qui communique avec le MN.

**Réseau Mère** qui est un réseau auquel le MN et son HA s'attachent.

**Réseau Visité** qui est un autre réseau que le réseau mère pour un MN. Le MN aura une adresse temporaire quand il s'attache à ce réseau.



**Agent Visité FA (Foreign Agent)** [238] correspond à un routeur du réseau visité auquel le MN est attaché. Il fournit des services de routage au MN, lorsque le MN est enregistré auprès de lui.

### III.2.1 Protocole IPv6 Mobile Hiérarchique

Le protocole IPv6 Mobile Hiérarchique HMIPv6 (Hierarchical Mobile IPv6) [239] est une extension du protocole IPv6 Mobile (RFC 4140). Il est développé par l'INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique) [240] et Ericsson Research [241]. Il a pour objectif de réduire le nombre des messages de signalisation du protocole IPv6 Mobile porté par le Handover de niveau 3. Les messages de signalisation sont ceux de la phase de mise à jour d'association avec le HA, et ceux de la phase de mise à jour d'association avec les CNs. En fait, le protocole HMIPv6 permet de réduire le délai de ces phases, donc de réduire le temps d'interruption des communications entre le MN et le CN. Par conséquent, il améliore les performances de la procédure du Handover de niveau 3 gérée par le protocole IPv6 Mobile.

### III.2.2 Fast Handover pour IPv6 Mobile

Le protocole Fast Handover pour IPv6 Mobile FMIPv6 (Fast Handover for IPv6 Mobile) [242] (RFC 4068), est une extension du protocole IPv6 Mobile, il vise à réduire le délai de la phase de détection du déplacement, aussi de la phase d'Autoconfiguration des adresses ce qui limite la perte de paquets. Il définit des nouveaux mécanismes qui permettent au MN de pouvoir envoyer les paquets dès qu'il s'attache au nouveau réseau et de pouvoir recevoir les paquets dès que son attachement est détecté par le nouveau routeur d'accès NAR (Next Access Router) [243].

Une fois que le MN peut envoyer et recevoir les paquets sur ce nouveau réseau, il procède à la phase de Mise à jour d'association avec le HA et avec les CNs. Pendant cette phase, le MN peut continuer à communiquer avec les CNs via le tunnel bidirectionnel qui est créé par le routeur d'accès précédent PAR (Previous Access Router) [244] entre lui-même et le NAR. Lorsque la procédure du Handover de niveau 3 est achevée, le MN peut communiquer directement avec les CNs et que le tunnel est enlevé. Dans le protocole FMIPv6, le PAR signifie le AR, auquel le MN se connecte en ce moment, et que le NAR signifie le AR, auquel le MN va se connecter.

### III.2.3 Proxy Mobile IPv6

Le protocole PMIPv6 [245] utilise les avantages du protocole IPv6 pour apporter la mobilité aux usagers. Contrairement à MIPv6 qui se base sur les noeuds pour gérer leur mobilité, PMIPv6 se base entièrement sur le réseau, les utilisateurs doivent simplement posséder une pile IPv6 normale. Il est aussi possible d'utiliser PMIPv6 avec certaines parties du réseau en IPv4.

PMIPv6 reprend une grande partie du protocole MIPv6 et introduit un nouveau nœud appelé MAG (Mobile Access Gateway) [246] qui est responsable de la gestion de la mobilité à la place du MN.

### III.2.4 Fast Hierarchical Mobile IPv6

Le protocole FHMIPv6 [247] est proposé par Robert Hsieh, Aruna Seneviratne, Hesham Soliman et Karim El-Malki. Il représente l'union de FMIP et du protocole HMIP. Cette

combinaison combine les avantages du protocole Internet (FMIP et HMIP), qui génère moins de pertes de paquets, avec des délais de transfert plus courts et un meilleur débit. L'opération FHMIPv6 commence par l'anticipation du transfert intercellulaire L2.

### **III.2.5 Mobile IPv6 pour NEMO**

Le groupe NEMO (Networks Mobility) [248] de L'IETF a fait son apparition en octobre 2002. Le groupe a standardisé une solution simple connu sous le nom NEMO BS (Networks Mobility Basic Support) [249] dérivée de Mobile IP pour gérer la mobilité des réseaux. Un des objectifs de ce protocole est de ne pas imposer des modifications aux noeuds mobiles. Un réseau mobile NEMO est un réseau en déplacement, connecté à l'Internet par l'intermédiaire d'un ou plusieurs routeurs qui changent leurs points d'attache dans la topologie Internet comme les réseaux de capteurs et les réseaux d'accès à Internet déployés dans les transports publics.

### **III.2.6 NEMO de Support Basique**

Le protocole NEMO BS est une extension de MIPv6 pour supporter la mobilité d'un réseau entier (réseau NEMO), il change son point d'attache à l'internet. NEMO BS assure d'une manière transparente la continuité des sessions ouvertes pour tous les nœuds dans le réseau mobile NEMO. Cette transparence est possible grâce à un réseau mobile NEMO et un réseau en déplacement, connecté à l'Internet par l'intermédiaire d'un ou plusieurs routeurs qui changent leurs points d'attache dans la topologie Internet. Le protocole NEMO BS est un protocole de soutien de base qui permet aux réseaux mobiles de joindre l'Internet dans différents points. Il permet la continuité de session de chaque nœud dans le réseau mobile et d'être joignable quand le réseau se déplace entièrement, grâce à l'utilisation d'un routeur appelé routeur mobile MR (Mobile Router) [250] au niveau du réseau NEMO. Il est attaché au réseau mère/réseau visité par le biais du routeur mobile (MR) qui contrôle son mouvement. Il se caractérise par l'emploi des messages BU (Binding Update), qui est utilisés par le mobile pour informer l'agent mère du mobile par son adresse temporaire.

### **III.3 Problématique et contribution**

Au cours des prochaines années, la charge de trafic peut augmenter de plusieurs ordres là où le réseau cellulaire devrait doubler rapidement. Quatre-vingts pour-cent du trafic des réseaux cellulaires proviennent des emplacements intérieurs, ce qui influe sur le nombre d'interférences inter et intra cellulaires, alors le transfert de données entre les terminaux de la RAN prend plus de charge presque une double connectivité, car il pose des coupures de connectivités au moment du déplacement du terminal mobile entre la cellule source et la cellule de destination, ce qui augmente le délai d'exécution du Handover.

Quelques soient la gestion de Handover et l'architecture d'interconnexion, l'objectif du Handover est de garantir la QoS demandée par l'utilisateur mobile. Les problèmes rencontrés lors de la phase de Handover ont été présentés par des nombreuses références [251], qui sont généralement la latence de Handover, la perte de paquets, la gigue et le MoS. Pour résoudre ces problèmes afin de mieux optimiser les procédures du Handover, et pour faciliter la gestion des interférences intercellulaires et de mettre en œuvre certaines fonctionnalités d'optimisation automatique du réseau.

En effet, nous proposons un algorithme qui permet de collecter les informations des cellules candidates, pour déterminer la cellule qui a le signal le plus fort, avec l'intégration de l'approche SDMN (Software Defined Mobile Networks) pour maintenir les états globaux des réseaux distants et directement connectés pour prendre des décisions cohérentes.

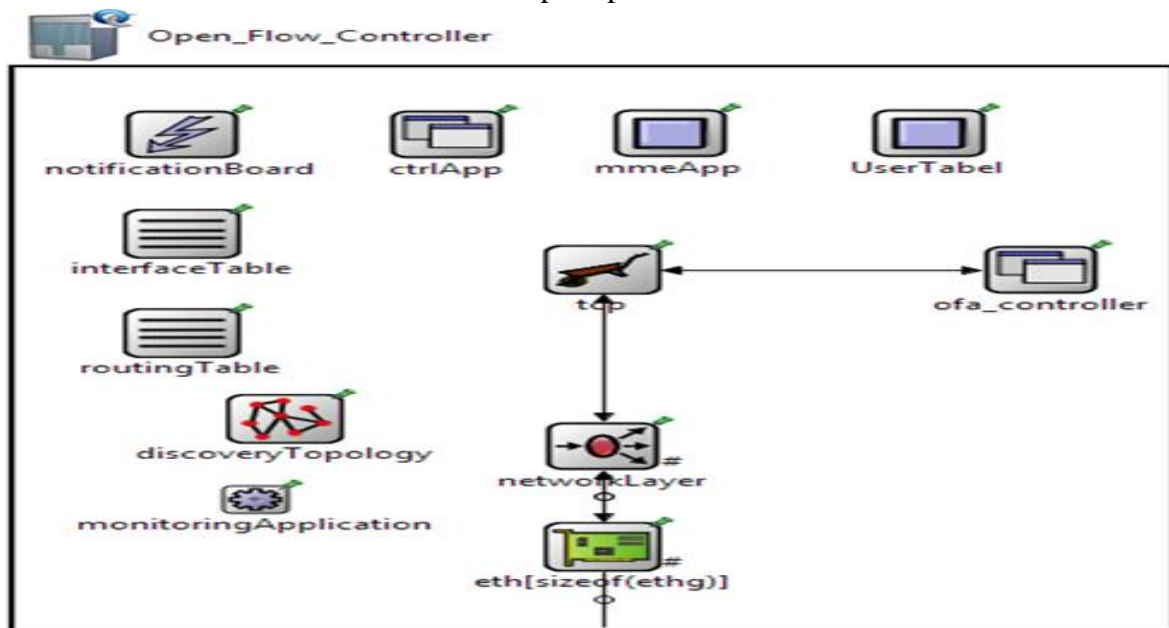


Figure 41: Modules du contrôleur SDN

Les contributions de ce chapitre sont basées sur une méthode d'expérimentation, utilisant OMNeT4.6 ++, avec l'intégration des modules suivants (figure 41 et 42): OFA\_controller, UserTable, mmeAPP, CtrlApp, discoveryTopology, monitoringApplication, et networkLayer, notificationBoard, interfaceTable, tcp, OFA\_Switch, Open\_FlowProcessing, flow\_Table, routingTable, eth.

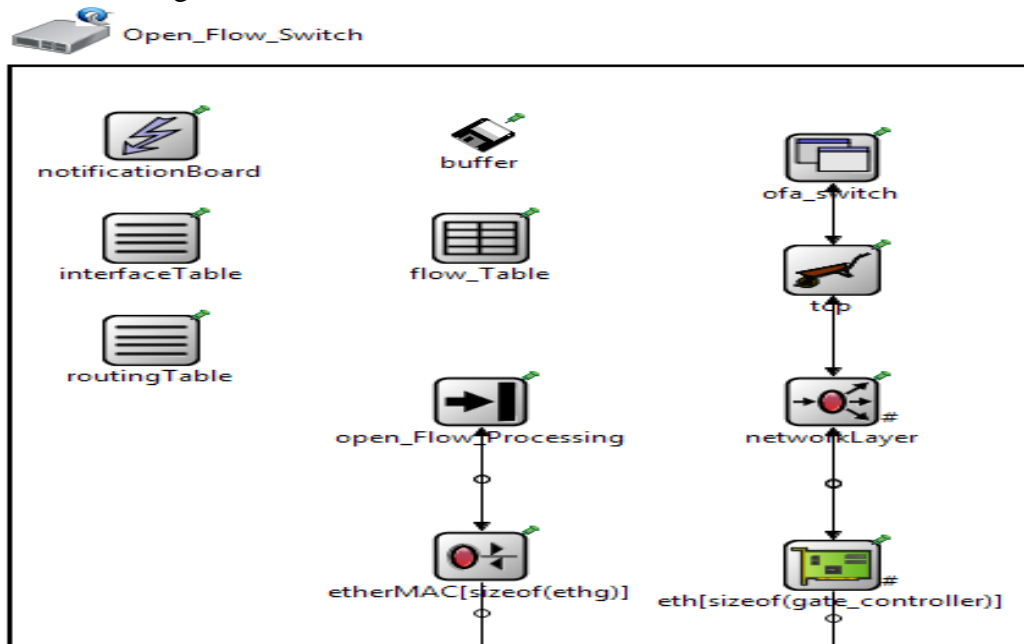


Figure 42: Modules de commutateur OpenFlow

La structure générale des principaux composants de contrôleur SDN est illustrée dans la figure 41. Selon la spécification OpenFlow, tous les périphériques de transfert doivent être

enregistrés auprès du contrôleur via le canal OpenFlow. Le contrôleur crée une vue complète de tous les commutateurs et liaisons entre les commutateurs. Le module de contrôleur calcule le meilleur chemin pour le noeud de destination et demande aux commutateurs d'élaborer des flux qui respectent le chemin le plus court.

La figure 42 présente les modules d'un commutateur OpenFlow, qui permettent de le connecter avec des autres nœuds, afin de composer un seul réseau. Les nœuds se déclarent en tant que des modules composés. Cette connexion est utilisée pour échanger les messages OpenFlow afin de mettre en œuvre les comportements de transfert. Puisque tous les commutateurs sont enregistrés dans le module de contrôleur OpenFlow.

Le travail suivant permet de réduire les messages de signalisation, pour cela des nouvelles architectures sont proposées avec le même principe:

**a. Contribution 1: Apport de l'approche SDN dans l'amélioration du Handover dans les réseaux cellulaires 3G**

Chaque terminal mobile communique avec la station de base source et destination, un transfert d'appel se produit, ce qui réduit les performances de la qualité du Handover, pour garantir la continuité de la connexion avec la prochaine cellule, avant de libérer l'ancien. Nous proposons cette contribution vise à une proposition de l'approche SDMN pour synchroniser l'acheminement et l'échange de données par le contrôleur SDN dans l'architecture de 3G (figures 43), via déploiement d'une nouvelle interface s'appelle Iub-OF, visant le débarras de l'interface Iub et le contrôleur RNC, du réseau d'accès UTRAN, se basant sur une sélection appuyée sur plusieurs paramètres parmi eux la bande passante disponible et la puissance du signal du réseau destination, cette architecture se base sur le protocole MIH.

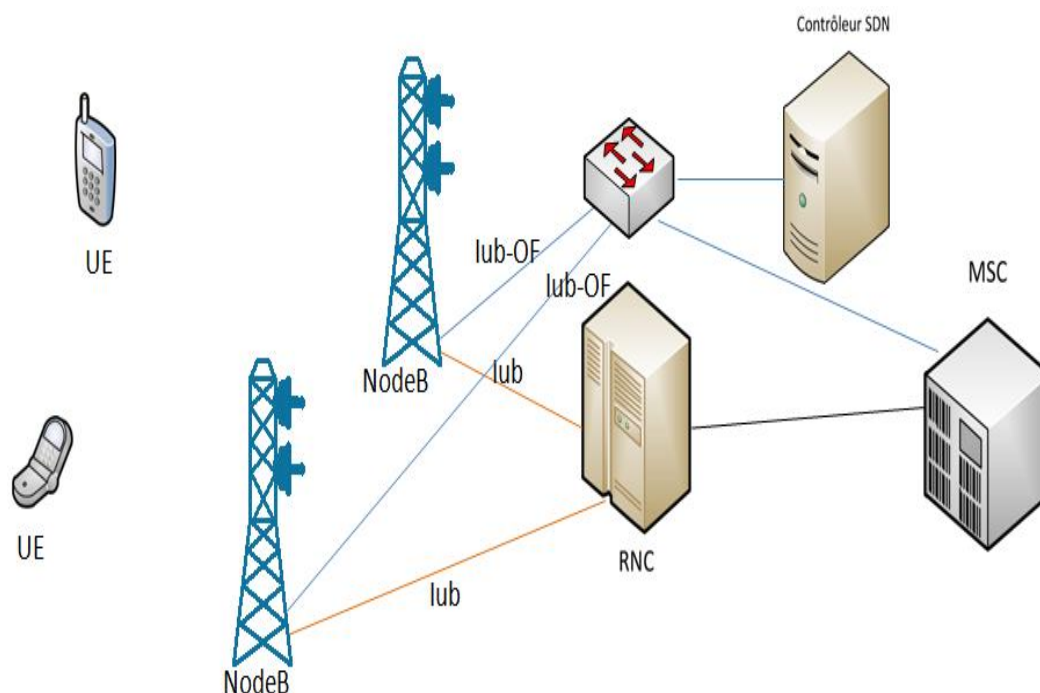


Figure 43: Architecture 3G proposés avec SDN

La réalisation d'un Handover au sein de la 3G se réalise par trois phases à savoir: la phase de mesure, la phase de préparation et la phase d'exécution.

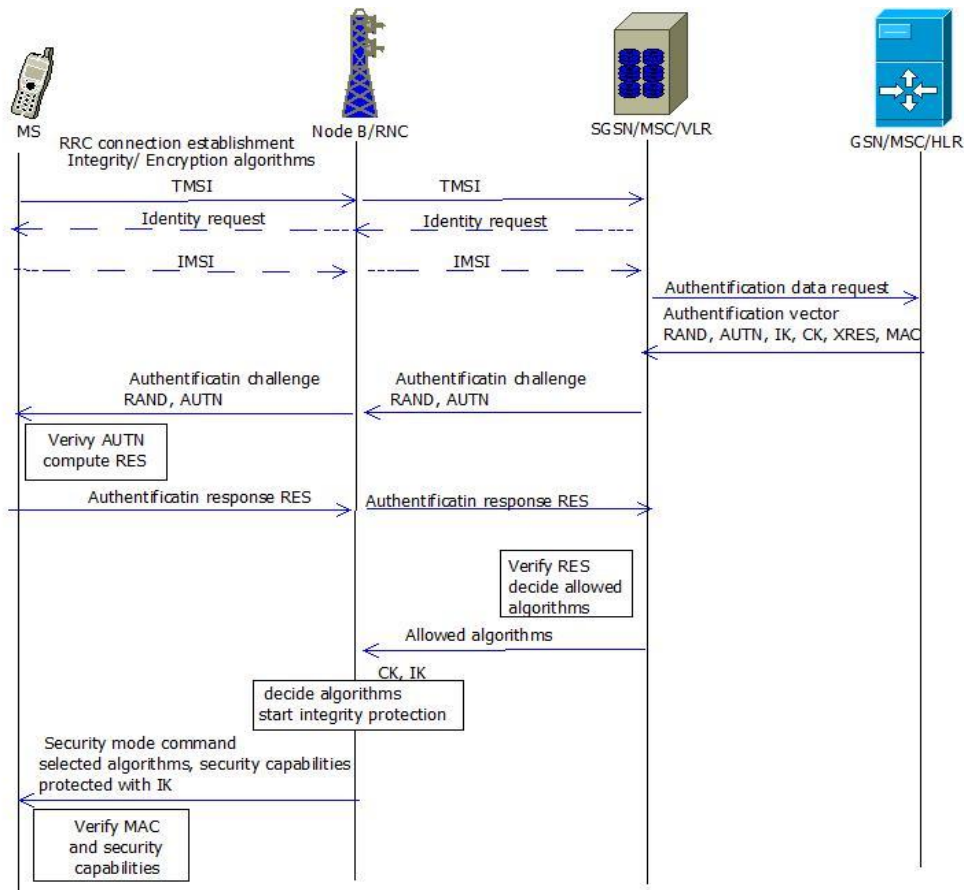


Figure 44: Ho au sein de la 3G sans SDN

Les figures 44 et 45 permettent de montrer que la centralisation avec SDN diminue le nombre des messages de signalisation d'une manière visible, ce qui augmente les performances du Handover.

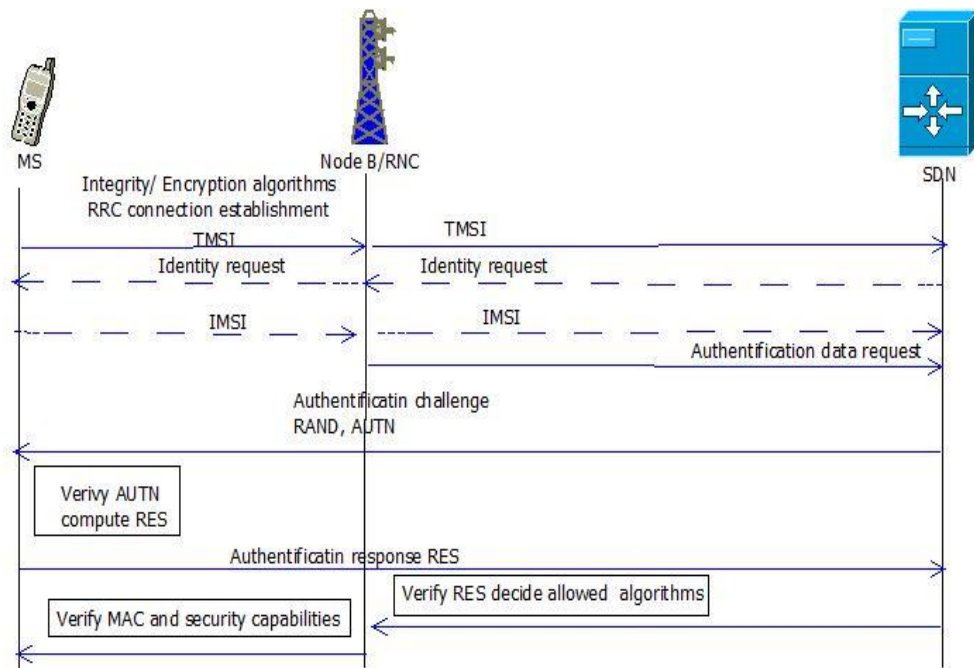


Figure 45: Ho au sein de la 3G avec SDN

**La phase de mesure:** Cette phase précède la décision de Handover prise par le contrôleur de station de base source et donc le déclenchement effectif de ce Handover. Les critères de décision sont essentiellement basés sur la qualité et le niveau de signal des cellules voisines, mesurés par l'UE. La station de base reçoit un message de configuration, au préalable par l'UE à travers les éléments suivants:

- les mesures attendues: par exemple le niveau ou la qualité de signal, la puissance reçue;
- l'objet à mesurer à savoir cellule, fréquence porteuse;
- le mode de remontée à savoir périodique ou sur événement.

Le temps que prend l'UE pour mesurer les cellules voisines et l'exactitude de ces mesures sont des points cruciaux pour le succès du Handover et la continuité de l'appel. Ils dépendent notamment des performances radio intrinsèques de l'UE, de ses algorithmes de moyen nage et de la configuration judicieuse des mesures par l'opérateur.

En 3G, l'UE effectue ses mesures sur les cellules intrafréquences sans modification de la trame radio sur la cellule serveuse: il est capable de maintenir sa connexion radio avec cette cellule et de réaliser de façon simultanée des mesures sur les cellules intrafréquences.

La station de base intègre les mesures remontées par l'UE dans son algorithme de décision. Si les critères de déclenchement sont vérifiés, elle entame la phase de préparation décrite ci-après. La décision repose par exemple sur les critères suivants:

- le niveau de signal d'une cellule voisine mesurée par l'UE est supérieur à un seuil prédéfini et la qualité de la cellule serveuse est inférieure à un autre seuil (pour un Handover intersystèmes par exemple).
- Le niveau ou la qualité du signal d'une cellule voisine est meilleure que celui de la cellule serveuse (pour un Handover intra ou intrafréquences par exemple).

On comprend, pour que cette phase de mesure soit possible, l'opérateur doit paramétrer les cellules intra et intersystèmes voisines de la cellule serveuse, et ce pour toutes les cellules du réseau. Il doit également définir les seuils d'activation des mesures et de déclenchement du Handover. Par exemple en 3G, le mode compressé et les mesures intersystèmes peuvent n'être activés que lorsque le signal de la cellule serveuse est dégradé, afin de limiter la consommation du noeud et les interférences engendrées sur la cellule serveuse. Les seuils mis en jeu peuvent varier suivant la topologie du réseau. Un travail d'optimisation est donc souvent nécessaire.

**La phase de préparation:** L'objectif premier de cette phase est de maximiser les chances de succès de la procédure de Handover, par l'échange d'informations entre les contrôleurs et les stations de base source et cible, en préalable à la réalisation de l'opération de basculement proprement dite. La préparation commence dès lors que le contrôleur source a pris la décision de réaliser un Handover de l'UE, sur la base des mesures remontées par celui-ci et de ses critères de déclenchement.

- Le contrôleur SDN permet de gérer la cellule cible sur la possibilité de réaliser le Handover;

- Le contrôleur SDN obtient les informations et les paramètres grâce auxquels l'UE accèdera rapidement et de façon fiable aux ressources de la cellule, par exemple la détermination des canaux qui sont libres.

Cet échange peut avoir lieu directement entre les équipements du même système, s'il existe une interface entre ces nœuds, ou par l'intermédiaire d'un ou plusieurs nœuds du réseau cœur. En effet, dans le cas d'un Handover intersystèmes, chaque contrôleur communique avec le nœud de son réseau cœur qui relaye ensuite les informations entre système source et système cible.

La phase de préparation doit être exécutée rapidement, puisqu'il s'agit de la période pendant laquelle les conditions radio se dégradent pour le nœud sur la cellule source. Cependant, cet échange est généralement bref, dans la mesure où il s'effectue sur les interfaces terrestres du réseau, sur lesquelles la latence et le taux d'erreur sont souvent très faibles.

À l'issue de cet échange, le nœud peut commencer le transfert de données reçues du réseau cœur vers le contrôleur. On parle de data forwarding. Ces données sont stockées en mémoire par le contrôleur. Ce transfert de données doit veiller à maintenir le séquençement des paquets tel qu'ils sont reçus du réseau cœur.

**La phase d'exécution:** Pour l'exécution du Handover, le contrôleur envoie un ordre de basculement à l'UE. Cette commande indique à l'UE la cellule cible (fréquence, identifiant...) et des informations sur sa configuration, afin de permettre un accès rapide et fiable de nœud aux ressources qui lui sont réservées ou qui sont partagées au sein de la cellule entre les nœuds.

Sans SDN la station source soumet plusieurs messages RRC ce qui augmente le délai de Handover, dès la réception de ces messages, l'UE procède à la recherche de la cellule cible, s'il ne reçoit pas déjà son signal de façon simultanée à celui de la cellule source. Si la cellule cible est portée par une fréquence différente, le nœud ajuste par exemple la fréquence de son récepteur pour démoduler le signal sur cette nouvelle fréquence.

Une fois la cellule cible détectée, le nœud doit accéder aux ressources radio de la voie montante afin de transmettre du contrôleur vers la station de base cible un message signalant sa présence et le succès de la bascule radio. Ce message déclenche l'envoi par cette station une notification au réseau cœur indiquant que le chemin de données peut être basculé. À l'issue de cette bascule du flux de données, celles-ci ne transitent alors plus par le contrôleur source, mais sont acheminées directement du réseau cœur au contrôleur cible.

Dans le cas d'un Handover inter-RAT, la bascule radio est contrôlée par une temporisation déclenchée par le nœud à la réception de la commande de Handover: si cette temporisation s'écoule avant que le nœud n'ait pu accéder à la nouvelle cellule, la procédure échoue et le nœud retourne sur la cellule d'origine.

#### **b. Synthèse de la contribution 1: Apport de l'approche SDN dans l'amélioration du Handover dans le réseau cellulaires 3G**

L'organigramme 46 résume les différents processus effectués par le nœud pour la prise de décision du Handover dans le réseau 3G avec centralisation par SDN sans l'interface Iub.

Quand le terminal mobile arrive à la limite de la zone de couverture de Node B, le terminal mobile cherche, pour garder une qualité de service acceptable, à se connecter à un autre réseau disponible dans son environnement. SDMN sélectionne parmi l'ensemble des réseaux disponibles autour du terminal mobile, un réseau de destination en se basant sur la puissance du signal la plus forte.

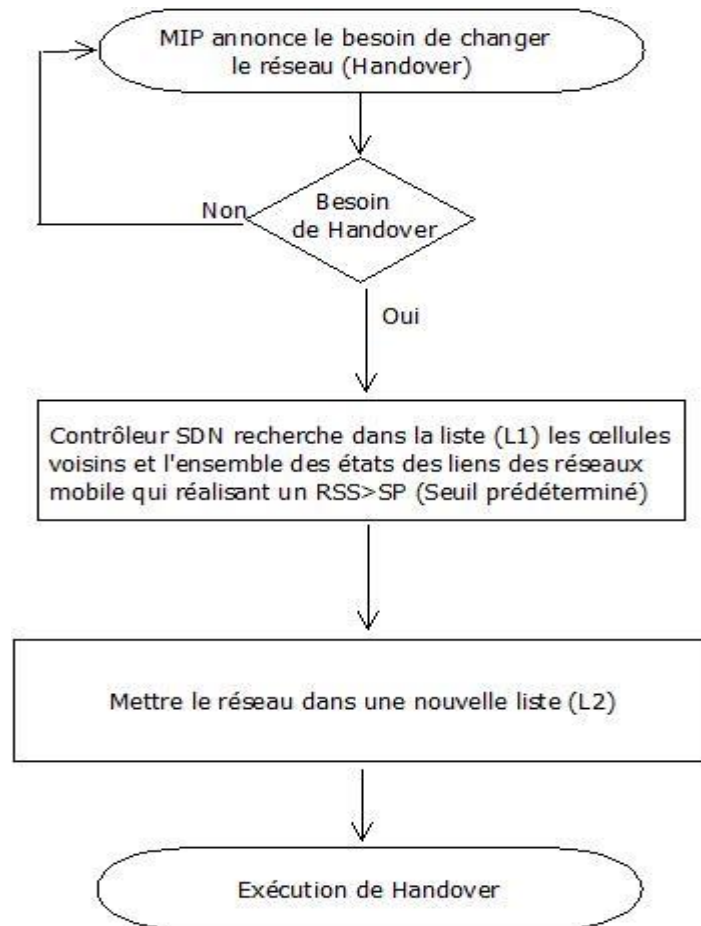


Figure 46: Algorithme d'exécution du Handover dans 3G par l'intégration de SDN

Par conséquent, le Node B sera sélectionné bien que sa bande passante disponible est déjà dans une liste prédéterminée au niveau du contrôleur.

**c. - Contribution 2: Apport de l'approche SDN dans l'amélioration du Handover dans les réseaux cellulaires 4G**

Dans les réseaux 4G, la connectivité des réseaux au cœur EPC (Evolved Packet Core) via le support du plan de commande au MME et du plan utilisateur au S-GW est assurée par l'interface S1. Cependant, le temps de préparation du transfert de données, peut-être plus long, car les messages transitent par le MME, traversent les deux interfaces S1 entre les sources eNodeB et MME source, puis entre la cible MME et eNodeB. Si la cellule de destination appartient au même eNodeB, elle n'engage aucune procédure de préparation, notamment pour optimiser les procédures de mobilité, faciliter la gestion des interférences intercellulaires et implémenter certaines fonctionnalités d'auto-optimisation du réseau, de sorte que eNodeB puisse être interconnecté par l'interface X2.

L'interface X2 est composée de deux sous-ensembles [252] à savoir l'interface X2-U, qui traite les flux du plan utilisateur (identique à l'interface S1-U) et l'interface X2-C, qui traite le plan de contrôle. (Les fonctionnalités X2-C sont prises en charge par le protocole X2-AP [253] sur SCTP (Stream Control Transmission Protocol) [254].

La demande de transfert intercellulaires est envoyée, dans certains cas, par la station de base source à la passerelle MME/S-GW qui la gère.



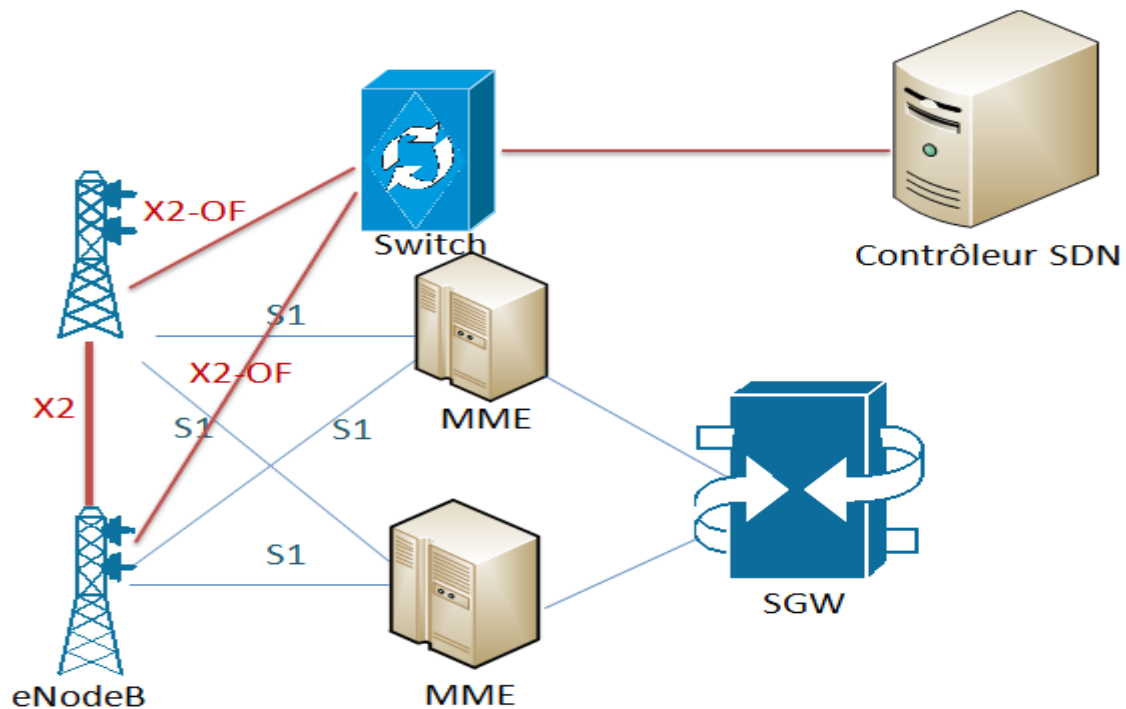


Figure 47: Architecture 4G proposés avec SDN

La qualité du signal d'une cellule source se dégrade immédiatement quand un terminal mobile se déplace d'une cellule vers une autre, alors il y a une probabilité de l'échec du Handover. En effet, nous proposons un algorithme qui permet de détecter les cellules voisines et les sauvegarder dans une liste, et l'intégration de l'approche SDN pour détecter les cellules voisines inter et intrafréquences.

Cette contribution permet une proposition de l'approche SDMN pour améliorer le Handover horizontale basée sur une extension de MIH, ciblant le débarras de l'interface X2 qui connecte deux stations de base eNodeB entre eux dans le réseau d'accès radio eUTRAN de la 4G (figure 47), et centraliser son rôle par le contrôleur SDN via l'échange de données à travers déploiement d'une nouvelle interface s'appelle X2-OF, pour but de gérer le Handover d'un terminal mobile d'une cellule radio vers une autre, dans ce cas le contrôleur SDN coordonne l'affectation harmonieuse des sous-porteuses entre les nœuds mobiles présents dans chaque cellule radio, ce qui limite les interférences et augmente la qualité de service de Handover, en se fondant sur une sélection de la bande passante disponible et la puissance du signal du réseau destination.

La procédure de Handover au sein du 4G (Handover intra- architecture 4G proposés avec SDN). Il s'agit de la seule procédure définie pour la mobilité en mode connecté au sein du système 4G. Le Handover intra-4G est de type Hard Handover.

La figure 48 présente la procédure du Handover au sein du système 4G en général sans SDN et la figure 49 offre la réalisation de ce mécanisme avec la centralisation par le contrôleur SDN, ce qui diminue les échanges dans la phase de mesure, de préparation et d'exécution du Handover, afin d'affaiblir la latence, la perte de paquets, la gigue et améliorer le MoS.

Le Handover au sein du système 4G est de type Hard Handover. En effet, la procédure de gestion du Handover repose sur une phase de mesure, la phase de préparation et la phase d'exécution et le cas échéant la procédure de rétablissement.

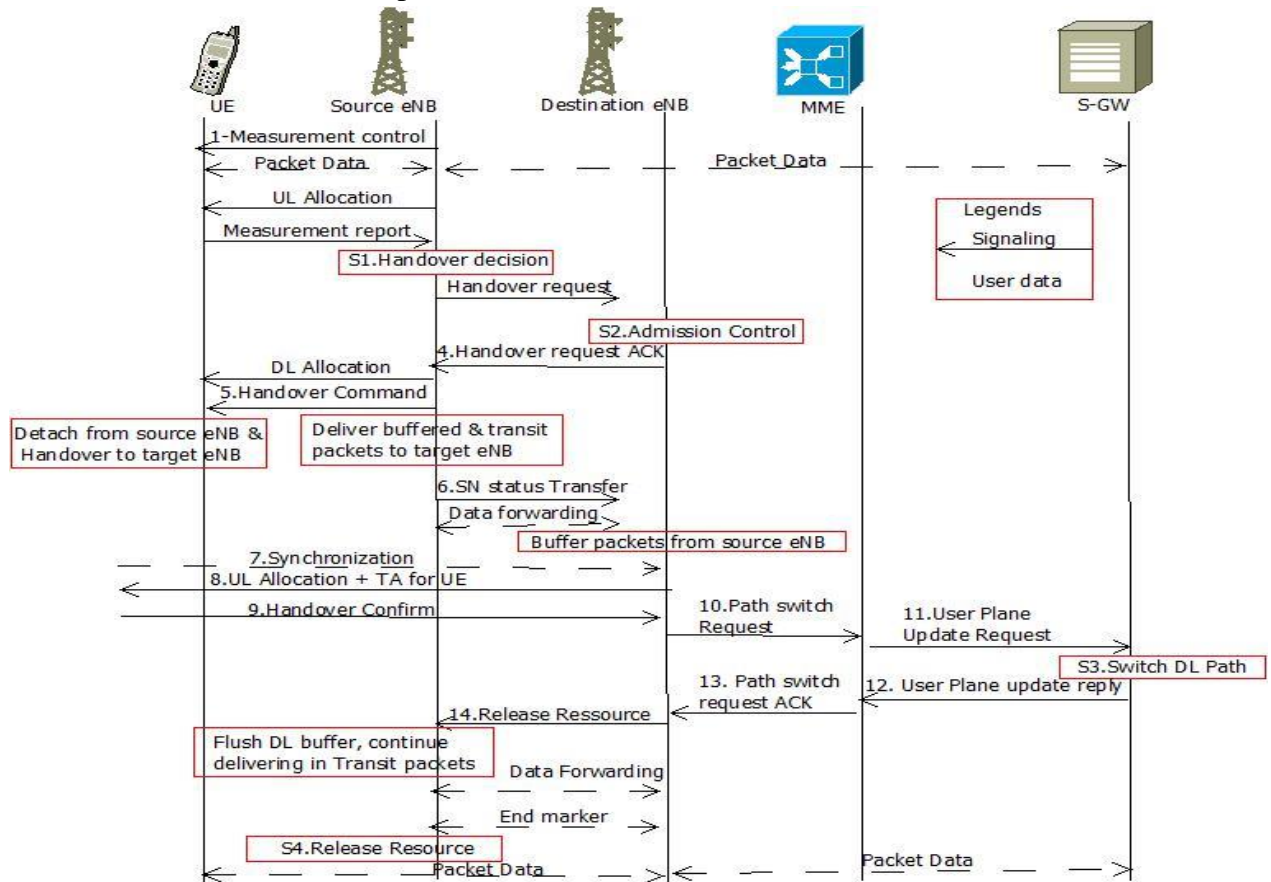


Figure 48: Ho au sein de la 4G sans SDN

**Phase de Mesure:** permet de détecter les cellules voisines intra et inter fréquences sur la seule indication de leur fréquence porteuse, évitant la nécessité d'indiquer sur la cellule serveuse une liste complète des cellules voisines de la 4G.

**Phase de préparation du Handover:** peut être réalisée entre les deux eNodeB via l'interface X2 s'elle existe, ou, par défaut, par l'intermédiaire du MME via l'interface S1. Cependant, la procédure sur l'interface radio est identique. L'utilisation de l'interface S1 pour le Handover est nécessaire lorsque l'opérateur ne peut mettre en œuvre l'interface X2 entre certains eNodeB. En effet, les délais de préparation et de transfert de données peuvent être plus longs puisque les messages transitent par le MME et traversent les deux interfaces S1 (entre eNodeB source et MME, puis entre MME et eNodeB cible). Si la cellule cible appartient au même eNodeB, celui-ci n'engage aucune procédure de préparation.

**Phase d'exécution du Handover:** Après la réception du message d'accusé de réception de Handover "Handover Request", eNodeB source déclenche le Handover par l'envoi au noeud des messages RRC Connection Reconfiguration [255], qui indiquent notamment la cellule cible, son identifiant dans la cellule, des paramètres de sécurité (par exemple l'algorithme lui permettant de dériver les nouvelles clés de chiffrement et d'intégrité RRC) [256].

**Phase de rétablissement:** Lors de la réception du message RRC (Connection Reconfiguration) commandant le Handover, le noeud démarre la temporisation du Handover. Celle-ci est arrêtée par le noeud lorsque la procédure d'accès aléatoire sur le canal RACH

(Random Access Channel) de la cellule cible aboutit. Si cette temporisation expire avant la fin de cette procédure, le noeud considère que le Handover a échoué et lance alors une procédure de rétablissement de connexion RRC. Le noeud reprend alors la configuration RRC utilisée dans la cellule source et supprime les configurations des couches physiques et MAC établies pour la cellule cible.

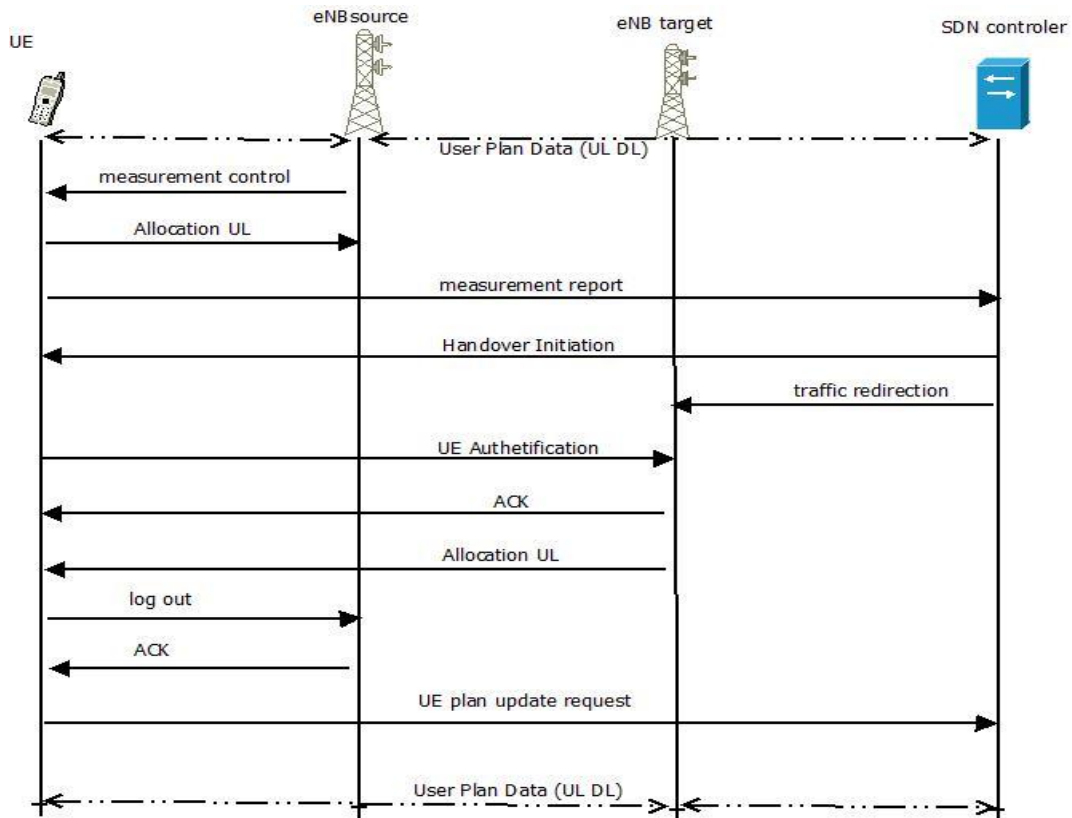


Figure 49: Ho au sein de la 4G avec SDN

SDN contient les mesures interférences et intrafréquences, il permet de signaler une liste noire (ou blacklist) des cellules que le noeud ne doit pas mesurer, signaler cette liste au noeud avec des mesures qui limite la consommation. En effet, l'eNodeB décide de ne pas réaliser le Handover vers une cellule cible faisant partie de la liste noire, le noeud détectera et mesurera inutilement ces cellules si elles ne lui sont pas interdites.

Dans ce cas, le noeud n'a pas besoin d'intervalles de mesure (gaps) pour les cellules intrafréquences: il est capable de mesurer ces cellules tout en continuant de recevoir des données sur la cellule serveuse, de façon simultanée.

#### d. Synthèse de la contribution 2: Apport de l'approche SDN dans l'amélioration du Handover dans le réseau cellulaires 4G

L'organigramme 50 cumule les différents processus effectués par le terminal mobile pour la réalisation du Handover dans un réseau SDMN sans interface X2.

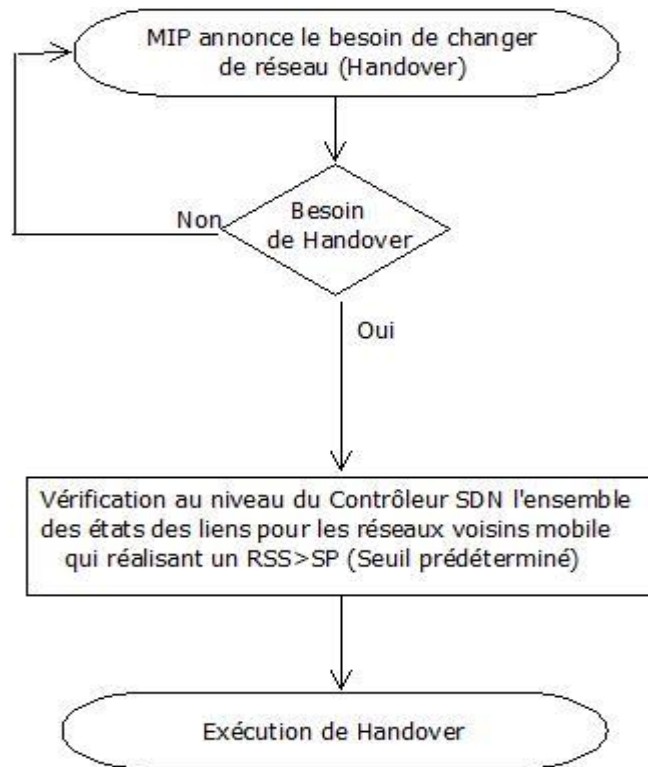


Figure 50: Algorithme d'exécution du Handover dans 4G par l'intégration de SDN

Notre organigramme 50 résume les différentes phases pour la gestion du Handover, il permet de choisir un réseau de destination parmi plusieurs réseaux disponibles dans l'entourage du terminal mobile, avec une qualité de service acceptable, sans besoin de l'interface X2, et grâce au SDMN pour affecter un réseau de destination en s'appuyant sur la puissance du signal la plus forte.

**e. - Contribution 3: Apport de l'approche SDN dans l'amélioration du Handover dans les réseaux cellulaires 5G**

Le Handover commence quand le terminal mobile débute à quitter son point d'attachement avec la cellule source vers le réseau de destination, dont la puissance est meilleure, mais au moment de coupures de ses liens avec l'ancien réseau et la connexion avec le nouveau, il y a une possibilité de l'interruption de point de référence, ce qui génère plus de perte de paquets, et augmente le délai de bout en bout, la gigue, et réduit le MOS. En effet nous proposons cette contribution visant l'intégration de l'approche SDMN pour améliorer le Handover horizontale dans une architecture 5G appuyant sur le protocole MIH, elle se base sur le principe de débarras de l'interface Xn qui connecte deux stations de base gNodeB et ng-eNodeB dans le réseau d'accès radio NGRAN sous le réseau cellulaire 5G et déploiement d'une nouvelle interface s'appelle Xn-OF, pour lier le contrôleur SDN avec la station (Figure 51). En effet, ce dernier met en œuvre des algorithmes de chiffrement, de protection et de l'intégrité du strate de non d'accès NAS (Non-Access Stratum) [257] qui présente un ensemble des protocoles, qui s'établissent entre l'UE et le réseau cœur, SDN envoie une demande AKA (Authentication and Key Agreement) [258] de manière équivalente à la MME dans les infrastructures 4G, reposant sur deux paramètres à savoir la bande passante disponible et la puissance du signal du réseau destination.

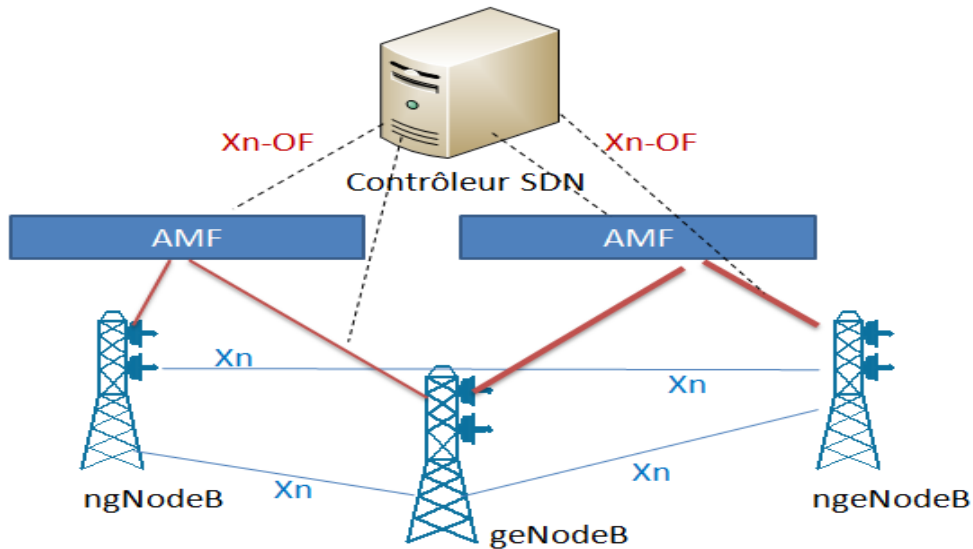


Figure 51: Architecture de 5G proposés avec SDN

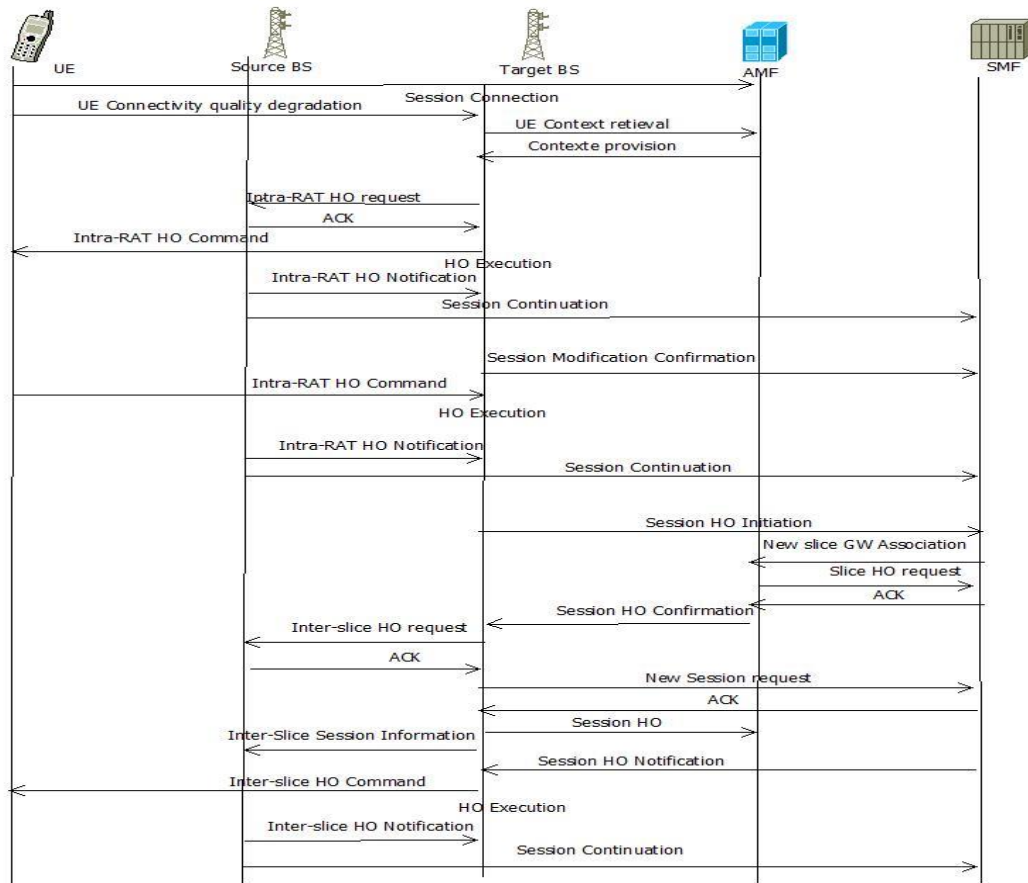


Figure 52: Ho au sein de la 5G sans SDN

Les infrastructures actuelles sont conçues avec des algorithmes massivement parallèles pour accélérer le traitement de données. Ces algorithmes impliquent un grand nombre d'échanges de données entre les différents dispositifs impliqués dans le traitement et le calcul.

En 5G, le Handover s'effectue au niveau de l'interface Xn, lorsque le nœud envoie les rapports de mesure basés sur les signaux de référence de faisceau BRS (Beam Reference

Signals) [259] provenant des cellules voisines. Quand le gNB source détecte qu'un transfert intercellulaire est requis, le noeud lance le transfert et il se connecte au gNB cible qui a déjà basculé les tunnels vers la cible, il transmet dans le cadre du processus de transfert intercellulaire, cela s'appelle RRC, il est responsable de la gestion des messages de signalisation entre le gNB et le noeud (figure 52).

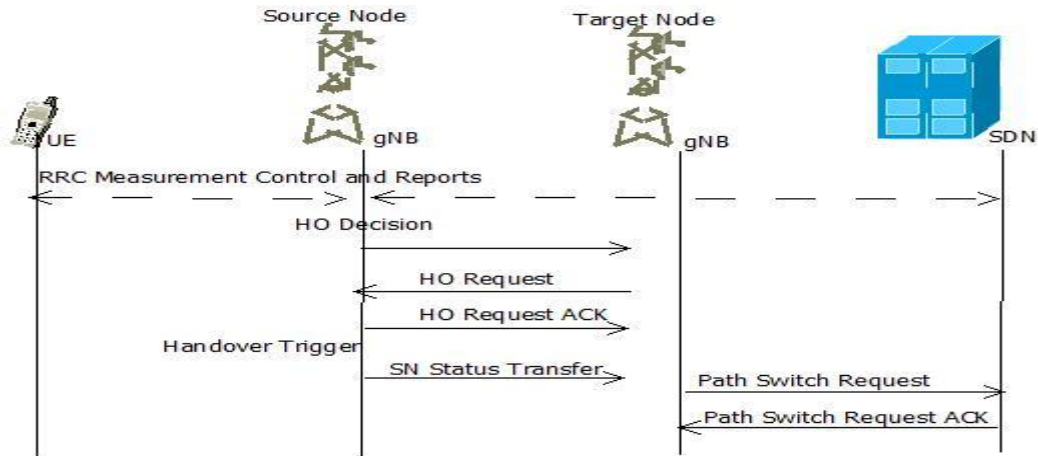


Figure 53:Ho au sein de la 5G avec SDN

Le contrôleur SDN envoie le message de notification au UE pour signaler l'état actuel du RRC (soit l'état RRC inactif ou l'état RRC Connected), et les informations de localisation de noeud actuelles comme la zone de suivi TAI (Tracking Area Identity) [260] et l'identité de cellule, qui sont toujours incluses lorsque les informations d'état RRC sont rapportées. Grâce à cela, le noeud peut alors transférer rapidement toutes les données (figure 53).

#### f. Synthèse de la contribution 3: Apport de l'approche SDN dans l'amélioration du Handover dans le réseau cellulaires 5G

L'organigramme 54 résume les différentes phases effectuées par le terminal mobile pour la réalisation du Handover dans un réseau SDMN sans intervention de l'interface Xn.

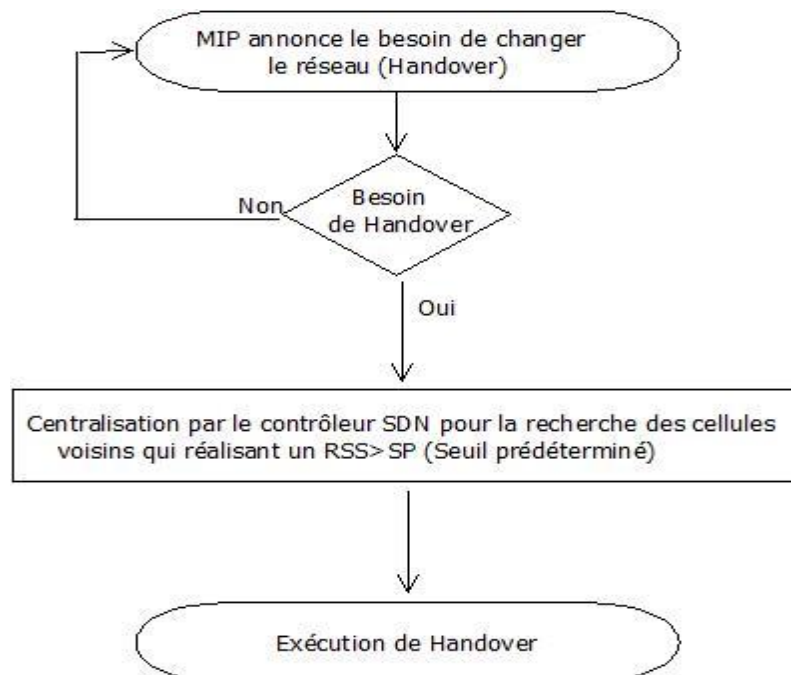


Figure 54: Algorithme d'exécution du Handover dans 5G par intégration de SDN



Il permet la gestion du Handover, approuve la sélection d'un réseau de destination parmi les réseaux voisins disponibles dans l'entourage du terminal mobile, avec une meilleure qualité de service, sans besoin de l'interface Xn, via une amélioration à travers SDMN pour trouver un réseau de destination en se fondant sur la puissance du signal la plus forte.

#### IV. Evaluation des performances

Ce travail se compose de six scénarios du Handover horizontale dans les réseaux cellulaires 3G, 4G et 5G sans et avec SDN.

**Scénario1:** Architecture 3G sans SDN constituée de: 02 NodeB, 02 RNC, 01MSC, et de 10 à 20 UE (figure 55)

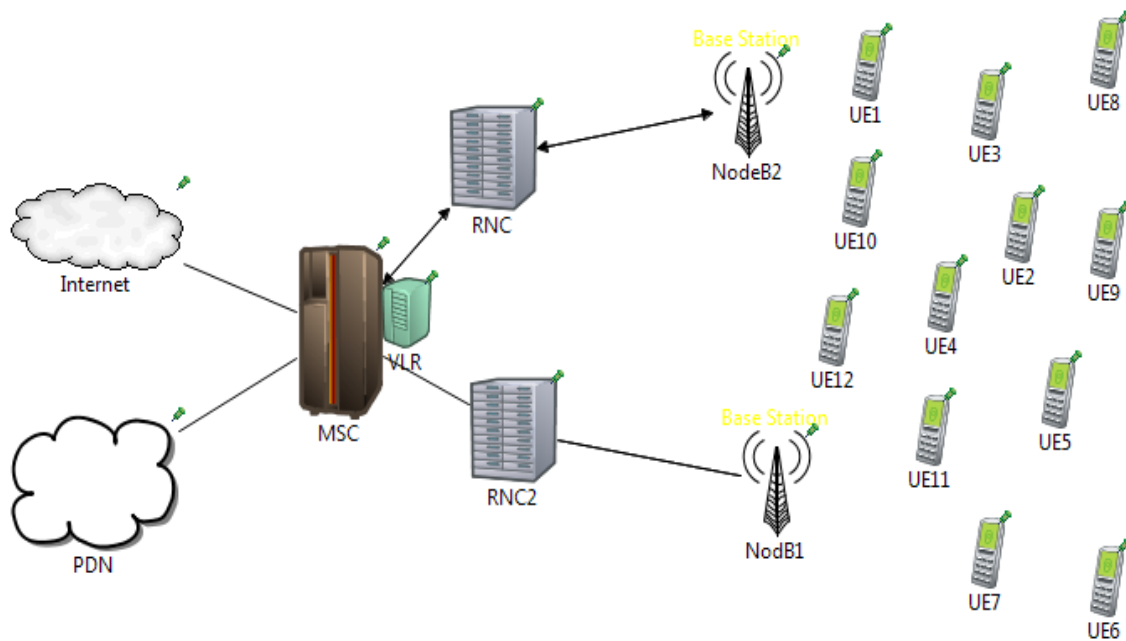


Figure 55: Scénario 1: Architecture de la 3G sans SDN

**Scénario 2:** Architecture 3G avec SDN constituée de: 02 NodeB, 02 RNC, 01MSC, 10 à 20 UE, 01 contrôleur SDN, et de 01 commutateur OpenFlow (figure 56)

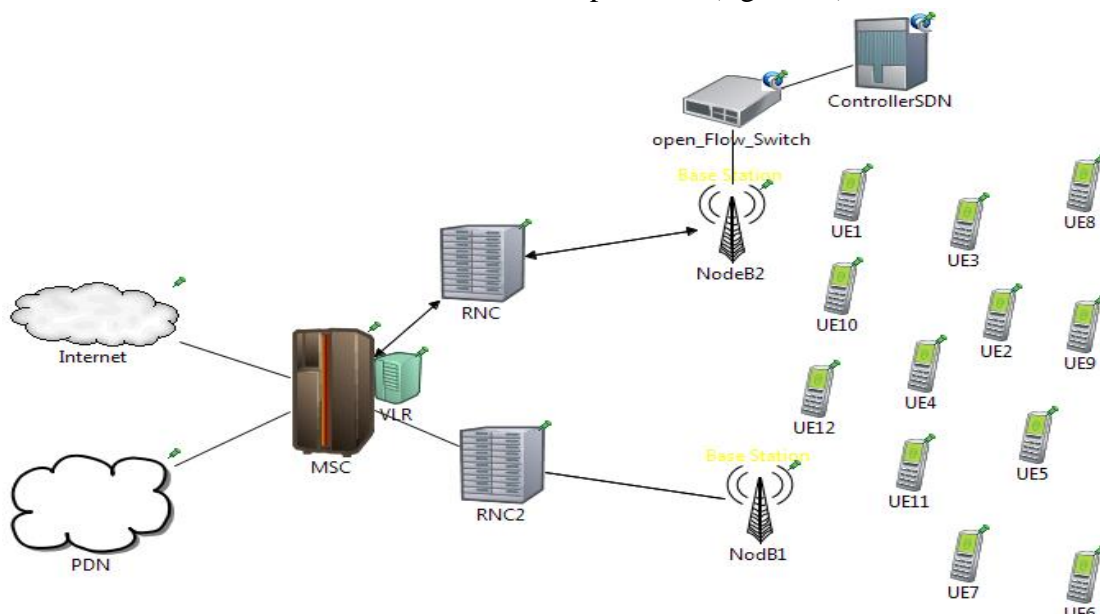


Figure 56: Scénario 2: Architecture de la 3G avec SDN

Pour la réalisation de ce travail on se base:

La communication voix sur IP utilisant le protocole SIP (Session Initiation Protocol), avec un plan d'adressage réalisé par FHMIPv6. Tous les UES sont mobile de façon aléatoire.

**Scénario 3:** Architecture 4G sans SDN constituée de: 01PGW, 02 eNB, et de 10 à 20 UEs (figure 57)

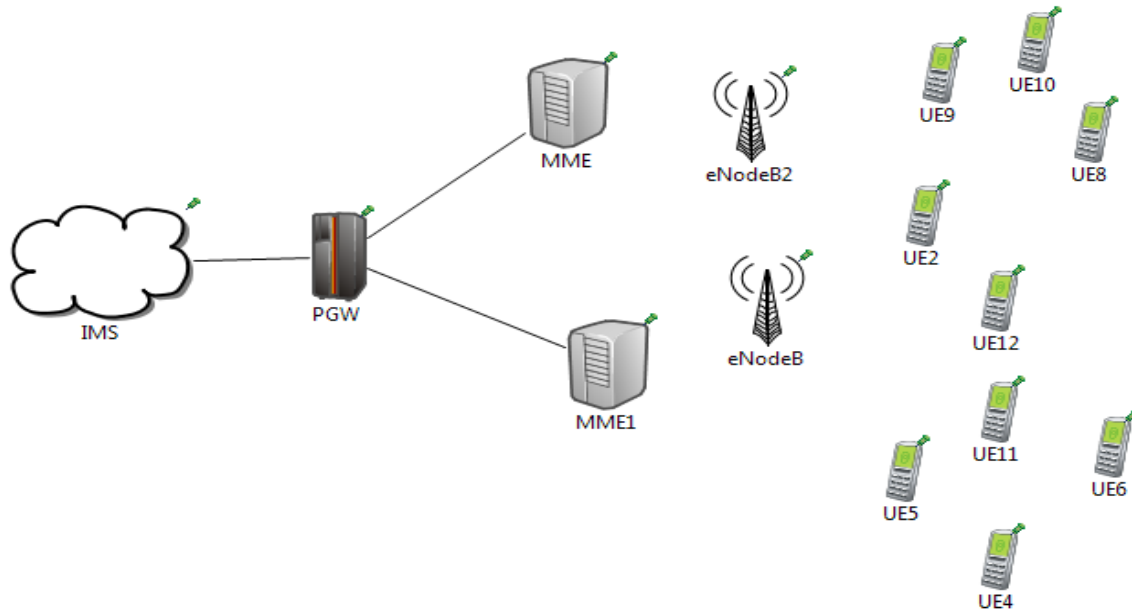


Figure 57: Scénario 3: Architecture de la 4G sans SDN

**Scénario 4:** Architecture 4G avec SDN composée de: 01 PGW, 02 eNB, 01 contrôleur SDN, 01 commutateur OpenFlow, et de 10 à 20 UEs (figure 58)

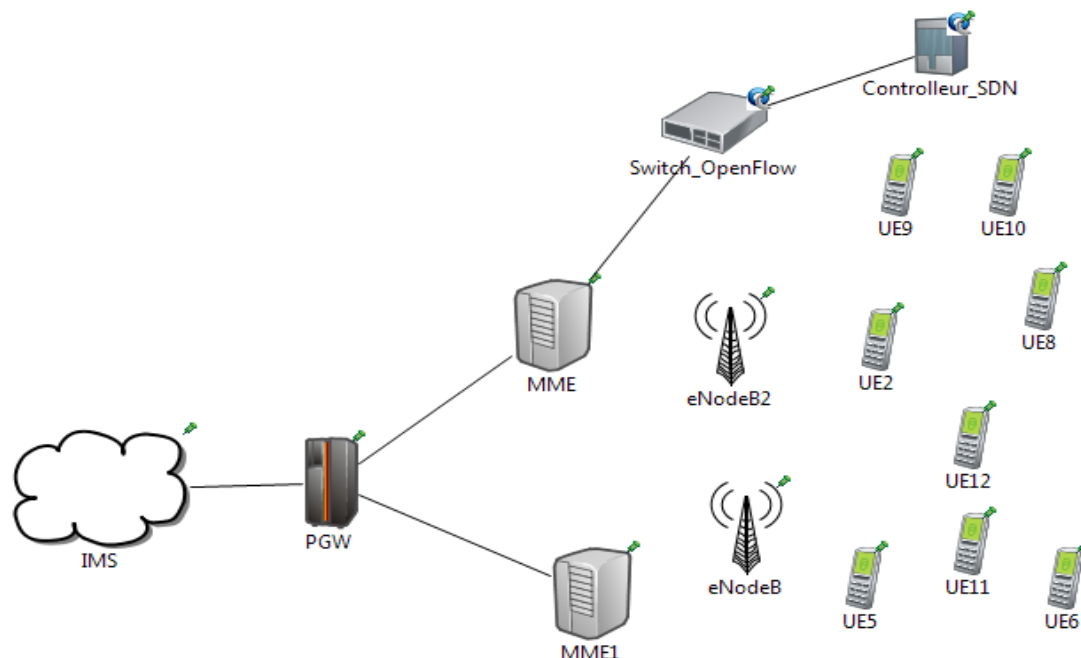


Figure 58: Scénario 4: Architecture de la 4G utilisant SDN

Les protocoles utilisés sous la 4G sont:

- le protocole SIP pour VoIP, avec une mobilité NEMO BS.
- Le protocole GTP-C (GPRS Tunneling Protocol) pour l'encapsulation du trafic IP utilisateur dans les paquets IPv6. Il est utilisé entre le MME et SGW ou PGW.



- Le protocole GTP-U [260] pour l'échange de données entre eNodeB et SGW ou PGW.
- Le protocole SCTP (Stream Control Transmission Protocol) permet le transport sur IP et la communication entre eNodeB et MME.

**Scénario 5:** Architecture 5G sans SDN se compose de: HetNet, 02 gNodeB1, 01 PicoCell et 01 Femtocell, et de 10 à 20 UE (figure 59)

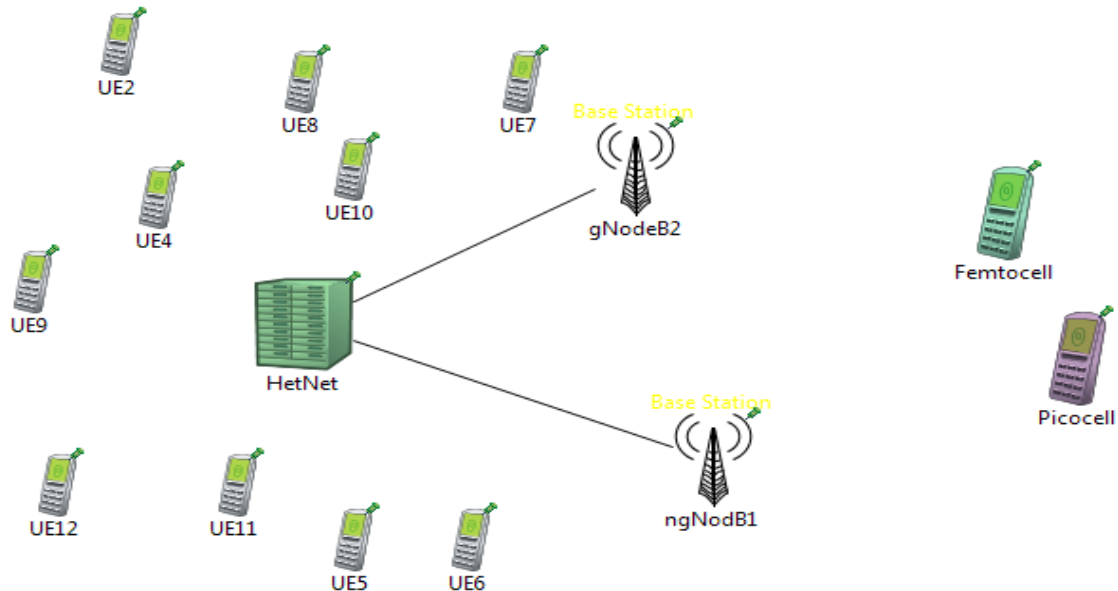


Figure 59: Scénario 5: Architecture de la 5G sans SDN

**Scénario 6:** Architecture 5G avec SDN se compose de: HetNet, 02 ngNodeB, 01 PicoCell et 01 Femtocell, 01 contrôleur SDN, 01 commutateur OpenFlow, et de 10 à 20 UEs (figure 60)

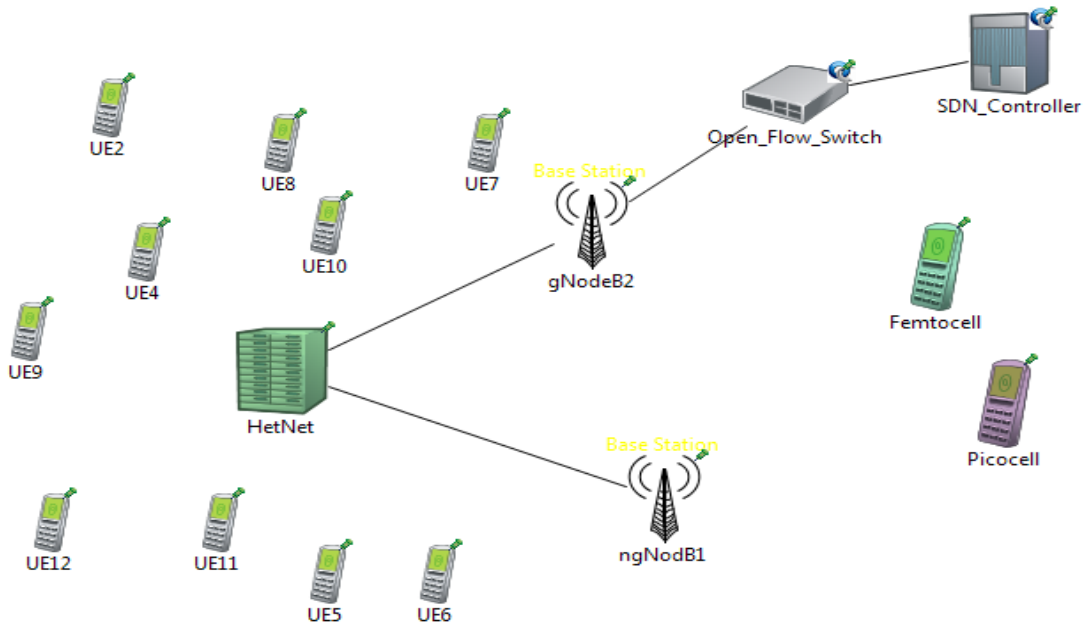


Figure 60: Scénario 6: Architecture de la 5G avec SDN

Pour la réalisation de ce travail on est basé sur:

- le protocole SIP pour VoIP, avec une mobilité NEMO BS.
- L'interface du plan de contrôle entre gNB ou ng-eNB et le 5GC est appelée N2, elle est basée sur le protocole NG-AP (Next Generation-Application Protocol) [261], qui a le rôle de libération du contexte UE, qui s'appuie sur un transport SCTP.

- L'interface du plan utilisateur entre gNB ou ng-eNB et le 5GC est N3, elle est basée sur le protocole GTP-U (GPRS Tunneling Protocol- User plane) qui permet de transporter les T-PDU (tunnel –PDU) [262] et les messages de signalisation encapsulés entre une paire de données de points d'extrémité de tunnel GTP-U, il s'appuie sur un transport UDP sur IP.

- L'interface Xn permet la mobilité en mode actif entre les gNBs et les gNBs et les ng-eNBs.

Xn utilise le protocole Xn/AP (Xn Application Protocol) [263] sur un transport SCTP/IP, pour le plan contrôle via le protocole GTP-U, et un transport UDP/IP [264] pour le plan utilisateur.

## V. Analyse des résultats

Cette partie présente une synthèse et une analyse des expériences de l'approche SDN dans l'amélioration du Handover dans les réseaux cellulaires 3G, 4G et 5G avec et sans SDN pour déterminer la valeur ajoutée par le contrôleur SDN, en fonction des paramètres du Ho horizontale, qui sont définis avec OMNeT4.6 ++ et les résultats discutés concernent:

- le délai de bout en bout sous Handover de 3G, 4G et 5G basés sur le SDN,
- la gigue sous Handover de la 3G, 4G et 5G basés sur le SDN;
- le nombre des paquets perdus sous Handover de 3G, 4G et 5G basé sur le SDN;
- le MOS sous Handover de 3G, 4G et 5G basé sur le SDN;
- le temps d'exécution du Handover sous 3G, 4G et 5G basé sur le SDN;

### V.1 Résultats de la simulation des expériences de 3G, 4G et 5G basée sur SDN

#### a. Evaluation du délai de bout en bout

La figure 61 présente l'évaluation et l'amélioration du délai de transmission de bout en bout dans les réseaux 3G, 4G, et 5G avec et sans SDN. Nous observons que le délai de transmission dans le réseau 5G est nettement plus faible, que celui désiré par les réseaux 3G et 4G. En fait, les réseaux ont été amélioré par l'intégration de l'approche SDN, avec 10%.

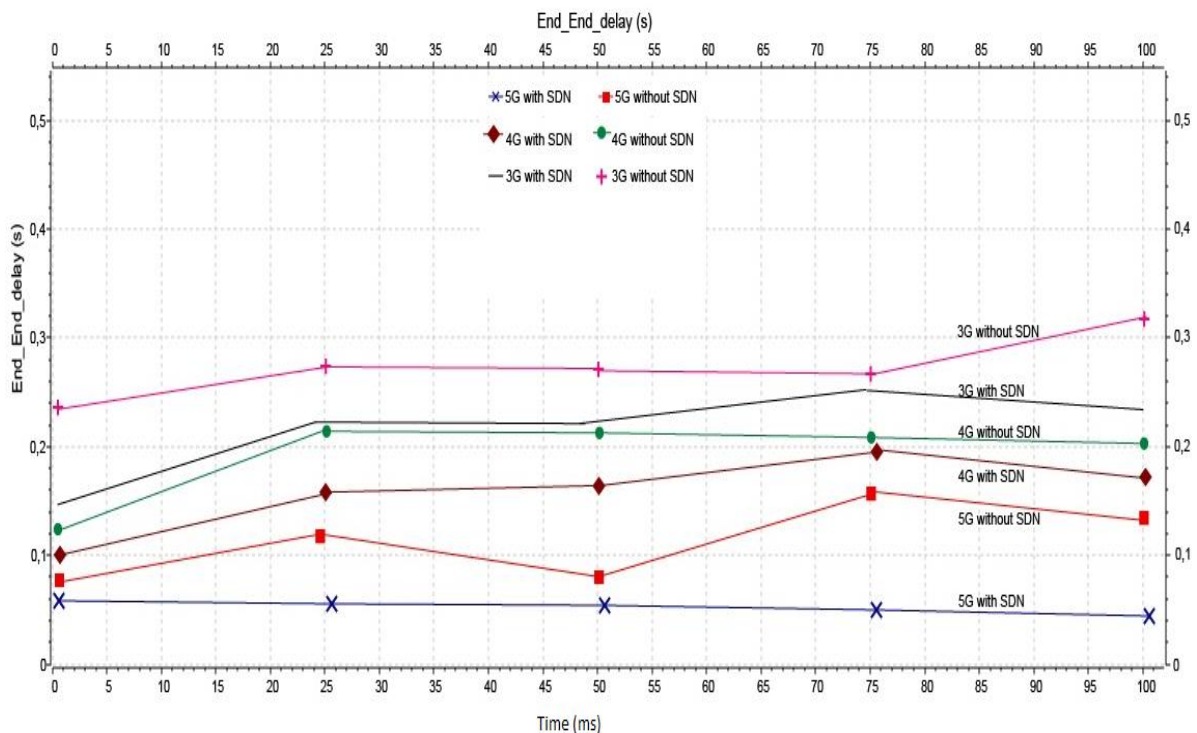


Figure 61: Délai de bout en bout lors du Handover 3G, 4G et 5G avec et sans SDN

### b. Evaluation de la Gigue

La gigue offerte par les réseaux 3G, 4G et 5G avec l'utilisation de SDN est plus faible. Elle est de l'ordre de 0,01 ms dans le cas de réseau 5G et 0,1 ms dans le réseau 4G, et 0,2 pour le réseau 3G, la gigue a été améliorée de 10% (figure 62).

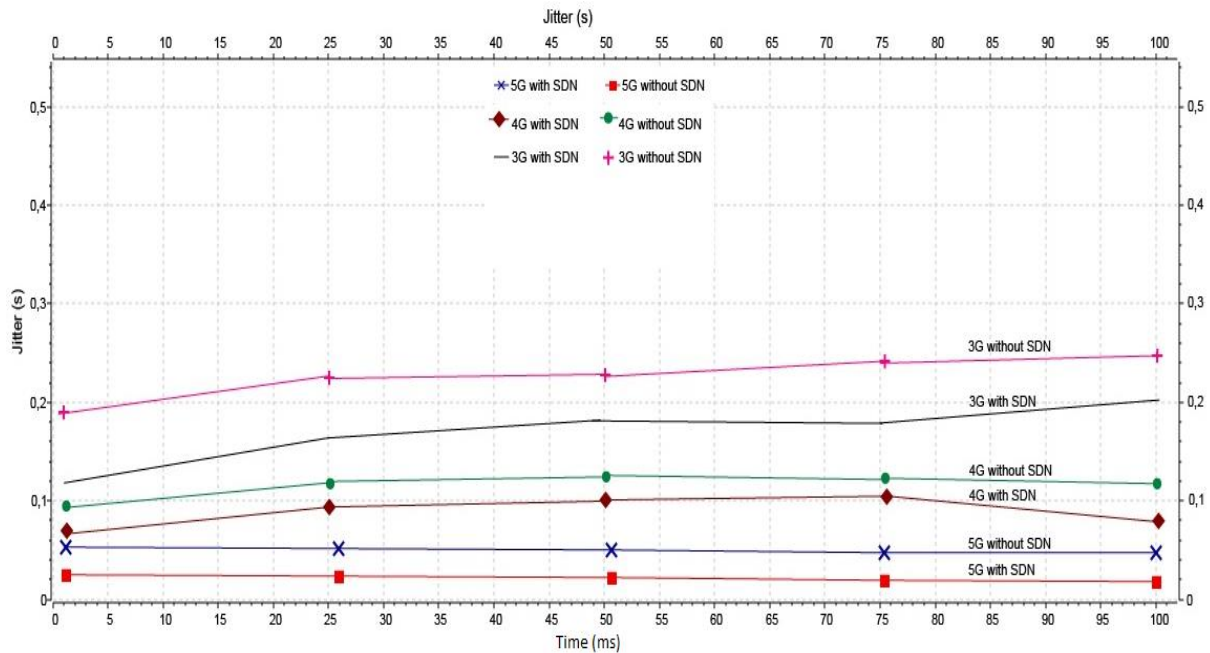


Figure 62: Gigue lors du Handover 3G, 4G et 5G avec et sans SDN

### c. Paquets perdus

La figure 63 présente l'amélioration des performances du nombre de paquets perdus dans les réseaux 3G, 4G et 5G via SDN, ce qui permet de diminuer la perte de paquets même avec l'augmentation de la vitesse avec 10%.

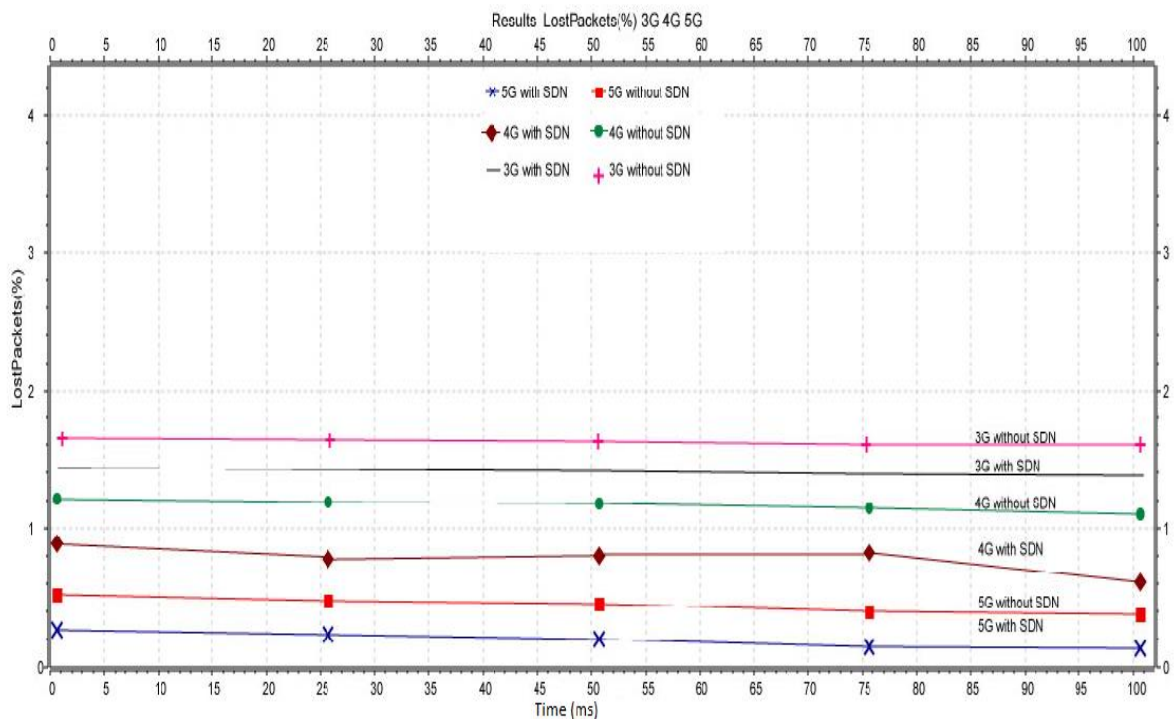


Figure 63: Paquets perdus lors du Handover 3G, 4G et 5G avec et sans SDN

#### d. Mean Opinion Score

La figure 64 montre l'amélioration des performances de MOS dans les réseaux 3G, 4G, et 5G. Nous constatons que le MOS s'améliore dans ces scénarios à savoir 5G (5) est supérieur que celui de 4G (4) et 3G (3).

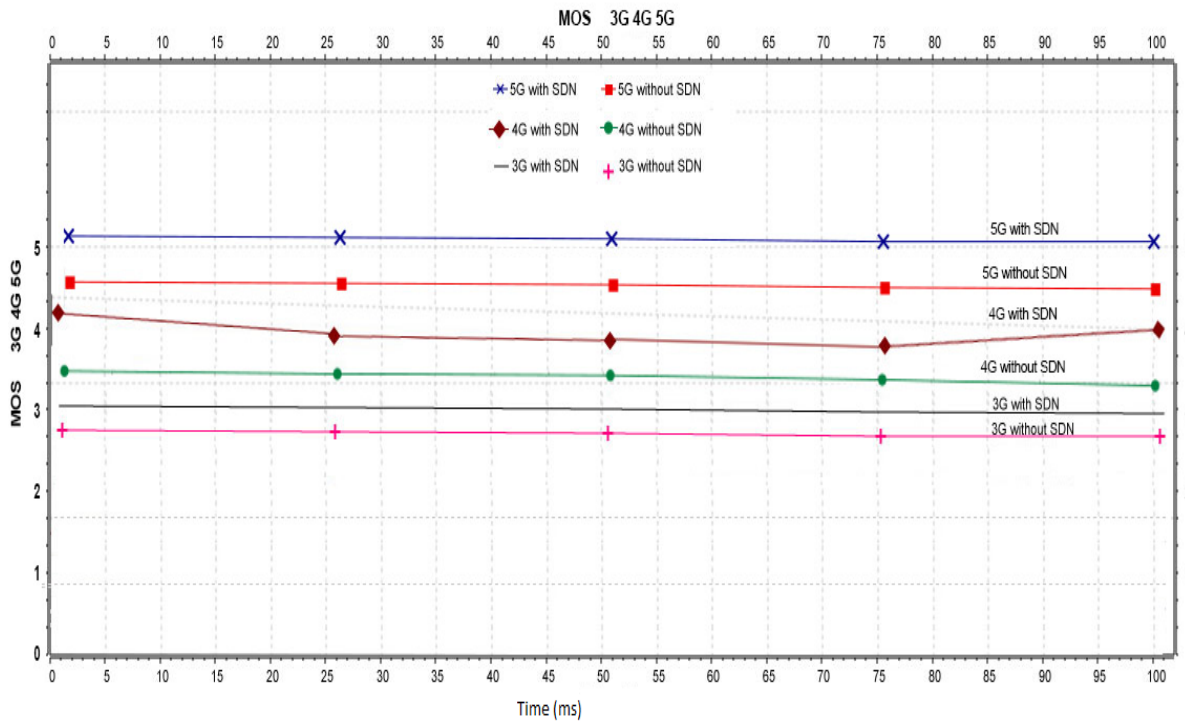


Figure 64: MOS lors Handover 3G, 4G et 5G avec et sans SDN

#### e. Temps d'exécution de Handover sous 3G, 4G et 5G avec et sans SDN

La figure 65 présente le temps de d'exécution du Handover des nœuds sous 3G, 4G, et 5G. Nous constatons que l'intégration de l'approche SDMN dans les réseaux cellulaires a permis améliorer le temps dans ces technologies avec 10%.

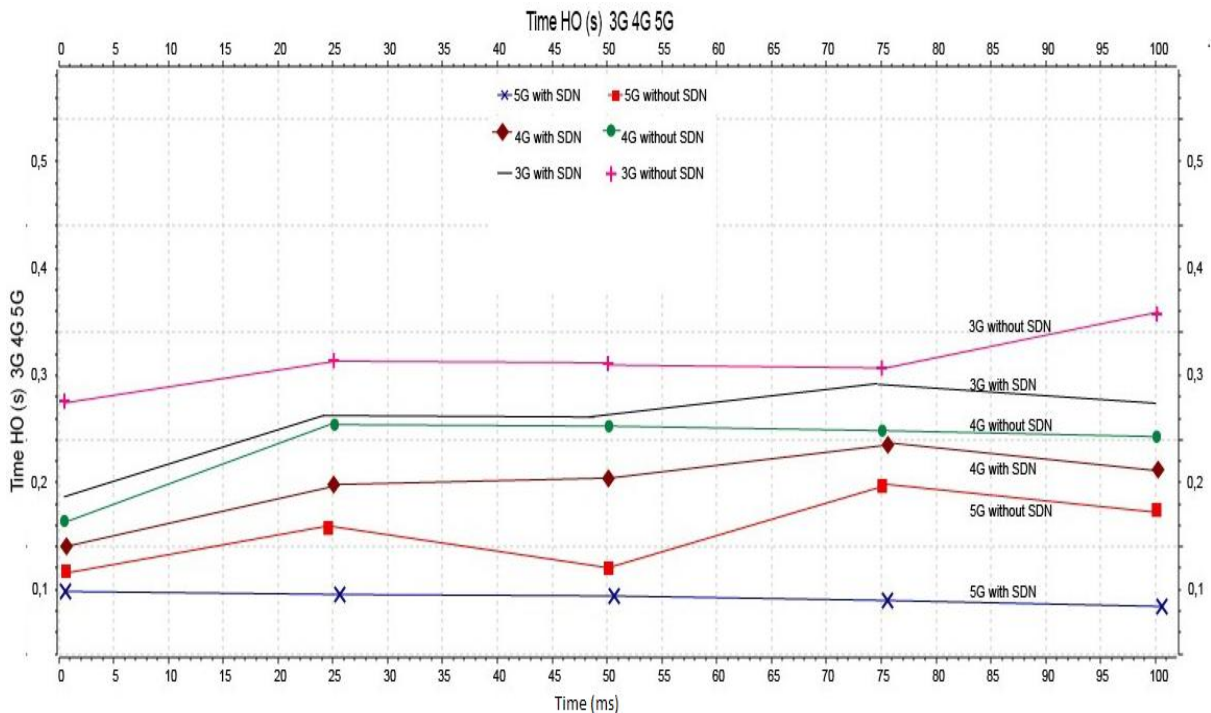


Figure 65: Temps d'exécution de 3G, 4G et 5G avec et sans SDN

## VI. Synthèse de l'évaluation

Le tableau 12 présente la synthèse de l'évaluation des réseaux cellulaires de nouvelle génération 3G, 4G, et 5G utilisant SDN.

Technologies/ Paramètre de Ho	3G		4G		5G	
	sans SDN	avec SDN	sans SDN	avec SDN	sans SDN	avec SDN
Délai de bout en bout (delay ms)	22<D<32	12<D<23	11<D<21	10<D<19	7<D<11	6<D<8
Gigue (jitter ms)	19<J<20	11<J<20	10<J<11	8<J<19	0,2	0,1
MOS	2,9	3	3,2	4	4,5	4,8
Temps de HO (ms)	29<Ho<36	19<Ho<30	13<Ho<24	12<Ho<21	10<Ho<18	9<Ho<10
Paquet perdu (packet loss) %	1,5	1,2	1,1	0,5	0,2	0,1

Tableau 12: Synthèse de l'évaluation des réseaux de nouvelle génération 3G, 4G, et 5G avec l'approche SDN

Nous synthétisons que les performances de toutes les technologies, 3G, 4G, et 5G sont améliorées avec l'approche SDN.

Nous abrégeons que l'approche SDMN dans les réseaux cellulaires de nouvelles générations a permis de baisser le taux de perte de paquets, le délai de transmission de bout en bout, et la gigue dû au Handover, ce qui améliore le MOS.

### Conclusion

SDMN offre une meilleure solution pour les utilisateurs cherchant à minimiser le temps du Handover pour améliorer la qualité de service.

Le SDN nous permet d'améliorer les paramètres sensibles de Handover dans les réseaux impliqués notamment 3G, 4G et 5G.

Ce chapitre a présenté l'apport de l'approche SDN dans l'amélioration du Handover dans les cellules 3G, 4G et 5G, et permet de justifier que le réseau impliqué 5G avec et sans SDN est le plus performant par rapport aux technologies 3G et 4G. La réalisation de ce travail est via l'implémentation des algorithmes de transfert intercellulaire par l'aire utilisant OMNeT4.6++.

SDMN permet de centraliser les tâches des interfaces liés aux stations de base afin d'améliorer les performances de transfert intercellulaires en enlevant les interfaces (Iub, X2, et Xn) pour les architectures 3G, 4G et 5G successivement.

Nous avons utilisé le protocole MIP et ses extensions pour le changement du point d'attachement du réseau mère vers le réseau visité, il utilise une adresse HoA d'une manière permanente, puis il utilise l'adresse CoA d'une manière temporaire, avec les deux agents FA et HA pour faire la translation et la correspondance entre CoA et HoA.

## *Conclusion générale et perspectives*

Avec le développement important des réseaux mobiles, de nouveaux besoins apparaissent notamment en termes de mobilité. La localisation du terminal mobile ainsi que la prédiction de la future cellule que le mobile va visiter, sont devenues des parties intégrantes d'anticipation dans les réseaux mobiles, notamment pour la réservation des ressources, ce qui rend la garantie de la qualité de service dans un environnement mobile une tâche très difficile.

En effet, la mobilité ou Handover entre cellule peut entraîner une rupture de la communication ou engendrer des retards d'établissement de l'appel. D'où la nécessité d'introduire des méthodes rapides et efficaces assurant la continuité de la communication tout en se déplacent.

D'autre part, les réseaux mobiles deviennent aujourd'hui "Tout IP" et la qualité de service habituellement offerte par les réseaux à commutation de circuit ne peut être garantie par les réseaux IP. C'est pourquoi, nous nous proposons dans cette thèse d'améliorer la qualité de service dans les réseaux IP et en particulier dans les réseaux mobiles 3G, 4G, 5G, WiMAX et WiFi. Nous avons fixé comme objectif de réduire la latence, la gigue, le taux de perte et le temps d'exécution du Handover horizontal ou vertical.

Pour ce faire, nous avons proposé des méthodes à base de SDN à savoir SDWN, SDMN pour améliorer la qualité de services dans ces réseaux.

Le SDWN a été adopté pour l'amélioration de la QoS dans les réseaux sans fil WiFi et WiMAX en intégrant l'approche SDN dans la partie Radio. Cependant le SDMN a été déployé pour les réseaux mobiles 3G, 4G, et 5G, afin de regrouper les tâches des interfaces liées aux stations de base au niveau de contrôleur. Cette centralisation a permis le débarras des interfaces Iub, X2, et Xn utilisés respectivement dans les architectures 3G, 4G et 5G pour réduire le temps d'accès aux cellules. Le contrôleur SDN se charge aussi de la gestion de la mobilité et garantit un délai d'accès optimal.

Nos approches à base de SDN, nous ont permis une réduction nette du délai de bout en bout, de la gigue et du taux de perte, aussi le MOS a subi une amélioration considérable.

Nous avons également réussi à réduire le temps d'exécution du Handover, grâce à l'utilisation des protocoles MIP et son extension NEMO pour gérer la mobilité du Terminal mobile (MN) au niveau IPv6, il permet au MN d'utiliser deux adresses IP. Un MN peut changer le point d'attachement d'un réseau à un autre, il s'identifie par son adresse IP, qui est HoA sur son réseau mère, quand il atteint le réseau visité, il utilise une adresse temporaire CoA programmé par l'agent visité, pour envoyer et recevoir les paquets sur ce nouveau réseau, en se basant sur les deux agents 'mère et visité' pour la translation entre les adresses IP CoA et IP HoA.

De plus nous avons réussi à diminuer le taux de perte lors du Handover, via l'exploitation du protocole MIH et ses versions pour maintenir une connexion continue lors du passage d'un réseau à un autre.

Parallèlement, nous avons développé un point d'accès qui intègre le protocole OpenFlow et communique avec le contrôleur, afin de centraliser et de maintenir le processus de gestion du transfert, donc le traitement des données. Notre contrôleur agit comme un serveur d'authentification où les nœuds mobiles s'authentifient une fois, ce qui réduit le temps



de changement de point d'accès. Il a également été décidé de connecter les points d'accès avec une liaison Ethernet pour éliminer les interférences.

Notre architecture proposée réduit le coût du matériel, les messages de signalisation, le retard lié au changement de point d'accès et fournit une seule authentification centralisée. La QoS est nettement améliorée, chose que nous avons prouvé par simulation via OMNeT 4.6<sup>++</sup>.

D'autre part, les paramètres de la qualité de service sont affectés par plusieurs facteurs tels que la vitesse de mobilité, la puissance d'émission, l'emplacement, les messages de signalisation, le type de modulation choisi, le bruit, l'énergie. La technologie SDN, nous a permis de réduire la charge de traitement grâce à l'utilisation du contrôle centralisé des équipements via un contrôleur, ce qui nous donne la possibilité de programmer le contrôleur pour qu'il intervienne également dans la prise de décision et le changement transparent du point de fixation.

Comme perspectives nous envisageons d'évaluer et d'améliorer les performances de Handover vertical entre les réseaux 3G, 4G, 5G et 6G pour garantir une interopérabilité entre ces technologies. Nous pensons aussi à intégrer d'un cloud RAN (CRAN) par déploiement du SDN pour augmenter le taux de réussite du Handover.

L'application de l'intelligence artificielle au contrôle d'admission dans les réseaux pour le choix de la meilleure cellule candidate vers laquelle le mobile peut migrer est un autre site à déployer dans les perspectives.

Généralement, les solutions logicielles paraissent vulnérables et peuvent facilement être attaquées. Nous nous proposons aussi dans le cadre des perspectives de développer l'aspect de sécurité dans les réseaux SDN.

# Production scientifique

## 1. liste des publications

Cette partie contient la liste des publications dans des revues Indexées Scopus et Thomson Routers.

**1- Fatima LAASSIRI**, Mohamed MOUGHIT, Nouredine IDBOUFKER, ‘‘Evaluation the QOS parameters in Different SDN Architecture using OMNeT 4.6++’’, **ISSN: 2573-539X, IEEE**, Mars 2017. ‘‘<https://ieeexplore.ieee.org/document/8314976>’’, (**Indexé Scopus, DBLP ...**).

**2- Fatima LAASSIRI**, Mohamed MOUGHIT, Nouredine IDBOUFKER, ‘‘Improvement of Multiprotocol Label Switching Network’s Performance Using Software Defined Network Approach’’, IJSER Volume 9, Issue6, ISSN 2229-5518, Juin 2018 Edition, **ISSN 2229-5518**, ‘‘<https://www.ijser.org/researchpaper/Improvement-of-Multiprotocol-Label-Switching-Networks-Performance-using-Software-Defined-Network-Approach.pdf>’’,(**Thomson Reuters Research ID**)

**3- Fatima LAASSIRI**, Mohamed MOUGHIT, Nouredine IDBOUFKER, ‘‘QOS evaluation in SDN and Ethernet networks’’, IJSER, ‘‘International Journal of Scientific & Engineering Research’’ -IJSER **ISSN 2229-5518**, Volume 9, Issue 6, Juin 2018 Edition, ‘‘<https://www.ijser.org/researchpaper/QOS-evaluation-in-SDN-and-Ethernet-networks.pdf>’’. (**Thomson Reuters Research ID**)

**4- Fatima LAASSIRI**, Mohamed MOUGHIT, Nouredine IDBOUFKER, ‘‘Handover and Load Balancing in Universal Mobile Telecommunication System Network Using Software Defined Network’’, Revue Mediterranee des Telecommunications, (RMT), **ISSN: 2458-6765**, Vol 8, No 2, Mai 2018, ‘‘<https://revues.imist.ma/index.php?journal=RMT&page=article&op=view&path%5B%5D=12819&path%5B%5D=7463>’’ (**Indexé Google Scholar**).

**5- Fatima LAASSIRI**, Mohamed MOUGHIT, Nouredine IDBOUFKER, ‘‘Improvement of the Vertical Handover Decision and Quality of Service in Heterogeneous Wireless Networks using Software Defined Network’’, **ISSN: 2156-5570**, (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 9, No. 12, 2018, ‘‘[https://thesai.org/Downloads/Volume9No12/Paper\\_10-Improvement\\_the\\_Vertical\\_Handover\\_Decision.pdf](https://thesai.org/Downloads/Volume9No12/Paper_10-Improvement_the_Vertical_Handover_Decision.pdf)’’. (**Indexé Scopus, DBLP**).

**6- Fatima LAASSIRI**, Mohamed MOUGHIT, Nouredine IDBOUFKER, ‘‘An Improvement of Performance in Virtual Local Area Network or Virtual LAN using Software Defined Network’’, International Journal of Innovative Science and Research Technology **ISSN No:- 2456-2165**, Volume 3, Issue 9, ‘‘<https://www.scribd.com/document/389581018/An-Improvement-of-Performance-in-Virtual-Local-Area-Network-or-Virtual-LAN-using-Software-Defined-Network>’’, Septembre 2018, (**Thomson Reuters Research ID**)

**7- Fatima LAASSIRI**, Mohamed MOUGHIT, Nouredine IDBOUFKER, ‘‘An Improvement of Performance Handover in Worldwide Interoperability for Microwave Access using Software Defined Network’’, **ISSN: 2156-5570**, (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol 9, No. 12, 2018, ‘‘[https://thesai.org/Downloads/Volume9No12/Paper\\_13- An\\_Improvement\\_of\\_Performance\\_Handover.pdf](https://thesai.org/Downloads/Volume9No12/Paper_13-An_Improvement_of_Performance_Handover.pdf), (**Indexé Scopus, DBLP ...**).



- 8- Fatima LAASSIRI**, Mohamed MOUGHIT, Noureddine IDBOUFKER, “Improvement of the Handover and Quality of Service on Software Defined Wireless Networks”, **ISSN**: 2156-5570, (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 9, No. 12, 2018, “[https://thesai.org/Downloads/Volume9No12/Paper\\_15-Improvement\\_the\\_Handover\\_and\\_Quality\\_of\\_Service.pdf](https://thesai.org/Downloads/Volume9No12/Paper_15-Improvement_the_Handover_and_Quality_of_Service.pdf)”. (**Indexé Scopus, DBLP ...**).
- 9- Fatima LAASSIRI**, Mohamed MOUGHIT, Noureddine IDBOUFKER, “An improvement of performance in 4G using Software Defined Network”, **ISSN**: 2456-2165 **IEEE CiSt 2018** à Marakech, “<https://ieeexplore.ieee.org/document/8596517>”. (**Indexé Scopus, DBLP ...**).
- 10- Fatima LAASSIRI**, Najib MOUHASSINE, Mohamed MOUGHIT, Noureddine IDBOUFKER, “Multicriteria Handover in 5G using Software Defined Network to Improve QoS” en phase de soumission de l’article.
- 11- Fatima LAASSIRI**, Mohamed MOUGHIT, Noureddine IDBOUFKER, “Handover and QoS parameters a Performance Assessment on 3G based SDN”, **ISBN**: 978-3-030-34268-5, **Springer** 13-12-2019 (**Indexé Scopus, DBLP**).
- 12- Najib MOUHASSINE, Fatima LAASSIRI**, Mohamed MOUGHIT, “Improving the Quality of Service of Voice over IP in Wireless Sensor Networks by Centralizing Handover Management and Authentication Using the SDN Controller”, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8942345>, 978-1-7281-0003-6/19/\$31.00, **ISSN** No:- 2456-2165, **IEEE**, 26 Décembre 2019 (**Indexé Scopus, DBLP ...**).

## **2. Communications dans des conférences nationales et internationales**

- 1- Fatima LAASSIRI**, Mohamed MOUGHIT, Noureddine IDBOUFKER, “Comparaison entre les réseaux SDN et les réseaux Ethernet”, La 4<sup>ème</sup> édition Journée Doctorant, FST-Settat, 20-21 Avril 2016.
- 2- Fatima LAASSIRI**, Mohamed MOUGHIT, Noureddine IDBOUFKER, “L’Apport des Réseaux SDN pour l’Amélioration des Performances des Réseaux”, The First Edition of International Workshop on New Services and Networks (WNSN’2016), ENSA-Khouribga, 23-24 Mai 2016.
- 3- Fatima LAASSIRI**, Mohamed MOUGHIT, Noureddine IDBOUFKER, “QOS Evaluation in SDN and Ethernet networks”, Second International Performance on Modern Technologies in Engineering and Science (ICMTES’17), Publication au journal IJSER, **ISSN** 2229-5518, Tamil Nadu, Inde Juin 2018. (**Thomson Reuters Research ID**)
- 4- Fatima LAASSIRI**, Mohamed MOUGHIT, Noureddine IDBOUFKER, “QOS and scalability Evaluation in SDN and Ethernet Network using OMNeT4.6++”, 5<sup>th</sup> International Conference on Control and Signal Processing, (CSP 2017), Proceeding of Engineering and Technologie-PET, Vol 25 pp 1-5 **ISSN** 2356-5608, Kairouan, Tunisie, 28-30 Octobre 2017.
- 5- Fatima LAASSIRI**, Mohamed MOUGHIT, Noureddine IDBOUFKER, “Evaluation the QOS parameters in Different SDN Architecture using OMNeT 4.6++”, 18<sup>th</sup> International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering, (STA 2017), **ISSN**: 2573-539X, **IEEE Conference**, 21-23 December 2017. Monastir, Tunisie. (**Indexé Scopus, DBLP ...**).

- 6- Fatima LAASSIRI**, Mohamed MOUGHIT, Nouredine IDBOUFKER, “Intake of the SDN Approach in Improving the QOS in Network Using OMNeT 4.6++”, International Conference on Electrical, Electronics, Computers Communication, Mechanical and Computing, (EECCMC’2018), **IEEE Conference**, 28 – 29 Janvier 2018, Tamil Nadu, Inde. **(Indexé Scopus, DBLP ...)**.
- 7- Fatima LAASSIRI**, Mohamed MOUGHIT, Nouredine IDBOUFKER, “Assessment the Performance of Handover and QoS Parameters on 3G Network Utilizing SDN ”, Middle East & North Africa Conference for Information Systems (MENACIS 2018), **Springer Conference**, ISBN: 978-3-030-34268-5, 22-23 Mars 2018, Paris - France. **(Indexé Scopus, DBLP ...)**.
- 8- Fatima LAASSIRI**, Mohamed MOUGHIT, Nouredine IDBOUFKER, “Handover and Load Balancing in Universal Mobile Telecommunication System Network Using Software Defined Network”, Congr  M diterran enne des Telecommunications (RMT), (CMT’18), Publication au Revue M diterran enne des telecommunications, **ISSN: 2458-6765**, 10-11 Mai 2018 FST, El jadida.
- 9- Fatima LAASSIRI**, Mohamed MOUGHIT, Nouredine IDBOUFKER, “Handover Multicriteria Handover in 4G using Software Defined Network to Improve QoS”, 5 Edition International **IEEE Congress** on Information Science and Technology, **ISSN: 2327-1884 IEEE CiST**, Marakech, October 21-27, 2018, **(Indexé Scopus, DBLP ...)**.
- 10- Najib MOUHASSINE, Fatima LAASSIRI**, Mohamed MOUGHIT, “L’impact de la technologie SDN sur les performances du Réseau WIFI”, journ e doctorale, ENSA de Khouribga, Workshop Mercredi 27 Février 2019
- 11- Najib MOUHASSINE, Fatima LAASSIRI**, Mohamed MOUGHIT, “Improving the Quality of Service of Voice over IP in Wireless Sensor Networks by Centralizing Handover Management and Authentication Using the SDN Controller”, **ISBN: 978-1-7281-0003-6**, The Third International Conference on Intelligent Computing in Data Sciences ICDS2019, 28-29-30 October 2019, Marrakech-Maroc, **IEEE Congrès**, **(Indexé Scopus, DBLP ...)**.

## Bibliographie

- [1] Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015-2020', Cisco Visual Networking Index, White Paper, <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c1-520862.html>, 2016.
- [2] statistiques 2019 des utilisateurs actifs des mobiles, “<http://www.e-works.fr/blog/chiffres-cles-2019-utilisateurs-dinternet-mobile-reseaux-sociaux/>”, Juillet 2019
- [3] Peng Xiao, WenyuQu, Heng Qi, Zhiyang Li, YujieXu, “The SDN controller placement problem for WAN”, 2014 IEEE/CIC International Conference on Communications, Chine (ICCC), IEEE, 13-15 Octobre 2014.
- [4] Nadjib Achir, Mauro S. P. Fonseca, Yacine M. GhamriDoudane, NazimAgoulmine, Ahmed Mehaoua, “Active networking system evaluation: A practical experience”, *Networking and Information Systems Journal*. Volume 3 – No. 5/2000, pages X to X, 2000
- [5] Benamrane Fouad, “Etude des Performances des Architectures du Plan de Contrôle des Réseaux ‘Software-Defined Networks’”, Thèse 2017
- [6] C. Laissaoui, N. Idboufker, R. Ellassali, K. El Baamrani, “A measurement of the response times of various OpenFlow/SDN controllers with CBench”, *IEEE/ACS 12th International Conference of Computer Systems and Applications (AICCSA)*, Marrakech, Morocco, 2016
- [7] Jaouad Benabbou, Khalid Elbaamrani, Noureddine Idboufker, Raja Ellassali, “Software-defined networks, security aspects analysis”, *11th International Conference on Information Assurance and Security (IAS)*, Marrakech, Morocco, 2016
- [8] Najib MOUHASSINE, Mohamed MOUGHIT, Fatima LAASSIRI, “Improving the Quality of Service of Voice over IP in Wireless Sensor Networks by Centralizing Handover Management and Authentication Using the SDN Controller”, *IEEE, Congrès ICDS 2019*
- [9] Armel FrancklinSimo Tegueu, Pascal Berthou, Slim Abdellatif, Thierry Villemur, Faten Mkachern, “DDS and SDN in symbiosis for dynamic applications”, *2015 International Conference on Protocol Engineering (ICPE) and International Conference on New Technologies of Distributed Systems (NTDS)*, Paris, France, IEEE, July 2015
- [10] A. Doria, F. Hellstrand, K. Sundell, and T. Worster, “General Switch Management Protocol (GSMP) V3. RFC 3292 (Proposed Standard)”, 2002.
- [11] A. Greenberg, G. Hjalmtysson, D.A. Maltz, A. Myers, J. Rexford, G. Xie, H. Yan, J. Zhan et H. Zhang, “A Clean Slate 4D Approach to Network Control and Management”, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 35(5), pp. 41–54, 2005.
- [12] M. Casado, M. J. Freedman, J. Pettit, J. Luo, N. McKeown et S. Shenker, “Ethane: Taking Control of the Enterprise”, *Proceedings of the Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications*, pp. 1–12, 2007.
- [13] N. Gude, T. Koponen, J. Pettit, B. Pfaff, M. Casado, N. McKeown et S. Shenker, “NOX: Towards an Operating System for Networks”, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 38(3), pp. 105–110, 2008.
- [14] Faycal Bensalah, Najib El Kamoun, “towards a new SDN NFV approach for the management of MPLS infrastructures”, *3C Tecnología. Glosas de innovación aplicadas a la pyme. Special Issue*, November 2019, 107-119. Doi: <http://dx.doi.org/10.17993/3ctecno.2019.specialissue3.107-119>
- [15] Software-Defined Networking (SDN) Definition, <https://www.opennetworking.org/sdn-resources/sdn-definition>, 2016
- [16] Christophe Farquet, “Lutte contre l'évasion fiscale : l'échec de la SDN durant l'entre-deux-guerres”, 2009/4 n° 44 | pages 93 à 112 ISSN 1293-6146, Distribution électronique Cairn.info pour Altern. Economiques, 2009

- [17] Cédric TERNON et Joël Goossens, Jean-Michel Dricot, ‘‘Faisabilité des réseaux définis par logiciel (SDN) pour les applications critiques et temps réel’’, Œuvre, Actes de École d’Été Temps Réel, Référence ETR, 24-28 Août 2015
- [18] Paul-André Rosental, ‘‘Géopolitique et État-providence. Le BIT et la politique mondiale des migrations dans l’entre-deux-guerres’’, Journal Combridge of Academic Content, Volume 61, Issue 1, pp. 99-134, Mai 2017.
- [19] Sakir Sezer, Sandra Scott-Hayward, and Pushpinder Kaur Chouhan, ‘‘Are We Ready for SDN? Implementation Challenges for Software-Defined Networks’’, Future Carrier Networks, IEEE Communications Magazine, 0163-6804/13/\$25.00 © 2013 IEEE, Juillet 2013.
- [20] Pankaj Berde, Matteo Gerola, Jonathan Hart, Yuta Higuchi, Masayoshi Kobayashi, Toshio Koide, Bob Lantz, Brian O’Connor, Paylin Radoslavoy, William Snow, Guru Parulkar, ‘‘ONOS: towards an open, distributed SDN OS’’, ACM Digital Library, 2014
- [21] Zuhra Khan Khattak, Muhammad Awais, Adnan Iqbal, ‘‘Performance evaluation of OpenDaylight SDN controller’’, Electronic ISBN: 978-1-4799-7615-7Hsinchu, Taiwan, Avril 2015
- [22] A. Voellmy and J. Wang, ‘‘Scalable Software Defined Network Controllers’’, Proceedings of the ACM SIGCOMM Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication. New York, NY, USA: ACM, pp. 289–290, 2012.
- [23] Ryan Wallner<sup>1</sup>, Robert Cannistra, ‘‘An SDN Approach: Quality of Service using Big Switch’s Floodlight Open-source Controller’’, Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network 2013 v. 35, p. 14-19. <http://dx.doi.org/10.7125/APAN.35.2> ISSN 2227-3026, 2013
- [24] Balakrishnan Chandrasekaran, Theophilus Benson, ‘‘Tolerating SDN Application Failures with LegoSDN’’, ACM DL, Octobre 27 - 28, 2014
- [25] POX, <https://github.com/noxrepo/pox>, 2016.
- [26] Maestro, <http://zhengcai.github.io/maestro-platform/>, 2016.
- [27] D. Erickson, ‘‘The Beacon OpenFlow Controller’’, Proceedings of the Second ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking. New York, NY, USA: ACM, pp. 13–18, 2013
- [28] SNAC: Simple Network Access Control, <https://github.com/bigs-witch/snac>, 2016.
- [29] Floodlight OpenFlow Controller. <http://www.Projectfloodlight.org/floodlight/>, 2016.
- [30] Hanyu Zhang, Che-Lun Hung, Meiyuan Liu, Xiaoye Hu, and Yi-Yang Lin, ‘‘NCNet: Deep Learning Network Models for Predicting Function of Non-coding DNA’’, doi: 10.3389/fgene.2019.00432, Journal List, Front Genet, 2019
- [31] Hung, YunnChungBor, ChinChenJin, JyeLin, ‘‘A PI-type fuzzy controller with self-tuning scaling factors’’, Volume 93, Issue 1, ScienceDirect, Pages 23-281 January 1998
- [32] S. Ishii, E. Kawai, T. Takata, Y. Kanaumi, S. Saito, K. Kobayashi, and S. Shimojo, ‘‘Extending The RISE controller for the interconnection of RISE and OS3E/NDDI’’, 18<sup>th</sup> IEEE International Conference on Networks ICON. IEEE, pp. 243–248, 2012.
- [33] Trema controller: Full-Stack OpenFlow Framework in Ruby and C. <https://trema.github.io/trema/>, 2016.
- [34] Ryu SDN Framework <http://osrg.github.io/ryu/>, 2016.
- [35] OSGi Alliance – The Dynamic Module System for Java. <https://www.osgi.org/>, 2016.
- [36] R. Fielding, ‘‘Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures’’, Ph.D. dissertation, University of California, IRVINE, 2000.
- [37] OpenDaylight: A Linux Foundation Collaborative Project. <http://www.opendaylight.org/>, 2016.
- [38] Dan Levin, Andreas Wundsam, Brandon Heller, Nikhil Handigol, Anja Feldmann, ‘‘Logically centralized?: state distribution trade-offs in software defined networks’’, ACM Digital Library, HotSDN ’12 Proceedings of

the first workshop on Hot topics in software defined networks Pages 1-6, Helsinki, Finland — Août 13 - 13, 2012

[39] Kévin Phemius; Mathieu Bouet ; Jérémie Leguay, “DISCO: Distributed multi-domain SDN controllers”, Electronic ISBN: 978-1-4799-0913-1, IEEE, Krakow, Poland, Juin 2014

[40] Frédéric Havet, Nicolas Huin, Joanna Moulhierac, Khoa Phan “Routage vert et compression de règles SDN”, ALGOTEL 2015 - 17èmes Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications, Beaune, France. fhal-01148471f, Jun 2015

[41] E. Haleplidis, Ed, K. Pentikousis, Ed, J. Hadi Salim, “Software-Defined Networking (SDN): and Architecture Terminology”, ISSN: 2070-1721, Internet Research Task Force (IRTF), Request for Comments: 7426, RFC 7426, Janvier 2015

[42] OpenFlow Switch Consortium and Others. OpenFlow Switch Specification Version 1.5.0, <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/onf-specifications/openflow/openflow-switch-v1.5.0.noipr.pdf>, 2014

[43] Barbara Fraser and David Lake, Jim Finnegan and Niel Viljoen, Marc Miller and Navneet Rao, “Are We Ready for SDN? Implementation Challenges for Software-Defined Networks”, IEEE Communications Magazine, 0163-6804/13/\$25.00 © 2013 IEEE, 2013

[44] T. Tsou, P. Aranda, H. Xie, R. Sidi, H. Yin, and D. Lopez, “SDNi: A Message Exchange Protocol for Software Defined Networks (SDNS) across Multiple Domains”, <https://tools.ietf.org/html/draft-yin-sdn-sdni-00>, 2012.

[45] Ruolin Fan, Ciarán McGoldricky, Mario Gerla, “An SDN architecture for under water search and surveillance”, 10.1109/WONS.2017.7888776, Jackson, WY, USA, March 2017

[46] Kshira Sagar Sahoo, “SDN Architecture on Fog Devices for Realtime Traffic Management: A Case Study”, Proceedings of the International Conference on Signal, Networks, Computing, and Systems pp 323-329, book series (LNEE, volume 395), Springer, October 2016

[47] Fouad Benamrane, Mouad Ben Mamoun, Redouane Benaini, “New method for controller-to-controller communication in distributed SDN architecture”, <https://doi.org/10.1504/IJCND.2017.086493>, International Journal of Communication Networks and Distributed Systems, Volume 19, Issue 3, 2017

[48] Guodong Wang, Yanxiao Zhao, Jun Huang, Qiang Duan, Jun Li, “A K-means-based network partition algorithm for controller placement in software defined network”, DOI: 10.1109/ICC.2016.7511441, IEEE International Conference on Communications (ICC), IEEE Xplore: 14 Juillet 2016

[49] Oshri, Ilan, Kotlarsky, Julia, Willcocks, Leslie, “Managing Dispersed Expertise in IT Offshore Outsourcing: Lessons from TATA Consultancy Services”, MIS Quarterly Executive, Vol. 6 Issue 2, p53-65. 13p. 3 Diagrams, Springer 2007

[50] Jean-Pierre Soulès, Dossier: comprendre le SDN, ou l'art de virtualiser le réseau, <https://www.clubic.com/pro/it-business/article-689058-1-dossier-sdn-openstack-art-irtualiser-reseau.html>, Avril 2014

[51] Jose Ordonez-Lucena, Pablo Ameigeiras, Diego Lopez , Juan J. Ramos-Munoz, Javier Lorca , Jesus Fol, “Network Slicing for 5G with SDN/NFV: Concepts, Architectures, and Challenges”, IEEE Communications Magazine, Volume: 55 , Issue: 5 , Mai 2017

[52] Sanjit Biswas, Robert Morris, Opportunistic routing in multi-hop wireless networks, ACM Digital Library, Volume 34 Issue 1, Pages 69-74, Janvier 2004.

[53] Shohei Yamashita, Hisaharu Tanaka, Yoshiaki Hori, Makoto Otani, Kenzi Watanabe, “Development of Network User Authentication System Using OpenFlow”, Electronic ISBN: 978-0-7695-5093-0, IEEE, December 2013

[54] Maxence Tury, Les risques d'OpenFlow et du SDN, Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information 4 juin 2015

- [55] Olivier Flauzac, Carlos Gonzalez, Florent Nolot, “Original secure architecture for IoT based on SDN”, 10.1109/NOTERE.2015.7293481, IEEE, Paris, France, October 2015
- [56] Armel FrancklinSimo Tegueu, Pascal Berthou, Slim Abdellatif, Thierry Villemur Faten Mkacher, “DDS et SDN en symbioses pour les applications dynamiques”, HAL-LAAS Open Archive Laboratory for Analysis and Architecture of Systems, Juillet 2015
- [57] C. Laissaoui, N. Idboufker, R. Ellassali, K. El Baamrani, “a measurement of the response times of various OpenFlow/SDN controllers with CBench”, Electronic ISSN: 2161-5330, IEEE, Juillet 2016
- [58] OpenFlow Switch Consortium and Others. OpenFlow Switch Specification Version 1.5.0, <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/onf-specifications/openflow/openflow-switch-v1.5.0.noipr.pdf>, 2014.
- [59] Le Protocole OpenFlow dans l’architecture SDN (Software Defined Network) EFORT <http://www.efort.com>, Copyright Effort 2016
- [60] Carlos Javier Gonzalez Santamaria, “Management of a heterogeneous distributed architecture with the SDN”, thèse HAL Archives-Ouvertes, HAL Id: tel-01677840 <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01677840v1>, 2018
- [61] Marc Bruyère, David Delavennat, “Utilisation d’OpenFlow et des modules Split Data Plane de DELL pour traiter le DUID-MAC-spoofing des requêtes DHCPv6”, HAL Id: hal-00914181 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00914181>, Montpellier, France, Décembre 2013
- [62] FrancklinSimo, Pascal Berthou, Slim Abdellatif, Thierry Villemur, et Faten Mkacher, “DDS et SDN en symbiose pour les applications dynamiques”, Data Distribution Service, Software Defined Network, 2016
- [63] Mahmoud Mohamed BAHNASY “OpenFlow Protocol Extension for Optical Network”, thèse, Novembre 2014
- [64] Traore Issa, Kouassi Brou Médard, Atta A. Ferdinand, “Etude du nomadisme dans un Cloud éducatif administré par la technologie SDN/OpenFlow”, Actes de la conférence WACREN 2016
- [65] Hongyan Cui, Yabo Zhu, Yuan Yao, Li Yufeng, Yunjie Liu, “Design of intelligent capabilities in SDN”, 2014 4th International Conference on Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronics Systems (VITAE), 23 Octobre 2014
- [66] Tri-Hai Nguyen, Myungsik Yoo, “Analysis of link discovery service attacks in SDN controller”, International Conference on Information Networking (ICOIN), Da Nang, Vietnam, 17 Avril 2017
- [67] Jiawei Zhang, Jie Zhang, Yongli Zhao, Hui Yang, Xiaosong Yu, Lei Wang, and Xihua Fu, “Experimental demonstration of OpenFlow-based control plane for elastic lightpath provisioning in Flexi-Grid optical networks”, Vol. 21, Issue 2, pp. 1364-1373, OSA Publishing, 2013
- [68] Sukhveer Kaur, Japinder Singh, Navtej Singh Ghumman, “Network Programmability Using POX Controller”, “International Conference on Communication, Computing & Systems, ICCCS, 2014
- [69] Carmelo Cascone, Luca Pollini, Davide Sanvito, Antonio Capone, Brunilde Sansó, “SPIDER: Fault resilient SDN pipeline with recovery delay guarantees”, 2016 IEEE NetSoft Conference and Workshops (NetSoft), IEEE Xplore, 04 Juillet 2016
- [70] Yu Li, Deng Pan, “OpenFlow based Load Balancing for Fat-Tree Networks with Multipath Support”, IEEE, 2013
- [71] Rob Sherwood, Glen Gibb, Kok-Kiong Yap, Guido Appenzeller, Martin Casado, Nick McKeown, Guru Parulkar, “FlowVisor: A Network Virtualization Layer”, OpenFlow, TR 2009
- [72] Nabil Belaid, “Modélisation de services et de workflows sémantiques à base d’ontologies de services et d’indexations. Application à la modélisation géologique”, Poitiers, 2011

- [73] Dimitrios Gkounis, Vasileios Kotronis, Xenofontas Dimitropoulos, “Towards Defeating the Crossfire Attack using SDN”, Computer Science > Networking and Internet Architecture, arXiv.org >cs> arXiv:1412.2013, Décembre 2014
- [74] Adrian Lara, Anisha Kolasani, Byrav Ramamurthy, “Network Innovation using OpenFlow: A Survey”, DOI: 10.1109/SURV.2013.081313.00105, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Volume: 16 , Issue: 1 , First Quarter 2014
- [75] Minlan Yu, Andreas Wundsam, MurugananthamRaju, “NOSIX: a lightweight portability layer for the SDN OS”, ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Volume 44 Issue 2, pages 28-35, ACM NewYork, NY, USA, Avril 2014
- [76] Michael Jarschel, Frank Lehrieder, Zsolt Magyari, Rastin Pries, “A Flexible OpenFlow-Controller Benchmark”, Volume: 1, Pages: 48-53, 2012 European Workshop on Software Defined Networking, DOI Bookmark: 10.1109/EWSDN.2012.15, IEEE Digital Library, 2012
- [77] Ramon Casellas, Ricardo Martínez, Raúl Muñoz, Ricard Vilalta, Lei Liu, Takehiro Tsuritani, and Itsuro Morita, “Control and Management of Flexi-grid Optical Networks With an Integrated Stateful Path Computation Element and OpenFlow Controller”, <https://doi.org/10.1364/JOCN.5.000A57>, Vol. 5, Issue 10, pp. A57-A65, Journal of Optical Communications and Networking, 2013
- [78] V. Padma , P. Yogesh, “Proactive failure recovery in OpenFlow based Software Defined Networks”, DOI: 10.1109/ICSCN.2015.7219846, Chennai, India, 2015 3rd International Conference on Signal Processing, Communication and Networking (ICSCN), IEEE, 2015
- [79] Inter-SDN Controller Communication-Using Border Gateway Protocol TCS. [http://www.tcs.com/resources/white\\_papers/Pages/InterSDN-Controller-Communication.aspx](http://www.tcs.com/resources/white_papers/Pages/InterSDN-Controller-Communication.aspx), 2016.
- [80] Lei Liu, Raúl Muñoz, Ramon Casellas, Takehiro Tsuritani, Ricardo Martínez, and Itsuro Morita, “OpenSlice: an OpenFlow-based control plane for spectrum sliced elastic optical path networks”, <https://doi.org/10.1364/OE.21.004194>, Vol. 21, Issue 4, pp. 4194-4204, OSA Publishing, Optics Express , 2013
- [81] Muñoz Tapia, José Luis, “Openflow 1.3 with RYU Controller”, URI<http://hdl.handle.net/2117/77684>, thèse, Barcelona, Espagne, 2015
- [82] Carlos Fernandez, Jose L. Muñoz, “Software Defined Networking (SDN) with OpenFlow 1.3, Open vSwitch and Ryu”, these, Barcelona, Espagne, 2015
- [83] Y. Juba, H.-H. Huang, and K. Kawagoe, ”Dynamic Isolation of Network Devices Using OpenFlow for Keeping LAN Secure from Intra-LAN Attack”, Procedia computer science, 22, pp. 810-819, 2013.
- [84] A. Hussein, I.H Elhaji, A. Chehab, and A. Kayssi. ”SDN Security Plane: An Architecture for Resilient Security Services”, IEEE International Conference on Cloud Engineering Workshop (IC2EW). IEEE xplore, 2016.
- [85] Scott D. N. Cook, Dvora Yanow, “Culture and Organizational Learning”, Journal of Management Inquiry, <https://doi.org/10.1177/105649269324010>, Vol 2, Issue 4, 1993, Décembre 1, 1993
- [86] M. MAUC and G. BAUDOIN, “Codeur Celp à Complexité Réduite”, Volume 02, Numéro C1, Deuxième Congrès Français d'Acoustique / Second French Conference on Acoustics, pages C1-327-C1-330, Journal de Physique, DOI <https://doi.org/10.1051/jp4:1992170>, Avril 1992
- [87] E. Kadušić, M. Škrbić, N. Živić, A. Žgalj, A. Hantalašević, “Implementation of a HMIPv6 extension in the INET and xMIPv6 simulation framework with dynamic MAP discovery for OMNeT 4.x”, DOI: 10.1109/MIPRO.2015.7160344, Opatija, Croatia, 2015 38th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), IEEE, 25-29 Mai 2015
- [88] EustathiaZiouva, TheodoreAntonakopoulos, “CSMA/CA performance under high traffic conditions: throughput and delay analysis”, Volume 25, Issue 3, 15 Pages 313-321, Science Direct, Computer Communications, Février 2002

- [89] M.Pióro,Á.Szentesi, J.Harmatos, A.Jüttner, P.Gajowniczek, S.Kozdrowski, “On open shortest path first related network Optimisation Problems”*Science Direct, Performance Evaluation* Volume 48, Issues 1–4, Pages 201-223, [https://doi.org/10.1016/S0166-5316\(02\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0166-5316(02)00036-6), Mai 2002
- [90] Eitan Israeli, R. Kevin Wood, “Shortest-path network interdiction”, *Networks an International Journal* , Volume40, Issue2, Pages 97-111, Septembre 2002, <https://doi.org/10.1002/net.10039>
- [91] E. Krichen, M.A. Mellakh, S. Garcia-Salicetti, B. Dorizzi, “Iris identification using wavelet packets”, DOI: 10.1109/ICPR.2004.1333771, *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition*, IEEE, Cambridge, UK, ICPR 2004.
- [92] Fouad BENAMRANE, “Etude des Performances des Architectures du Plan de Contrôle des Réseaux ‘Software-Defined Networks’”, thèse N° d’ordre 2951, Rabat, Maroc, 2017
- [93] Olena Tkachova , Mohammed Jamal Salim , AbdulghafoorRaed Yahya, “An analysis of SDN-OpenStack integration”, 2015 Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Electronic ISBN: 978-9-6697-5192-8, IEEE, Kharkiv, Ukraine, Décembre 2015
- [94] Jin-Shyan Lee, Yu-Wei Su, Chung-Chou Shen, “A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi”, IEEE, 03 Mars 2008.
- [95] Zidani Ferroudja, “Solution d’authentification et de gestion de clés pour le standard 802.11i des réseaux WiFi”, Mémoire de Master, <http://dspace.univ-setif.dz:8888/jspui/handle/123456789/1525> Mai 2018
- [96] William H. Kersting, “Distribution System Modeling and Analysis”, 2nd Edition, <https://doi.org/10.1201/9781420006162>, Engineering & Technology, 15 Novembre 2006
- [97] Slavisa Tomic, Marko Beko, Rui Dinis, “RSS-Based Localization in Wireless Sensor Networks Using Convex Relaxation: Noncooperative and Cooperative Schemes”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Volume: 64, Issue: 5, Mai 2015
- [98] Kévin DENIS, “Le roaming dans le WiFi”, Etude réalisée début 2007
- [99] Dusit Niyato, Ekram Hossain, “Wireless Broadband Access: WiMAX and Beyond Integration of WiMAX and WiFi: Optimal Pricing for Bandwidth Sharing”, *Communications Magazine IEEE*, Volume: 45, Issue: 5, Mai 2007
- [100] Fatima LAASSIRI, Mohamed MOUGHIT, Nouredine IDBOUFKER, “An improvement of performance in Vertical Handover in WiFi and WiMAX Networks using SDN”, *IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications* 2018
- [101] Chaouki Kasmi, Arnaud Ebalard et Pierre-Michel Ricordel, “De la radio matérielle à la radio logicielle : impact sur l’étude de la sécurité des réseaux sans fil”, *Proceedings C&ESAR 2011, Computer & Electronics Security Applications*, Rennes, France, <http://www.cesar-conference.fr/>, 28 - 29 - 30 Novembre 2011
- [102] Jason C.G.Halforda Shamila C.D.Wanninayakea, John E.Blundell , “Behavioral Satiety Sequence (BSS) for the Diagnosis of Drug Action on Food Intake”, *Science Direct*, Volume 61, Issue 2, Pages 159-168, [https://doi.org/10.1016/S0091-3057\(98\)00032-X](https://doi.org/10.1016/S0091-3057(98)00032-X), October 1998
- [103] William H. Kersting, “Distribution System Modeling and Analysis”, livre 2nd Edition, <https://doi.org/10.1201/9781420006162>, 15 Novembre 2006
- [104] Joseph D. Camp, Edward W. Knightly, “the IEEE 802.11s Extended Service Set Mesh Networking Standard”, *IEEE Communications Magazine*, Volume: 46, Issue: 8 , DOI: 10.1109/MCOM.2008.4597114, Août 2008
- [105] KiyohideNakauchi, Zhong Lei, Yozo Shoji, Yoshinori Kitatsuji, Manabu Ito, Hidetoshi Yokota, “Bring your own network, Design and implementation of a virtualized WiFi network”, DOI: 10.1109/CCNC.2014.6866614, 2014 IEEE 11th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, USA,10-13 Janvier 2014



- [106] Charles E. Perkins, “Ad Hoc Networking”, ©AGI-Information Management Consultants, dandelon.com network, 2008
- [107] Sinda Boussen, Nabil Tabbane, Sami Tabbane, “Performance analysis of SCTP protocol in WiFi network”, 2009 First International Conference on Communications and Networking, DOI: 10.1109/COMNET.2009.5373560, Hammamet, Tunisia, 08 Janvier 2010
- [108] Carlos Cordei, Dmitry Akhmetov, Minyoung Park, “IEEE 802.11ad: introduction and performance evaluation of the first multi-gbps wifitechnology”, Proceeding, nmCom '10 Proceedings of the 2010 ACM international workshop on mmWave communications: from circuits to networks, pages 3-8, ISBN: 978-1-4503-0142-8, Chicago, Illinois, USA, Septembre 2010
- [109] Lei Xia, Sanjay Kumar, Xue Yang, Praveen Gopalakrishnan, York Liu, Sebastian Schoenberg, Xingang Guo, “Virtual WiFi: bring virtualization from wired to wireless”, ACM DL, Proceeding VEE '11 Proceeding of the 7th ACM SIGPLAN/SIGOPS international conference on Proceeding on Virtual execution environments, pages 181 – 192, Juillet 2011
- [110] Collection ATENA, “WiMAX à l’Usage des Communications Haut Débit”, Ouvrage collaboratif réalisé l’atelier Wi-Fi/WiMAX de Forum ATENA sous la direction de Michèle Germain, Version partielle du 15 Mars 2008
- [111] Bensaid, Selmen and Ferjani, Meriem, “Développement d’un outil de planification d’un réseau WIMAX. Otherthesis, Université Virtuelle de Tunis, thèse, 04 Juillet 2011
- [112] Josip Milanovic, Snjezana Rimac-Drlje, Krunoslav Bejuk, “Comparison of Propagation Models Accuracy for WiMAX on 3.5 GHz”, DOI: 10.1109/ICECS.2007.4510943, 2007 14th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, Marrakech, Morocco, 07 Mai 2008
- [113] Edson P. Moraes, Jefferson Covolan, Marcio Buffalo, Leandro R. Maciel, “WiMAX Near LOS Measurements and Comparison with Propagation Models”, 2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation, Berlin, Germany, 05 Juin 2009
- [114] Tata, Chafika (2009). Algorithme de courtoisie : optimisation de la performance dans les réseaux WIMAX fixes. Mémoire de maîtrise électronique, Montréal, École de technologie supérieure, thèse, 17 Janvier 2017
- [115] Zerrouki, Hadj, “Cross-Layer Design et Access Multiple dans les réseaux sans Fil MIMO: Application au Réseaux WiMAX”, <http://dSPACE.univ-tlemcen.dz/handle/112/5017>, thèse, 14 Mai 2014
- [116] Guy Nathanzon, Chief Financial Officer & Ran Soffer, VP Marketing, “Cost-Effective Backhaul Alternatives for WiMAX Networks: Challenges & Solutions”, [www.provigent.com](http://www.provigent.com), Intelligent Silicon BroadBand Wirless, Juin 2008
- [117] Kamran Etemad, “Overview of mobile WiMAX technology and evolution”, DOI: 10.1109/MCOM.2008.4644117, IEEE Communications Magazine, Volume: 46, Issue: 10, Octobre 2008
- [118] Sayan Kumar Ray, Krzysztof Pawlikowski, Harsha Sirisena, “Handover in Mobile WiMAX Networks: The State of Art and Research Issues”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Volume: 12, Issue: 3, Page(s): 376 – 399, Third Quarter 2010
- [119] Chien-Yuan Pan, Tzyy-Sheng Horng, Wen-Shan Chen, Chien-Hsiang Huang, “Dual Wideband Printed Monopole Antenna for WLAN/WiMAX Applications”, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Volume: 6, Page(s): 149 – 151, 16 Avril 2007
- [120] MELLOUK Sanaa, “Etude et dimensionnement d’un réseau WiMAX fixe”, mémoire de MASTER, Année Universitaire : 2013/ 2014
- [121] Jing Pei, An-Guo Wang, Shun Gao, Wen Leng, “Miniaturized Triple-Band Antenna With a Defected Ground Plane for WLAN/WiMAX Applications”, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Volume: 10, Page(s): 298 - 301 DOI: 10.1109/LAWP.2011.2140090, 07 Avril 2011
- [122] Muthaiah Venkatachalam, Kamran Etemad, Wayne Ballantyne, Bonnie Chen, “Location services in WiMAX networks”, Page(s): 92 – 98, IEEE Communications Magazine, Volume: 47, Issue: 10, Octobre 2009

- [123] Prakash Iyer, Nat Natarajan, Muthaiah Venkatachalam, Anand Bedekar, Eren Gonen, Kamran Etemad, “All-IP network architecture for mobile WiMAX”, ISBN: 1-4244-0957-8, IEEE Mobile WiMAX Symposium, Orlando, FL, USA, 23 Avril 2007
- [124] Parviz Yegani, “WiMAX Overview”, Cisco Systems, IETF-64, Vancouver, Canada, Novembre 7-11, 2005
- [125] Tao Jiang, Weidong Xiang, Hsiao-Hwa Chen, Qiang Ni, “Multicast Broadcast Services Support in OFDMA-Based WiMAX Systems [Advances in Mobile Multimedia]”, Page(s): 78 – 86, IEEE Communications Magazine, Volume: 45z, Issue: 8, Août 2007
- [126] Will Hrudehy, Ljiljana Trajković, “Mobile WiMAX MAC and PHY layer optimization for IPTV”, Volume 53, Issues 11–12, Pages 2119-2135, journal ScienceDirect, <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.08.008>, Juin 2011,
- [127] Jing Pei, An-Guo Wang, Shun Gao, Wen Leng, “Miniaturized Triple-Band Antenna with a Defected Ground Plane for WLAN/WiMAX Applications”, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Volume: 10, Page(s): 298 - 301 DOI: 10.1109/LAWP.2011.2140090, 07 Avril 2011
- [128] Silva, H.; Figueiredo, L.; Rabadao, C.; Pereira, A.; “Wireless Networks Interoperability WiFi WiMAX Handover” Systems and Networks Communications, ICSNC '09. Fourth International Conference on 2009
- [129] D. Johnson, C. Perkins, J. Arkko, “RFC 3775 - Mobility Support in IPv6”, (<http://www.ietf.org/rfc/rfc3775.txt>), Juin 2004
- [130] Tiwari, V.; Kansal, S.; Gaiwak, A.; “Performance Evaluation of TCP variants using Media Independent Handover in Heterogeneous network”, International Conference on Computer and Communication Technology (ICCT), 2010.
- [131] B. R. Chandavarkar, Dr. G. Ram Mohana Reddy; “Improvement in Packet Drop during Handover between WiFi and WiMAX”, International Conference on Network and Electronics Engineering 2011.
- [132] Fu Jiadi; Ji Hong; Li Xi; “User-Adaptive Vertical Handover Scheme Based on MIH for Heterogeneous Wireless Networks”, 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCom '09. 2009.
- [133] Wang Ying; Zhou Yun; Yuan Jun; Zhang Ping; “An Enhanced Media Independent Handover Framework for Heterogeneous Networks”, Vehicular Technology Conference, VTC Spring 2008.
- [134] Kishore Ramachandran, Sampath Rangarajan, John C. Lin, “Make-Before-Break MAC Layer Handoff in 802.11 Wireless Networks”, International Conference on Communications, Istanbul, Turkey, 2006 IEEE International Conference on Communications, 2006
- [135] Maximilien Mouton, German Castignani, Raphael Frank, Lara Codeca, Thomas Engel, “On the evaluation of make-before-break handovers in urban WiFi networks for moving vehicles”, 2013 10th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS), DOI: 10.1109/WONS.2013.6578343, IEEE Xplore, 16 Août 2013
- [136] K. N. Choong, V. S. Kesavan, S. L. Ng, F. de Carvalho, A. L. Y. Low, C. Maciocco, “SIP-based IEEE802.21 media independent handover — a BT Intel collaboration”, Springer, , Volume 25, Issue 2, pp 219–230, Avril 2007
- [137] Antonio de la Oliva, Albert Banchs, Ignacio Soto, “An Overview of IEEE 802.21: Media- Independent Handover Services”, IEEE Wireless Communications, Août 2008
- [138] Telemaco Melia, Albert Vidal, Luca Boscolo, Antonio de la Oliva, “IEEE 802.21 Reliable Event Service Support for Network Controlled Handover Scenarios”, DOI: 10.1109/GLOCOM.2007.948, IEEE GLOBECOM 2007 - IEEE Global Telecommunications Conference, Décembre 2007
- [139] Kenichi Taniuchi, Yoshihiro Ohba, Victor Fajardo, Subir Das, Miriam Tauil, Yuu-Heng Cheng, “IEEE 802.21: Media independent handover: Features, applicability, and realization”, DOI: 10.1109/MCOM.2009.4752687, IEEE Communications Magazine, Volume: 47, Issue: 1, Janvier 2009

- [140] George Lampropoulos, Apostolis K. Salkintzis, Nikos Passas, "Media-independent handover for seamless service provision in heterogeneous network", DOI: 10.1109/MCOM.2008.4427232, IEEE Communications Magazine, Volume: 46 , Issue: 1 , Janvier 2008
- [141] Jorge Cabrejas, Pablo Gualda, Jose F Monserrat, and David Martín-Sacristán, "Application of MIH for the lightweight deployment of LTE-advanced systems through mobile relaying", Journal on Wireless Communications and Networking, doi:10.1186/1687-1499-2012-117, PP: 117-129, 2012
- [142] Kamin Whitehouse, Chris Karlof, David Culler, "A practical evaluation of radio signal strength for ranging-based localization", ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, Volume 11 Issue1, Pages 41-52, ACM New York, NY, USA, doi>10.1145/1234822.1234829, Janvier 2007
- [143] Dimitrios Lymberopoulos, Quentin Lindsey, Andreas Savvides, "An Empirical Characterization of Radio Signal Strength Variability in 3-D IEEE 802.15.4 Networks Using Monopole Antennas", Springer, LNCS, volume 3868, Wireless Sensor Networks pp 326-34, EWSN 2006
- [144] Wenhui Zhang, J. Jaehnert, K. Dolzer, "Design and evaluation of a handover decision strategy for 4th generation mobile networks", DOI: 10.1109/VETECS.2003.1207169, The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, VTC 2003 Spring 2003
- [145] Kévin Denis, "Le romaing dans le Wi-Fi", <http://kevin.denis.free.fr/roaming/roaming-wifi.pdf>, 2007.
- [146] Jamil Sultan, M. Ismail, N. Misran and K. Jumari, "Spectral Efficiency Evaluation of Downlink Mobile Multi-hop Relay Systems Employing Macro Diversity Handover Technique", IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.8 No.5, Mai 2008
- [147] Ewa Kozłowska, "Optimization of Handover Mechanism in 802.16e using Fuzzy Logic", Springer, Personal Wireless Communications pp 115-122, The International Federation for Information Processing book series, IFIPAICT, volume 245, 2007
- [148] 3GPP TS 36.300, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (EUTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), Rel. 10, v10.2.0, Dec. 2010.
- [149] P. Lin, T. Lin, and C. Wang, "Performance Analysis of a Cross-Layer Handoff Ordering Scheme in Wireless Networks", IEEE Transactions on Wireless Communications, PP. 5166–5171 vol.7, No. 12, Décembre 2008.
- [150] Tie Luo, Hwee-Pink Tan, Tony Q. S. Quek, "Sensor OpenFlow: Enabling Software-Defined Wireless Sensor Networks", DOI: 10.1109/LCOMM.2012.092812.121712, Page(s): 1896 – 1899, IEEE Communications Letters, Volume: 16 , Issue: 11 , Novembre 2012
- [151] David Grimardias, Franck Cattaneo, "Impacts de l'Abaissement Partiel 2016 de la Retenue de Verbois sur le Peuplement Piscicole", Institut Terre-Nature-Environnement, groupe « Ecologie et Ingénierie des Systèmes Aquatiques » route de Presinge 150, CH-1254 JUSSY, Avril 2017
- [152] MIAN, Simon, "WiMAX ou l'évolution des réseaux sans-fil ?", Permalink: <http://hdl.handle.net/1866/9523>, thèse, version 5.8 XMLUI], copyright © 2002-2015
- [153] Vinh Dien Hoang, Maode Ma, Ryu Miura, Masayuki Fujise, "A Novel way for Handover in Maritime WiMAX Mesh Network", DOI: 10.1109/ITST.2007.4295918, 7th International Conference on ITS Telecommunications, France, Juin 2007
- [154] Maurizio Martina, Mario Nicola, Guido Masera, "a Flexible UMTS-WiMAX Turbo Decoder Architecture", Page(s): 369 – 373, IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, Volume: 55, Issue: 4, Avril 2008
- [155] Jukka Liikanen, Paul Stonemanb, Otto Toivanen, "Intergenerational effects in the diffusion of new technology: the case of mobile phones", Volume 22, Issues 8–9, Pages 1137-1154, ScienceDirect, International Journal of Industrial Organization, November 2004

- [156] Gernot Heiser, Chief Technology Open Kernel Labs, “The Motorola Evoke QA4 A Case Study in Mobile Virtualization”, <http://www.ok-labs.com/>, Technology White Paper: The Motorola Evoke QA4 A Case Study in Mobile Virtualization, Juillet 22, 2009
- [157] K. Kumaravel, “Comparative Study of 3G and 4G in Mobile Technology”, IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 8, Issue 5, No 3, September 2011 ISSN (Online): 1694-0814 [www.IJCSI.org](http://www.IJCSI.org)
- [158] Michael Steer, “Beyond 3G”, Page(s): 76 – 82, IEEE Microwave Magazine, Volume: 8, Issue: 1 , Février 2007
- [159] Xiaoyan Yang, Tiejun Pan, Jingjing Shen, “On 3G mobile E-commerce platform based on Cloud Computing”, 2010 3rd IEEE International Conference on Ubi-Media Computing, Jinhua, China, IEEE Xplore: 09 Août 2010
- [160] Yu-Lung Wu, Yu-Hui Tao, Pei-Chi Yang, “Using UTAUT to explore the behavior of 3G mobile communication users”, 2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Singapore, 04 Janvier 2008
- [161] Eric BATUT, “Etude du bloc de réception dans un noeud UMTS-FDD et développement d’une méthodologie de codesign en vue du fonctionnement en temps réel”, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00512307/document>, Août 2010
- [162] PrathimaAgrawal, Jui-Hung Yeh, Jyh-Cheng Chen, Tao Zhang, “IP multimedia subsystems in 3GPP and 3GPP2: overview and scalability issues”, DOI: 10.1109/MCOM.2008.4427242, IEEE Communications Magazine, Volume: 46 , Issue: 1 , Janvier 2008
- [163] Shao-Yu Lien, Kwang-Cheng Chen, Yonghua Lin, “Toward Ubiquitous Massive Accesses in 3GPP Machine-to-Machine Communications”, 0163-6804/11/\$25.00 © 2011 IEEE Communications Magazine, Avril 2011
- [164] ParulDatta, SakshiKaushal, “Exploration and comparison of different 4G technologies implementations: A survey”, Chandigarh, India, 2014 Recent Advances in Engineering and Computational Sciences (RAECS), Avril 2014
- [165] Afaq H. Khan, Mohammed A. Qadeer, Juned A. Ansari, Sariya Waheed, “4G as a Next Generation Wireless Network”, International Conference on Future Computer and Communication, Kuala Lumpur, Malaysia, 04 Août 2009
- [166] Xichun Li, Abudulla Gani, Rosli Salleh, Omar Zakaria, “the Future of Mobile Wireless Communication Networks”, International Conference on Communication Software and Networks, Macau, China, 19 Juin 2009
- [167] rukmani khutey, ghankuntla rana, vijay dewangan, anil tiwari, adarsh dewamngan, “Future of Wireless Technology 6G & 7G”, International Journal of Electrical and Electronics Research ISSN 2348-6988 (online) Vol. 3, Issue 2, pp: (583-585), Available at: [www.researchpublish.com](http://www.researchpublish.com), April - Juin 2015
- [168] Vidales et al, Vidales P. Patanapongibul L, Mapp G.E et Hopper A, “Experiences with Heterogeneous Wireless Networks - Unveiling the Challenges”. Second International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks, 2004.
- [169] Salsano et al, Salsano S., Veltri L., Martiniello G., Polidoro A., “Seamless vertical handover of VoIP calls based on SIP Session Border Controllers”, IEEE International Conference on Communications, ICC’06, Istanbul, Turkey, 2006.
- [170] Ma et al, Ma L., Yu F., Leung V., et Randhawa T, “A New Method to Support UMTS/WLAN Vertical Handover Using SCTP”, IEEE Wireless Comm., vol.11,no. 4, pp. 44-51, 2004
- [171] Chang, Chang C. K., "A Mobile-IP Based Mobility System for Wireless Metropolitan Area Networks", International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW'05), pp.429-435, 2005
- [172] HAJJ Paul, DAHBI Nabil, “Etude de la Technologie WiMAX Mobile”, Le livre “WiMAX Mobile”, [www-public.imtbs-tsp.eu/~afifi/wimaxfinalpdf.pdf](http://www-public.imtbs-tsp.eu/~afifi/wimaxfinalpdf.pdf), Janvier 2010

- [173] Jun Wu, Zhifeng Zhang, Yu Hong, Yonggang Wen, “Cloud Radio Access Network (C-RAN): a primer”, DOI: 10.1109/MNET.2015.7018201, IEEE Network, Volume: 29, Issue: 1 , Janvier Février 2015.
- [174] Sebti CHOUCHE, “Conception et Réalisation d’un Outil d’Evaluation de Performances du Réseau UMTS”, Rapport de projet de fin d’études, 2006
- [175] Olumuyiwa Oludare FAGBOHUN, “Comparative studies on 3G, 4G and 5G wireless technology”, IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE), e-ISSN: 2278-2834, p- ISSN: 2278-8735. Volume 9, Issue 3, Ver. I, PP 88-94, www.iosrjournals. org, Mai - Juin 2014
- [176] Chie Dou, Yia-Pei Chen, His-Kun Chen, “an agent-based platform for dynamic service provisioning in 3G mobile systems: scenarios and performance analyses”, Proceedings 15th International Conference on Information Networking, IEEE Xplore: Beppu City, Oita, Japan, 07 Août 2002
- [177] Kameswari Kotapati, Peng Liu, Thomas F. La Porta, “Dependency relation based vulnerability analysis of 3G networks: Can it identify unforeseen cascading attacks?”, Volume 35, Issue 3–4, pp 99–122, Telecommun Syst (2007) 35: 99–122 DOI 10.1007/s11235-007-9046-0, Springer, Août 2007
- [178] S. Uskela “Key concepts for evolution toward beyond 3G networks ”, IEEE Wireless Communications, Volume: 10, Issue: 1 , Février 2003
- [179] Eric MEURISSE, “L’UMTS et le haut-débit mobile”, Février 2007
- [180] Daniel S. Baum and Jan Hansen, Jari Salo, Giovanni Del Galdo and Marko Milojevic, Pekka Kyösti, “an Interim Channel Model for Beyond-3G Systems Extending the 3GPP Spatial Channel Model (SCM)”, 0-7803-8887-9/05/\$20.00 (c) IEEE, 2005
- [181] H. Ekstrom, A. Furuskar, J. Karlsson, M. Meyer, S. Parkvall, J. Torsner, M. Wahlqvist, “Technical solutions for the 3G long-term evolution”, Page(s): 38 – 45, IEEE Communications Magazine, Volume: 44 , Issue: 3 , Mars 2006
- [182] M. Maachaoui, A. Abou El Kalam, C. Fraboul, A. Ait Ouahman, “Enhanced Authentication Protocol in IMS Environment”, 18-21, Conference on Network and Information Systems Security, Mai 2011
- [183] Yangyang Chen, Xavier Lagrange, “Architecture and Protocols of EPC-LTE with relay. 2013, pp.25.fhal-00830621f, HAL Id: hal-00830621 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00830621>, 5 Juin 2013
- [184] Clint Smith, livre “3G Wireless Networks, Second Edition”, ISBN: 007226344X 9780072263442, 2007
- [185] Vijay Kumar Garg, livre “Wireless Network Evolution: 2G to 3G”, ISBN: 0130280771, ACM Digital Library, 2001
- [186] P. Matusz, J. Wozniak, K. Kaminski, “On performance of MAC-c/sh in UMTS”, Fifth IEE International Conference on 3G Mobile Communication Technologies (3G 2004) The Premier Technical Conference for 3G and Beyond, 2004 p. 108 – 112, London, UK, 18-20 Octobre 2004
- [187] Ghassan A. Abed Mahamod Ismail Kasmiran Jumari, “the Evolution to 4G Cellular Systems: Architecture and Key Features of LTE-Advanced Networks”, IRACST – International Journal of Computer Networks and Wireless Communications (IJCNWC), ISSN: 2250-3501 Vol. 2, No. 1, 2012
- [188] György Réthy, Sophia Antipolis, “Application of TTCN-3 for 2.5 and 3G Testing”, Conférence TTCN-3, France 3-5 Th Mai 2004
- [189] Mudit Ratana Bhalla, “Anand Vardhan Bhalla”, Generations of Mobile Wireless Technology: A Survey”, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 5– No.4, Août 2010
- [190] Muhammad Farooq, Muhammad Ishtiaq Ahmed, “Future Generations of Mobile Communication Networks”, Future Generations of Mobile Communication Networks, Volume 2, Issue 1, 2013, 24-30, Janvier 2013
- [191] Masood Khosroshahy, Dongyu Qiu, Mustafa K. Mehmet Ali, “Botnets in 4G cellular networks: Platforms to launch DDoS attacks against the air interface”, DOI: 10.1109/MoWNet.2013.6613793, International

Conference on Selected Topics in Mobile and Wireless Networking (MoWNeT), Montreal, QC, Canada, Septembre 2013

[192] Chi-Fang Huang, Chih-Hsien Chiu, “A WLAN-used helical antenna fully integrated with the PCMCIA carrier”, DOI: 10.1109/TAP.2005.860007, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Volume: 53, Issue: 12, Décembre 2005

[193] Vasco Pereira, Tiago Sousa, “Evolution of Mobile Communications: from 1G to 4G”, The 2<sup>nd</sup> International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks, HET NETs 04, Ilkley, West Yorkshire, U.K, Juillet 2004

[192] Olfa Chabbouh, “Gestion des Ressources des Réseaux Cloud RAN Dans un Contexte 5G”, Thèse, Octobre 2017, “Confidential and Secure Broadcast in Wireless Sensor Networks”, IEEE, 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Athens, Greece, Décembre 2007

[165] Tableau de bord, “Marché Internet au Maroc”, Juin 2012

[194] Anastasios N. Bikos, Nicolas Sklavos, “LTE/SAE Security Issues on 4G Wireless Networks”, DOI: 10.1109/MSP.2012.136, IEEE Security & Privacy, Volume: 11, Issue: 2, March-Avril 2013

[195] Manzoor Ahmed Khan, Hamidou Tembine, Athanasios V. Vasilakos, “Game Dynamics and Cost of Learning in Heterogeneous 4G Networks”, DOI: 10.1109/JSAC.2012.120118, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Volume: 30, Issue: 1, Janvier 2012

[196] N. Seddigh, B. Nandy, R. Makkar, J.F. Beaumont, “Security advances and challenges in 4G wireless networks”, DOI: 10.1109/PST.2010.5593244, Eighth International Conference on Privacy, Security and Trust, Ottawa, ON, Canada, Septembre 2010

[197] Anwar M. Mousa, “Prospective of Fifth Generation Mobile Communications”, International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN) Vol.4, No.3, Septembre 2012

[198] Ms. Anju Uttam Gawas, “An Overview on Evolution of Mobile Wireless Communication Networks: 1G-6G”, International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication ISSN: 2321-8169 Volume: 3 Issue: 5 3130 – 3133, IJRITCC, Available @ <http://www.ijritcc.org>, Mai 2015

[199] Pankaj Sharma, “Evolution of Mobile Wireless Communication Networks-1G to 5G as well as Future Prospective of Next Generation Communication Network”, IJCSMC, Vol. 2, Issue. 8, pg.47 – 53, ISSN 2320–088X, International Journal of Computer Science and Mobile Computing, Août 2013

[200] Nilanjan Banerjee, WeiWuKalyan, BasuSajal K.Das, “Analysis of SIP-based mobility management in 4G wireless networks”, Volume 27, Issue 8, Mai 2004, Pages 697-707, <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2003.10.009>, Elsevier, 2004

[201] BOUCHENTOUF, Hadjer BOUDGHENE STAMBOULI Riyad, “Etude des performances des Réseaux 4G (LTE)”, Mémoire de Master, 2013

[202] Mahdi Aiash, Glenford Mapp, Aboubaker Lasebae, Raphael Phan, “Providing Security in 4G Systems: Unveiling the Challenges”, DOI: 10.1109/AICT.2010.24, Sixth Advanced International Conference on Telecommunications, Juin 2010

[203] A.K. Salkintzis, “Interworking techniques and architectures for WLAN/3G integration toward 4G mobile data networks”, ISSN Information: INSPEC Accession, Number: 8086231, DOI: 10.1109/MWC.2004.1308950, IEEE Wireless Communications, Volume: 11, Issue: 3, Juin 2004

[204] Tao Chen, Honggang Zhang, Xianfu Chen, Olav Tirkkonen, “SoftMobile: control evolution for future heterogeneous mobile networks”, DOI: 10.1109/MWC.2014.7000974, IEEE Wireless Communications, Volume: 21, Issue: 6, Décembre 2014

[205] Alexis Sultan, Farid Benbadis, Vincement Gauthier, Hossam Afifi, “Mobile Data Network Analysis Platform”, Proceedings of the 6th International Workshop on Hot Topics in Planet, HotPlanet’15, doi>10.1145/2798087.2798093, Paris, France, Septembre 07 - 07, 2015

- [206] Yeunwoong Kyung, Tri M. Nguyen, Kiwon Hong, Jongkwan Park, Jinwoo Park, “Software defined service migration through legacy service integration into 4G networks and future evolutions”, DOI: 10.1109/MCOM.2015.7263353, IEEE Communications Magazine, Volume: 53, Issue: 9, September 2015
- [207] Ting Wu, LanLan Rui, AoXiong, ShaoYong Guo, “An Automation PCI Allocation Method for eNodeB and Home eNodeB Cell”, DOI: 10.1109/WICOM.2010.5600764, 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM), Octobre 2010
- [208] KimmoHiltunen, “Utilizing eNodeB sleep mode to improve the energy-efficiency of dense LTE networks”, DOI: 10.1109/PIMRC.2013.6666707, IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), London, UK, Décembre 2013
- [209] Tomonori Aoyama, “A new generation network: Beyond the Internet and NGN”, DOI: 10.1109/MCOM.2009.4939281, IEEE Communications Magazine, Volume: 47, Issue: 5, Mai 2009
- [210] Jaime Ferragut, JosepMangues-Bafalluy, “A distributed paging mechanism over the X2 interface for all-wireless Networks of Small Cells”, DOI: 10.1109/WMNC.2014.6878882, Vilamoura, Portugal, 7th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC), Août 2014
- [211] Cheng-Xiang Wang, FouratHaider, Xiqi Gao and Xiao-Hu You, Yang Yang, Dongfeng Yuan, Hadi M. Aggoune, Harald Haas, Simon Fletcher, ErolHepsaydir, “Cellular Architecture and Key Technologies for 5G Wireless Communication Networks”, IEEE Communications Magazine, Février 2014
- [212] Linglong Dai, Bichai Wang, Yifei Yuan, Shuangfeng Han, Chih-lin I, Zhaocheng Wang, “Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends”, IEEE Communications Magazine, Volume: 53, Issue: 9, 16 Septembre 2015
- [213] Zhiguo Ding, Zheng Yang, Pingzhi Fan, H. Vincent Poor, “On the Performance of Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems with Randomly Deployed Users”, IEEE Signal Processing Letters, Volume: 21, Issue: 12, Décembre 2014
- [214] Hafida Amgoune, “5G: Security Approaches and Attack Simulation”, Springer, Cham, Février 2019
- [215] R. Stewart, C. Metz, “SCTP: new transport protocol for TCP/IP”, IEEE Internet Computing, Volume: 5, Issue: 6, Novembre/Décembre 2001
- [216] Justin T. Giles, Ling WO, Michael W. Berry, “GTP (General Text Parser) Software for Text Mining”, 0-8493-0052-5/00/\$0.00+\$0.50 by CRC Press LLC, 2001
- [217] Chran-Ham Chang; D. Flower; J. Forecast; H. Gray; B. Hawe; A. Nadkarni; K.K. Ramakrishnan; U. Shi, “High-performance TCP/IP and UDP/IP networking in DEC OSF/1 for Alpha AXP”, Proceedings of 3rd IEEE International Symposium on High Performance Distributed Computing, 06 Août 2002
- [218] Juan J. Vargas, Ronald F. DeMara, Michael Georgiopoulos, “PDU Bundling and Replication for Reduction of Distributed Simulation Communication Traffic”, The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology, Volume: 1 issue: 3, page(s): 171-183, Issue published: 1 Août, 2004.
- [219] Ravishankar Ravindran, AsitChakraborti, Syed Obaid Amin, AytacAzgin, Guoqiang Wang, “5G-ICN: Delivering ICN Services over 5G Using Network Slicing”, IEEE Communications Magazine, Volume: 55, Issue: 5, Mai 2017
- [220] Ramon Ferrus, OriolSallent, Jordi Perez-Romero, Ramon Agusti, “On 5G Radio Access Network Slicing: Radio Interface Protocol Features and Configuration”, IEEE Communications Magazine, Volume: 56, Issue: 5, Mai 2018
- [221] J. Pérez-Romero, O. Sallent, R. Ferrús, R. Agustí, “On the configuration of radio resource management in a sliced RAN”, NOMS 2018 - 2018 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, 09 Juillet 2018
- [222] Sami Kekki, Walter Featherstone, Yonggang Fang, Pekka Kuure, Alice Li, Anurag Ranjan, Debashish Purkayastha, Feng Jiangping, Danny Frydman, Gianluca Verin, Kuo-Wei Wen, Kwihoon Kim, Rohit Arora,

- Andy Odgers, Luis M. Contreras, Salvatore Scarpina, “MEC in 5G networks”, ISBN no 979-10-92620-22-1, ETSI White Paper No. 28, Juin 2018
- [223] JunseokKim,SunghyunChoi, “3GPP SA2 architecture and functions for 5G mobile communication system”, ICT Express, Volume 3, Issue 1, March 2017, Pages 1-8, 13 Avril 2017.
- [224] Sofiane Labidi, Wided Lejouad, “De l'intelligence artificielle distribuee aux systemes multi-agents”, [Rapport de recherche] RR-2004, INRIA. 1993. ffinria-00074668f, HAL Id: inria-00074668 <https://hal.inria.fr/inria-00074668> Submitted on 24 Mai 2006
- [225] Telemaco Melia, Carlos J. Bernardos, Antonio de la Oliva, Fabio Giust, Maria Calderon, “IP Flow Mobility in PMIPv6 Based Networks: Solution Design and Experimental Evaluation”, Wireless Personal Communications, Springer, Volume 61, Issue 4, pp 603–62, Décembre 2011
- [226] Tarik Taleb, Adlen Ksentini, “E Follow me cloud: interworking federated clouds and distributed mobile networks”, Page(s): 12 – 19, IEEE Network, Volume: 27, Issue: 5 , Septembre-Octobre 2013
- [227] Osianoh Glenn Aliu, Ali Imran, Muhammad Ali Imran, Barry Evans, “A Survey of Self Organisation in Future Cellular Networks”, Page(s): 336 – 361, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Volume: 15, Issue: 1 , First Quarter 2013
- [228] Andy Sutton, “5G Network Architecture, Design and Optimisation”, British Telecommunications plc, Janvier 2018
- [229] Lei Song, Zhan Xu, Zhigang Tian, Jinhui Chen, Ruxin Zhi, “Research on 4G And 5G Authentication Signaling”, IOP Publishing, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1213 042048 doi:10.1088/1742-6596/1213/4/042048, 2019
- [230] Young-il Cho, Jae Ho Kim, Chang Ki Kim, “Mobility Management in the 5G Network between Various Access Networks”, IEEE, Eleventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), Zagreb, Croatia, 2019
- [231] Shariq Haseeb, Ahmad Faris Ismail, “Handoff latency analysis of mobile IPv6 protocol variations”, Computer Communications, Science Direct, Volume 30, Issue 4, Pages 849 -855, 26 Février 2007
- [232] Ki-Sik Kong, Wonjun Lee, Youn-Hee Han, Myung-Ki Shin, Heungryeol You, “Mobility management for all-IP mobile networks: mobile IPv6 vs. proxy mobile IPv6”, Page(s): 36 – 45, IEEE Wireless Communications, Volume: 15, Issue: 2 , Avril 2008
- [233] Xiaowei Zhang, Andreas Kunz, Stefan Schröder, “Overview of 5G security in 3GP”: Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN), IEEE, 2017
- [234] Prakash Suthar, Aeneas Dodd-Noble, Raghavendra Suryanarayanan, “Efficient Handling of 5G/4G Network Initiated Paging”, [https://www.tdcommons.org/cgi/viewcontent.cgi?article=3539&context=dpubs\\_series](https://www.tdcommons.org/cgi/viewcontent.cgi?article=3539&context=dpubs_series), Published by Technical Disclosure Commons, 2019
- [235] N. Montavont, T. Noel, “Handover management for mobile nodes in IPv6 networks”, Page(s): 38 – 43, IEEE Communications Magazine, Volume: 40, Issue: 8 , 2002
- [236] Xavier Pérez-Costa, Marc Torrent-Moreno, Hannes Hartenstein, “A performance comparison of Mobile IPv6, Hierarchical Mobile IPv6, fast handovers for Mobile IPv6 and their combination”, ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, Volume 7 Issue 4, Pages 5 – 19, Octobre 2003
- [237] Jianbing Ni, Xiaodong Lin, Xuemin Sherman Shen, “Efficient and Secure Service-Oriented Authentication Supporting Network Slicing for 5G-Enabled IoT”, Page(s): 644 – 657, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Volume: 36, Issue: 3 , Mars 2018
- [238] Claude Castelluccia, “HMIPv6: A hierarchical mobile IPv6 proposal”, ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review , Volume 4 Issue 1, Pages 48 – 59, Janvier 2000
- [239]<https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid51683/institut-national-de-recherche-en-informatique-et-en-automatique-inria.html>, 2019



- [240] Manuel Couceiro, David Suarez, David Manzano, Luis Lafuente, “Data Stream Processing on Real-Time Mobile Advertisement: Ericsson Research Approach”, IEEE 12th International Conference on Mobile Data Management, 2011
- [241] Linoh A. Magagula, Olabisi E. Falowo and H. Anthony Chan, “Handover Optimization in Heterogeneous Wireless Networks: PMIPv6 vs. PMIPv6 with MIH”, semantic Scholar, <https://pdfs.semanticscholar.org/4e4b/808b131c53e5ab52181f56b3ef12447b4e48.pdf>, 2009
- [242] Linoh A. Magagula, Olabisi E. Falowo, H. Anthony Chan, “PMIPv6 and MIH-enhanced PMIPv6 for mobility management in heterogeneous wireless networks”, AFRICON 2009, IEEE, South Africa, Novembre 2009
- [243] Linoh A. Magagula, H. Anthony Chan, “IEEE 802.21-Assisted Cross-Layer Design and PMIPv6 Mobility Management Framework for Next Generation Wireless Networks”, IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, Octobre 2008
- [245] Telemaco Melia, Carlos J. Bernardos, Antonio de la Oliva, Fabio Giust, Maria Calderon, “IP Flow Mobility in PMIPv6 Based Networks: Solution Design and Experimental Evaluation”, Volume 61, Issue 4, pp 603–627, Wireless Pers Commun (2011) 61:603–627 DOI 10.1007/s11277-011-0423-3, Springer, Décembre 2011
- [246] Jorg Ott, Dirk Kutscher, “A Mobile Access Gateway for Managing Intermittent Connectivity”, Semantic Scholar 2005
- [247] Alexandros Kaloxylou, “a Survey and an Analysis of Network Slicing in 5G Networks”, Page(s): 60 – 65, IEEE Communications Standards Magazine, Volume: 2, Issue: 1 , Mars 2018
- [248] Ahmad RAHIL, “Gestion du Handover dans les Réseaux Hétérogènes Mobiles et sans Fil”, Thèse HAL Archives ouvertes, 22 Septembre 2015
- [249] S. Catreux, P.F. Driessen, L.J. Greenstein, “Simulation results for an interference-limited multiple input multiple output cellular system”, DOI: 10.1109/GLOCOM.2000.891306, Globecom '00 - IEEE. Global Telecommunications Conference. Conference Record (Cat. No.00CH37137), 06 Août 2002
- [250] Thierry Ernst, “Le Support des Réseaux Mobiles dans IPv6”, RSTI - TSI. Volume 25 – no 5, pages 573-597, <https://hal.inria.fr/inria-00102315/document>, 2006
- [251] TanjaManser, SimonFoster, “Effective Handover Communication: An overview of research and improvement efforts”, Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology, Volume 25, Issue 2, Pages 181-191, ScienceDirect, Juin 2011
- [252] Xiaohu Ge, H. Cheng, M. Guizani, T. Han, “5G Wireless Backhaul Networks: Challenges and Research Advance”, DOI: 10.1109/MNET.2014.6963798, IEEE Network, Vol. 28, No. 6, pp. 6-11, Novembre 2014
- [253] R.N. Smith, B. Mahesh, S. Bindiganavale, “an adaptive mobile wireless handover”, DOI: 10.1109/CMPSAC.1997.625055, Proceedings Twenty-First Annual International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC'97), 06 Août 2002
- [254] Abbas JAMALI, “The Wireless Mobile Internet”, Livre [http://sutlib2.sut.ac.th/sut\\_contents/H91927.pdf](http://sutlib2.sut.ac.th/sut_contents/H91927.pdf), 2003
- [255] Chung-Ming, HuangChing, HsienTsai, “The handover control mechanism for multi-path transmission using Stream Control Transmission Protocol (SCTP)”, Computer Communications, ScienceDirect, Volume 30, Issue 17, Pages 3239-3256, 30 Novembre 2007
- [256] groupe ETSI, LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification, 3GPP TS 36.331 version 9.16.0 Release 9, ETSI TS 136 331 V9.16.0, 2013
- [257] Andres Laya, Luis Alonso, Jesus Alonso-Zarate, “Is the Random Access Channel of LTE and LTE-A Suitable for M2M Communications? A Survey of Alternatives”, Page(s): 4 – 16, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Volume: 16, Issue: 1 , First Quarter 2014

- [258] Ibraheem Shayea, Mahamod Ismail, Rosdiadee Nordin, “Advanced handover techniques in LTE-Advanced system”, DOI: 10.1109/ICCCE.2012.6271155, Malaysia, International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE), 2012
- [259] F.A. Zdarsky, J.B. Schmitt, “Handover in mobile communication networks: who is in control anyway?”, DOI: 10.1109/EURMIC.2004.1333373, Proceedings. 30th Euromicro Conference, France, 2004.
- [260] R. Ferrús, O. Sallent, J. Pérez-Romero, R. Agusti, “On the Automation of RAN Slicing Provisioning and Cell Planning in NG-RAN”, 2018 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), IEEE Xplore: 23 Août 2018
- [261] Jeffrey G. Andrews ; Stefano Buzzi ; Wan Choi ; Stephen V. Hanly ; Angel Lozano ; Anthony C. K. Soong ; “What Will 5G Be?”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Volume: 32 , Issue: 6 , Juin 2014
- [262] Mohsen Nader Tehrani, Murat Uysal, and HalimYanikomeroglu, “Device-to-Device Communication in 5G Cellular Networks: Challenges, Solutions, and Future Directions”, 0163-6804/14/\$25.00 © 2014 IEEE Communications Magazine, Mai 2014
- [263] Xiaofei Wang ; Min Chen ; TarikTaleb ; AdlenKsentini ; Victor C.M. Leung, “Cache in the air: exploiting content caching and delivery techniques for 5G systems”, IEEE Communications Magazine, Volume: 52 , Issue: 2 , Février 2014
- [264] YOUNCHAN JUNG, MARNEL PERADILLA, “Tunnel gateway satisfying mobility and security requirements of mobile and IP-based networks”, Page(s): 583 – 590, Journal of Communications and Networks, Volume: 13, Issue: 6 , Décembre 2011

**Title:** The Contribution of the SDN Approach in Improving Mobility in Next Generation Networks

**Keywords:** SDN, QoS, Handover, 3G, 4G, 5G, WiFi, WiMAX.

**Abstract:** Since the appearance of mobile telephony, the networks used have constantly to evolve to ensure a better quality of service. However, despite their widespread adoption, traditional IP networks remain complex and difficult to manage because of multi-criteria, related to the routing and administration of predefined configurations. This is because control and data plans are grouped together in the same equipment.

Deploying new network services have become difficult and costly. In this context, network virtualization has been presented as a new paradigm for solving problems related to the current mobiles networks architecture.

This thesis presents Software Defined Networks (SDNs) as a solution to be adopted by service providers to offer new services to their customers while ensuring a better quality of service (QoS), and optimizing the use of services.

An implementation of the SDN approach in wireless networks improves their service quality and interoperability. Indeed, during a Handover operation several problems can occur and can have a direct impact on end-to-end transmission delay, packet loss during Handover, jitter and MoS.

For this, we propose the Software Defined Mobile Networks (SDMN) approach and Software Defined Wireless Networks (SDWN) to improve the performance of cellular networks, by deploying several algorithms at the SDN controller to improve execution time of the verticale and horizontal Handover.

**Titre :** L'apport de l'approche SDN dans l'amélioration du Mobilité dans les réseaux de nouvelle génération

**Mots-clés:** SDN, QoS, Handover, 3G, 4G, 5G, WiFi, WiMAX.

**Résumé :** Depuis l'apparition de la téléphonie mobile, les réseaux utilisés n'ont cessé d'évoluer pour assurer une meilleure qualité de service. Cependant, en dépit de leur adoption généralisée, les réseaux IP traditionnels restent complexes et difficiles à gérer à cause de multicritères, liés au routage et à l'administration des configurations prédéfinis. Ceci est dû au fait que les plans de contrôle et de données sont regroupés au sein du même équipement.

Le déploiement de nouveaux services réseau est généralement difficile et coûteux. Dans ce contexte, la virtualisation des réseaux a été présentée comme un nouveau paradigme pour résoudre les problèmes liés à l'architecture actuelle des réseaux mobiles.

Ce travail de thèse, présente les réseaux définis par logiciels (SDN) comme solution à adopter par les fournisseurs de services pour offrir de nouveaux services à leurs clients tout en garantissant une meilleure qualité de service (QoS), et en optimisant l'utilisation des ressources.

Une implémentation de l'approche SDN dans les réseaux sans fil améliore leurs qualités de service et leurs interopérabilités. En effet, lors d'une opération de Handover plusieurs problèmes peuvent survenir et peuvent avoir un impact direct sur le délai de transmission de bout en bout, la perte de paquets lors du Handover, la gigue et le MoS. Pour cela, nous proposons l'approche SDMN (Software Defined Mobile Networks) et SDWN (Software Defined Wireless Networks) pour améliorer les performances des réseaux cellulaires, via le déploiement de plusieurs algorithmes au niveau du contrôleur SDN visant à améliorer le temps d'exécution du Handover verticalee et horizontale.