

UNIVERSITÉ DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES
Faculté de Génie Electrique
Département d'Electronique

THESE
*Présentée pour l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences
En Electronique
Par Mr. Djeldjeli Youcef*

Thème

**ETUDE D'UNE NOUVELLE TECHNIQUE (CP-SDN) BASÉE SUR LA
VIRTUALISATION POUR L'AMÉLIORATION DES PERFORMANCES
DES SYSTÈMES DE COMMUNICATION SANS FIL**

Membre du jury :

Prof. CHAMA Zouaoui	Président	Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbés
Prof. MAHDJOUB Zoubir	Directeur de Thèse	Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbés
Prof. MOKADDEM Allel	Examineur	Centre Universitaire EL BAYADH
Dr MANSOURI Boualem	Examineur	Université de Saïda

Dédicace

À mes très chers parents

*À mes frères **Abderrahmane, Zouheir et Tarek***

*À ma belle-sœur **Sara,***

À tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin à ce travail,

À vous tous, je dédie cette modeste thèse.

Remerciements

Tout d'abord, je voudrais remercier ALLAH le Tout puissant de m'avoir donné la force d'accomplir ce modeste travail de recherche.

*Mes premiers remerciements et ma profonde reconnaissance vont à mon directeur de thèse, le Professeur **MAHDJOUR Zoubir** pour avoir dirigé ce travail durant toutes ces années, pour sa qualité d'écoute, ses nombreux conseils, son aide et son assistance, malgré ses nombreuses et lourdes obligations et responsabilités.*

*Je souhaite également remercier le Professeur **CHAMA Zouaoui** de l'Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbés pour avoir accepté d'être le président de jury de ma thèse.*

*Mes chaleureux remerciements vont également au Professeur **MOKADDEM Allel** du Centre Universitaire d'El Bayadh ainsi qu'au Docteur **MANSOURI Boualem**, Maître de Conférences A de l'Université Dr Moulay Tahar de Saïda pour avoir accepté de faire partie du jury en tant qu'examineurs.*

*Enfin, merci à mes collègues Dr **BELKHIR Mohamed**, Dr **TADJEDDINE Abderrezzak**, Dr **BENDELHOUM Mohammed Sofiane**, Dr **BENALI Abdelkrim**, ma famille et mes amis.*

Table des matières

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Introduction générale	1
Chapitre I	5
Communication sans fil	
I.1 Introduction	6
I.2 Systèmes sans fil	6
I.3 Canal sans fil	8
I.4 Modélisation physique des canaux sans fil	10
I.4.1 Espace libre, antennes d'émission et de réception fixes	11
I.4.2 Espace libre, antenne mobile	13
I.4.3 Mur réfléchissant, antenne fixe	14
I.5 Modèle d'entrée/sortie du canal sans fil	16
I.5.1 Le canal sans fil en tant que système linéaire variable dans le temps	16
I.6 Classifications des réseaux sans fil	19
I.6.1 Réseau sans fil	19
I.7 Types de réseaux sans fil	20
I.7.1 WLAN: réseaux locaux sans fil	21
I.7.1.1 IEEE 802.11, WiFi (Wireless Fidelity)	21
I.7.1.2 Hiperlan 1 & 2	22
I.7.2 WPAN: Réseaux personnels sans fil	22
I.7.2.1 Bluetooth	22
I.7.2.2 Home RF	22
I.7.2.3 ZigBee	23
I.7.2.4 Liaisons infrarouges	23
I.7.3 WMAN: Réseaux métropolitains sans fil	23
I.7.4 WWAN: Réseaux étendus sans fil	23
I.7.4.1 GSM	24
I.7.4.2 GPRS	24
I.7.4.3 UMTS	24
I.8 Classification selon l'infrastructure	24
I.8.1 Réseaux cellulaires (avec infrastructure)	25
I.8.2 Réseaux ad hoc (sans infrastructure)	25
I.9 Conclusion	28

Chapitre II	29
Réseaux coopératifs sans fil	
II.1 Introduction	30
II.2 Partie 01: Concepts associés	30
II.2.1 Les Topologies des Réseaux	30
II.2.2 Modèles de canaux sans fil	32
II.2.2.1 Canal AWGN	32
II.2.2.2 Effacement à grande échelle	32
II.2.2.3 Évanouissement à petite échelle	34
II.2.2.3.1 Effet de fondu plat	35
II.2.2.3.2 Effet de fondu sélectif en fréquence	36
II.2.3 Capacité et performances	37
II.2.3.1 Capacité de canal	37
II.2.3.2 Probabilité de panne	41
II.2.3.3 Diversité et multiplexage	42
II.2.4 Communication à bande étroite et large bande	45
II.3 Partie 02: Communication coopérative dans les réseaux de capteurs sans fil	46
II.3.1 Présentation	46
II.3.2 Schéma de codage du réseau	46
II.3.3 Schéma de relais coopératif	49
II.3.3.1 Amplifier et avancer	49
II.3.3.2 Relayage sélective	51
II.3.3.3 Relais incrémental	52
II.3.4 Schéma coopératif virtuel MISO	52
II.3.5 Conclusion	54
Chapitre III	55
Réseau mobile cinquième(5^{ème}) Génération	
III.1 Introduction	56
III.2 Technologies centrées sur la voix 1G et 2G	56
III.3 Haut débit mobile 3G et 4G	57
III.4 5G au-delà de la société mobile en réseau à large bande	59
III.5 Accès sans fil 5G	60
III.5.1 Tarifs de données	62
III.5.2 Latence	63
III.5.3 Fiabilité extrême	63
III.5.4 Appareils à faible coût avec une durée de vie de batterie très longue	64
III.5.5 Efficacité énergétique du réseau	64
III.6 5G ET IMT-2020	65
III.6.1 Scénarios d'utilisation pour imt-2020	66
III.6.2 Capacités des IMT-2020	68
III.6.3 Études de la 5G dans les groupes régionaux et opérateurs	72
III.7 Technologies une contre plusieurs: « network slicing »	76

III.8 Spectre 5G	76
III.8.1 EXPANSION DANS DES BANDES DE FRÉQUENCES PLUS ÉLEVÉES	76
III.9 Bandes de fréquence pour les déploiements initiaux 5G	81
III.10 Spécifications techniques 5G	82
III.11 Conclusion	83
Chapitre IV	84
Cooperative Protocol Software Defined Networking (CP-SDN)	84
IV.1 Introduction	85
IV.2 Concept du Plan de données programmable	88
IV.3 Séparation entre le plan de contrôle et le plan de données	88
IV.4 La virtualisation	91
IV.5 Architecture du réseau SDN	92
IV.6 Les protocoles dans le réseau 5G	93
IV.7 SDN pour les réseaux 5G	95
IV.8 Le principe de la Commutation dans SDN	100
IV.9 CP-SDN (Cooperative protocol - SDN)	101
IV.10 Le contrôleur dans le CP-SDN	102
IV.11 Commutation CP-SDN	103
IV.12 Résultats obtenus par l'implémentation du CP-SDN	104
IV.13 Conclusion	110
Conclusion générale	112
Bibliographie	115
Résumé	

Liste des Figures & des Tableaux

Chapitre I	5
Communication sans fil	
Figure I.1: Cellules et stations de base pour un réseau cellulaire, Partie (a): une vue simplifiée à l'extrême dans laquelle chaque cellule est hexagonale, Partie (b): un cas plus réaliste où les stations de base sont placées de manière irrégulière et les téléphones portables choisissent la meilleure station de base.	7
Figure I.2: La qualité du canal varie sur plusieurs échelles de temps. À une échelle lente, le canal varie en raison d'effets d'évanouissement à grande échelle. À une échelle rapide, le canal varie en raison des effets de trajets multiples.	10
Figure I.3: Illustration d'un chemin direct et d'un chemin réfléchi.	14
Figure I.4: Relation entre l'onde réfléchie et l'onde sans mur.	15
Figure I.5: Illustration de la relation entre un spectre de bande passante $S(f)$ et son équivalent en bande de base $S_b(f)$.	19
Figure I.6: Classification des réseaux sans fil.	20
Tableau I.1 : Comparaison des types de réseaux sans fil	21
Figure I.7 : Le modèle des réseaux mobiles avec infrastructure.	25
Figure I.8 : Réseau en mode ad hoc.	26
Figure I.9 : La modélisation des réseaux ad hoc.	26
Figure I.10 : Le changement de la topologie des réseaux ad hoc.	27
Figure I.11 : Communication entre les nœuds.	27
Chapitre II	29
Réseaux coopératifs sans fil	
Figure II.1: Topologie en étoile et topologie Peer-to-Peer	31
Figure II.2: Topologie de cluster à un niveau	31
Figure II.3: Expositions de canal: effet de perte de chemin avec $n = 3,5$, évanouissement macroscopique avec $\sigma_x^2 = 8dB$ et évanouissement de Rayleigh. .	36
Figure II.4: Capacité par rapport au SNR pour divers systèmes dans le canal à évanouissement Rayleigh .	40
Figure II.5: Capacité Vs Nombre d'antennes d'émission ou de réception pour divers systèmes dans le canal à évanouissements de Rayleigh; SNR = 10 dB. .	41
Figure II.6: Probabilité de panne par rapport au SNR dans le système MISO, les débits de communication souhaités sont respectivement $R = 1\text{bit} / \text{s} / \text{Hz}$ et $R = 2\text{bits} / \text{s} / \text{Hz}$. .	43
Figure II.7: Probabilité de panne par rapport au débit de communication souhaité dans le système MISO, SNR = 5 dB .	43
Figure II.8: Exemples d'échange de messages utilisant la méthode traditionnelle, le schéma de codage de réseau numérique et le schéma de codage de réseau analogique. .	47
Figure II.9: Deux paradigmes coopératifs simples utilisant un schéma de codage de réseau. .	49
Figure II.10: Relais coopératif fixe .	50
Figure II.11: Communication coopérative virtuelle MISO utilisant le code Alamouti	53
Tableau II.1: Cartographie de la modulation et de la démodulation	48

Chapitre III	55
Réseau mobile 5e Génération	
Figure III.1: Générations cellulaires.	56
Figure III.2: La convergence des technologies sans fil.	59
Figure III.3: 5G composé de l'évolution LTE et de la nouvelle technologie d'accès radio.	60
Figure III.4: Calendrier de l'UIT-R pour les IMT-2020.	66
Figure III.5: Cas d'utilisation IMT-2020 et mappage aux scénarios d'utilisation.	68
Figure III.6: Principales capacités des IMT-2020.	68
Figure III.7: Relation entre les capacités clés et les trois scénarios d'utilisation de l'UIT-R.	69
Figure III.8: Tranchage de réseau créant plusieurs réseaux virtuels pour différentes applications et différents cas d'utilisation au-dessus d'une infrastructure physique commune et d'un pool de spectre commun.	76
Figure III.9: Gamme de spectre étendue de 1G à 4G.	77
Figure III.10: Solution globale d'accès sans fil 5G consistant en l'évolution du LTE en combinaison avec une nouvelle technologie d'accès radio 5G.	80
Figure III.11: Spectre identifié par la CMR 15 et spectre pris en compte pour les premiers déploiements 5G.	81
Figure III.12: Calendrier de l'UIT-R et approche par étapes 3GPP de la 5G.	82
Chapitre IV	84
Cooperative Protocol Software Defined Networking (CP-SDN)	
Figure IV.1: Séparation entre le plan de contrôle et le plan de données.	89
Figure IV.2: Architecture réseau orientée 5G basée sur SDN.	90
Figure IV.3: Architecture SDN.	93
Figure IV.4: NFV SLICE dans le réseau 5G	98
Figure IV.5: ONF pipeline dans le réseau 5G	99
Figure IV.6: Schéma de données dans SDN	100
Figure IV.7: Protocole MFT	101
Figure IV.8: Architecture CP-SDN	102
Figure IV.9: Commutation CP-SDN	103
Figure IV.10: Schéma opérationnel du CP-SDN	104
Figure IV.11: Performances du délai eMBB pour différents nombres de tranches.	105
Figure IV.12: Performance du délai m-IOT pour différents nombres de tranches	105
Figure IV.13: Performances du délai eMBB pour différents nombres de tranches utilisant le SDN et le CP-SDN à $P = 0,5$.	106
Figure IV.14: Performances du délai eMBB pour différents nombres de tranches utilisant le SDN et le CP-SDN à $P = 0,6$.	107
Figure IV.15: Performances du délai eMBB pour différents nombres de tranches utilisant le SDN et le CP-SDN à $P = 0,7$.	108
Figure IV.16: Performances du délai eMBB pour différents nombres de Slices	108
Figure IV.17: Performances du délai mIoT pour différents nombres de Slices	109
Tableau IV. 1: Performance du CP-SDN vs SDN	109

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Actuellement, la quantité des informations échangées et manipulées est très importante, et par conséquent, elle nécessite des réseaux fiables et puissants afin d'assurer la rapidité dans la transmission et l'efficacité dans le traitement. Parmi ces réseaux, on peut citer la 5G. Les réseaux 5G sont déployés pour répondre aux besoins de plusieurs industries sur une infrastructure partagée avec l'utilisation de concepts incluant le découpage communautaire [1]. En ce qui concerne le flux de transport détenu par la 5G, les clients entièrement basés sur la vidéo représentent une grande partie du flux de données transporté, avec environ 79% des informations de cellule [2]. L'augmentation significative des appareils intelligents connectés avec des applications intelligentes comme le streaming vidéo et les jeux, nécessite une efficacité spectrale plus élevée et représente un grand défi des réseaux 5G par rapport aux 4G [3].

La communication sans fil est l'un des domaines les plus dynamiques dans la communication moderne, bien que cela a été discuté depuis les années 1960, la dernière décennie a vu une forte augmentation de la recherche dans ce secteur qui a touché l'ensemble des activités humaines. Cette forte demande est dû à une confluence de plusieurs facteurs.

- ✓ Le premier est l'augmentation explosive de la demande de connectivité sans fil, portée jusqu'à présent principalement par la téléphonie cellulaire, mais qui devrait bientôt être éclipsée par les applications de données sans fil. [3]
- ✓ Les progrès spectaculaires de la technologie VLSI a permis à de petites surfaces et de faible puissance mise en œuvre de sophistiqués signal de traitement des algorithmes et de codage techniques. [3]
- ✓ Le succès des normes numériques sans fil de deuxième génération (2G), en particulier la norme IS-95 Code Division Multiple Access (CDMA), démontre concrètement que les bonnes idées issues de la théorie de la communication peuvent avoir un impact significatif dans la pratique. La recherche poussée dans la dernière décennie a conduit à une plus riche ensemble de perspectives et des outils sur la façon de communiquer sur sans fil des canaux, et l'image est encore très bien en pleine évolution. [3]

L'étude de [4] montre que la 5G devrait atteindre 4,7 fois plus de données que la 4G régulière, avec plus de 12,3 milliards d'utilisateurs, ce qui dépasse de loin la population mondiale au cours de la prochaine décennie et qui apportera une certaine satisfaction au marché mondiale. En raison des chiffres massifs révélés par les statistiques du domaine des applications, il a été montré que les nouveaux systèmes de réseau 5G doivent fournir une capacité mille (1000) fois supérieure à celle du système cellulaire 4G, en synchronisation avec l'expansion du développement

d'applications, sachant que les appareils mobiles atteindront un nombre immense avec le lancement commercial de la 5G. En raison de l'explosion des données mobiles, les réseaux mobiles actuels souffrent de problèmes d'évolutivité et de faibles performances [4]. Ses insuffisances peuvent être comblées par le recours à la technologie SDN.

L'objectif principal de la technologie SDN réside dans la séparation de la gestion du réseau logiciel et du réseau de gestion basé sur le matériel (transfert de paquets). Le SDN dans sa nouvelle version conduit à un standard ouvert avec une optimisation des ressources avec le concept de développement de la virtualisation. Ce nouveau concept peut être le principal problème de déploiement critique que les réseaux mobiles connaîtront depuis le passage de la technologie analogique 1G à la 2G numérique. Même le niveau de perturbation LTE est moins critique que le déploiement SDN. Telles sont les principales raisons qui retardent la naissance des solutions SDN et leur déploiement pendant un temps supplémentaire. La 5G pourrait tirer parti des fonctionnalités et des avantages de la technologie SDN en combinant d'autres technologies de compactage telles que les ondes millimétriques, le DAS (système d'antenne distribuée) pour atteindre une capacité de 1000 x, un débit de 100 x et des connexions actives 100x de plus que les réseaux LTE existants. [5]

Le SDN (Software-Defined Networking), en tant que technologie émergente, dissocie la logique de transfert de la logique de gestion dans le réseau existant. Le SDN fait abstraction de toutes les fonctions de gestion dans le contrôleur centralisé, tout en sanctionnant la programmabilité pour le réseau [6].

Au cours de la dernière décennie, les recherches ont montré un intérêt particulier pour les réseaux cellulaires basés sur le SDN et leur impact positif sur l'industrie mobile.

SDN / NFV est une technologie émergente qui vise à déployer des réseaux flexibles, plus efficaces et rentables avec un niveau de sécurité élevé [7].

De plus, la philosophie SDN divise le réseau en deux plans principaux, un plan de gestion et un plan utilisateur. Le plan de gestion est considéré comme le cerveau du réseau avec un contrôleur centralisé qui exécute un progiciel qui est chargé de contrôler le plan utilisateur. Ce dernier se compose de périphériques réseau à bas prix en tant que commutateurs courants. Le contrôleur exécute le protocole Open Flow (OF) afin de configurer les tables de routage et de surveiller les statistiques de paquets du plan utilisateur. De l'autre côté, NFV propose aux opérateurs la virtualisation des opérations et des fonctionnalités du réseau en implémentant des serveurs standard au lieu d'Appliance très coûteuses et non standard [8]

Par conséquent, le modèle de conception SDN doit maintenir une infrastructure réseau transparente pour le niveau des applications [9]

Bien que plusieurs types de réseaux mobiles dominent actuellement, il existe également de nombreux défis, tels que: atténuer la consommation d'énergie des appareils et des stations de base,

une meilleure allocation des ressources, des débits de données plus élevés, garantir des temps d'aller-retour plus courts, réduire tous les coûts, développer et renforcer les politiques de gestion de la mobilité, l'élasticité, l'agilité et l'évolutivité [10].

En général, le SDN est une technologie innovante dans le domaine du réseautage qui consiste à définir les fonctionnalités du réseau dans des progiciels. Cela permet une efficacité sur la configuration du réseau et son allocation de ressources. Par la séparation entre le plan de contrôle et le plan de données, le SDN garantit une transparence entre l'infrastructure réseau et les applications en cours d'exécution. Ainsi, chaque contrôleur gère divers équipements du réseau en tant que commutateurs et attend un contrôle plus flexible et intelligent des données échangées sur le réseau [11].

Contrairement à la mise en réseau triviale qui rencontre une difficulté dans l'allocation des ressources et son agencement, SDN est un candidat favori pour de tels réseaux non gérés en découplant la gestion et le volet utilisateur [12]

Pour ce faire, SDN implémente OpenFlow en tant que protocole de communication, qui est normalisé par ONF (Open Network Foundation) [13].

Dans la littérature, diverses solutions d'allocation et de gestion des ressources ont été proposées pour contribuer aux réseaux 5G et 6G. L'intégration de réseau virtuel (VNE) est une telle stratégie qui rencontre la connaissance du plan de gestion pour la 5G / 6G. Les cartes radio-atmosphériques connues sous le nom de REM sont principalement considérées comme l'un des pionniers des systèmes de caractéristiques psychologiques. Cependant, la plupart de ces dispositifs sont fermés aux GPP et GTP, et leurs plans de gestion de la qualité remplissent certaines conditions particulières. Le besoin futur des réseaux 5G nécessite le développement de nouveaux modèles qui satisferont, non seulement le découplage entre le plan de gestion et le plan utilisateur, mais devraient prendre en charge les points chauds avec des fonctionnalités de haute capacité et de couverture [10].

De plus, la technologie de virtualisation vise à émuler les plateformes matérielles exécutées dans des progiciels. Ces packages sont installés dans des serveurs industriels nommés COTS (serveurs commerciaux standard) et sont accessibles via des machines virtuelles (VM), au lieu d'appliances matérielles dédiées.

Le SDN est actuellement connu comme une technologie moderne et inévitable dans le domaine des réseaux. Dans de tels réseaux, le contrôleur fonctionne comme un moniteur de réseau et définit les règles de transmission des flux de données. Les commutateurs effectuent le transfert et la suppression des paquets selon les règles définies par le contrôleur. Ainsi, le contrôleur devrait être en mesure de mettre en œuvre une stratégie de contrôle centralisée pour chaque flux de données d'échange en utilisant la technique de rapport de paquet d'en-tête [13].

L'Internet des objets envisage une auto-configuration, réseau adaptatif et complexe qui interconnecte les « choses » à Internet grâce à l'utilisation de la communication standard protocoles. La représentation contient des informations y compris l'identité, le statut, l'emplacement ou tout autre objet informations commerciales, sociales ou privées. Les choses offrent des services, avec ou sans intervention humaine, à travers l'exploitation de l'identification unique, de la saisie de données et capacité de communication et d'actionnement. [13]

Le principal avantage de notre modeste contribution numérique est d'améliorer les performances des réseaux 5G en utilisant la technologie SDN qui divise la fonctionnalité de traitement, en plus elle dispose d'un noyau dédié à chaque service. Cela augmente la flexibilité de livraison et garantit les exigences de QoS, au lieu d'avoir des fonctionnalités de plan U / C ad-hoc pour chaque analyse de rentabilisation. De plus, cette fonctionnalité assurera une grande évolutivité et conduira à plus d'efficacité en termes de signalisation et de latence, en évitant les traitements inutiles.

Dans notre thèse, le travail a été organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente une introduction au réseau communication sans fil et une présentation des différents types des réseaux sans fils. Ce chapitre aborde aussi la classification de ses réseaux.

Le deuxième chapitre est consacré à la coopération dans les systèmes de communication sans fils. Des hypothèses de simplification ont été présentées pour les deux réseaux 4G et 5G.

Dans le troisième chapitre, la nouvelle technologie de communication et de connexion de la 5G a été présentée et discutée.

Le quatrième chapitre a été consacré à la présentation de nos résultats liés aux différentes problématiques en cas de saturation de réseau.

Enfin, nous avons terminé notre thèse par une conclusion générale et quelques perspectives que nous considérons utiles pour les travaux à futurs.

CHAPITRE I : Communication sans fil

CHAPITRE I : Communication sans fil

I.1 Introduction

Il y a deux aspects fondamentaux de la communication sans fil qui rendent le problème très intéressant. Le premier est le phénomène d'évanouissement défini par la variation dans le temps des intensités de canal due à l'effet à petite échelle de l'évanouissement par trajets multiples, ainsi que des effets à plus grande échelle tels que la perte de trajet par atténuation de la distance et l'ombrage par les obstacles. Le second aspect est dû à la l'interférence qui peut se produire entre des émetteurs communiquant avec un récepteur commun (par exemple, liaison montante d'un système cellulaire), entre des signaux d'un seul émetteur vers plusieurs récepteurs (par exemple, liaison descendante d'un système cellulaire), ou entre différentes paires émetteur-récepteur (par exemple, interférence entre utilisateurs dans les différentes cellules).

Traditionnellement, la conception des systèmes sans fil a été axée sur l'augmentation de la fiabilité de l'interface radio; dans ce contexte, la décoloration et les interférences sont considérées comme des nuisances à les éviter. L'accent a été mis récemment sur l'augmentation de l'efficacité spectrale; associé à ce décalage qui est considérée comme une nouvelle vision très intéressante.

La mise en œuvre réussie d'un concept théorique ou d'une technique nécessite de comprendre comment il interagit avec le système sans fil dans son ensemble. Contrairement à la dérivation d'un concept ou d'une technique, cette vue est moins malléable aux formulations mathématiques et s'acquiert principalement par l'expérience de la conception de systèmes sans fil réels. Nous essayons de donner des exemples tangibles appliqués dans des systèmes sans fil réels [10-13].

I.2 Systèmes sans fil

La communication sans fil, malgré le battage médiatique de la presse populaire, est un domaine qui existe depuis plus de cent ans, à partir de 1897 environ avec les démonstrations réussies de la télégraphie sans fil de Marconi. En 1901, la réception radio à travers l'océan Atlantique avait été établie; ainsi, les progrès rapides de la technologie existent également depuis un certain temps. Au cours des cent années écoulées, de nombreux types de systèmes sans fil ont fleuri et ont souvent disparu par la suite [10]. Par exemple, la transmission télévisuelle, à ses débuts, était diffusée par des émetteurs radio sans fil, qui sont de plus en plus remplacés par la transmission par câble. De même, les circuits hyperfréquences point à point qui constituaient l'épine dorsale du réseau téléphonique sont remplacés par la fibre optique [11-12]. Dans le premier exemple, la technologie sans fil est devenue obsolète lors de l'installation d'un réseau de distribution filaire; dans le second, une nouvelle

technologie filaire (fibre optique) a remplacé l'ancienne technologie.

La zone couverte par une station de base, c'est-à-dire la zone à partir de laquelle les appels entrants atteignent cette station de base, est appelée une cellule. On imagine souvent une cellule comme une région hexagonale avec la station de base au milieu. On imagine alors une ville ou une région comme étant décomposée en un réseau hexagonal de cellules (voir Figure I.1a). En réalité, les stations de base sont placées de manière quelque peu irrégulière, en fonction de l'emplacement d'endroits tels que les sommets d'immeubles ou les sommets de collines qui ont une bonne couverture de communication et qui peuvent être loués ou achetés (voir Figure I.1b) [13]. De même, les utilisateurs mobiles connectés à une station de base sont choisis par de bons chemins de communication plutôt que par la distance géographique.

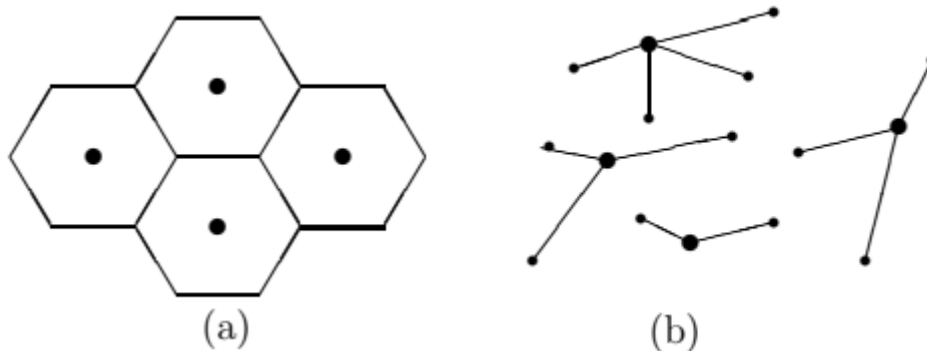


Figure I.1: Cellules et stations de base pour un réseau cellulaire, **Partie (a)**: une vue simplifiée à l'extrême dans laquelle chaque cellule est hexagonale, **Partie (b)**: un cas plus réaliste où les stations de base sont placées de manière irrégulière et les téléphones portables choisissent la meilleure station de base [14].

Lorsqu'un utilisateur effectue un appel, il est connecté à la station de base vers laquelle il semble avoir le meilleur chemin (souvent mais pas toujours la station de base la plus proche). Les stations de base d'une zone donnée sont ensuite connectées à un bureau de commutation de téléphonie mobile (MTSO, également appelé centre de commutation mobile MSC) par des connexions filaires à haut débit ou des liaisons hyper fréquences [16-17]. Le MTSO est connecté au réseau téléphonique public filaire. Ainsi, un appel entrant d'un utilisateur mobile est d'abord connecté à une station de base et de là au MTSO et ensuite au réseau filaire. De là, l'appel va à sa destination, qui peut être un téléphone filaire ordinaire ou un autre abonné mobile. Ainsi, on voit qu'un réseau cellulaire n'est pas un réseau indépendant, mais plutôt un appendice au réseau filaire. Le MTSO joue également un rôle majeur dans la coordination de la station de base qui traitera un appel à destination ou en provenance d'un utilisateur au moment où le transfert se fait d'un utilisateur d'une station de base à une autre [14-15].

Lorsqu'un autre utilisateur (câblé ou sans fil) passe un appel à un utilisateur donné, le processus inverse a lieu. Tout d'abord, le MTSO pour l'abonné appelé est trouvé, puis la station de base la plus proche est trouvée, et enfin, l'appel est établi via le MTSO et la station de base. La liaison sans fil d'une station de base aux utilisateurs mobiles est appelée de manière interchangeable la liaison descendante ou le canal aller, et la liaison des utilisateurs à une station de base est appelée la liaison montante ou un canal inverse. Il y a généralement de nombreux utilisateurs connectés à une seule station de base, et ainsi, pour le canal de liaison descendante, la station de base doit multiplexer l'ensemble des signaux vers les différents utilisateurs connectés puis diffuser une forme d'onde à partir de laquelle chaque utilisateur peut extraire son propre signal [16]. Pour le canal de liaison montante, chaque utilisateur connecté à une station de base donnée transmet sa propre forme d'onde, et la station de base reçoit la somme des formes d'onde des différents utilisateurs plus le bruit. La station de base doit ensuite séparer les signaux de chaque utilisateur et transmettre ces signaux au MTSO.

Les systèmes cellulaires plus anciens, tels que le système AMPS développé aux États-Unis dans les années 80, sont analogiques. Autrement dit, une forme d'onde vocale est modulée sur une porteuse et transmise sans être transformée en un flux numérique. Différents utilisateurs dans la même cellule se voient attribuer des fréquences de modulation différentes, et les cellules adjacentes utilisent différents ensembles de fréquences. Des cellules suffisamment éloignées les unes des autres peuvent réutiliser le même ensemble de fréquences avec peu de risque d'interférence [17-18].

Les systèmes cellulaires de deuxième génération sont numériques. L'un est le système GSM qui a été normalisé en Europe mais maintenant utilisé dans le monde entier, un autre est les normes TDMA (time-division multiple Access) développées aux États-Unis (IS-136), et un troisième est CDMA (code division multiple Access) (IS -95). Étant donné que ces systèmes cellulaires et leurs normes ont été initialement développés pour la téléphonie, les débits de données et les retards actuels dans les systèmes cellulaires sont essentiellement déterminés par les besoins vocaux [18-22]. Les systèmes cellulaires de troisième génération sont conçus pour gérer les données et / ou la voix. Alors que certains des systèmes de troisième génération sont essentiellement une évolution des systèmes vocaux de deuxième génération, d'autres sont conçus à partir de zéro pour répondre aux caractéristiques spécifiques des données.

En plus de l'exigence de débits plus élevés, les applications de données ont deux caractéristiques qui les distinguent de la voix: De nombreuses applications de données sont extrêmement explosives; les utilisateurs peuvent rester inactifs pendant de longues périodes de temps mais ont des demandes très élevées pendant de courtes périodes de temps. Les applications vocales, en revanche, ont une demande à taux fixe sur de longues périodes [19].

La voix a une exigence de latence relativement serrée de l'ordre de 100 ms. Les applications de données ont un large éventail d'exigences de latence; Les applications en temps réel, telles que les jeux, peuvent avoir des exigences de délai encore plus strictes que la voix tandis que de nombreuses autres, telles que les transferts de fichiers HTTP, ont une exigence beaucoup plus laxiste [20].

Comme mentionné ci-dessus, il existe de nombreux types de systèmes sans fil autres que cellulaires. Premièrement, il y a les systèmes de diffusion tels que la radio AM, la radio FM, la télévision et les systèmes de radiomessagerie. Tous ces éléments sont similaires à la partie descendante des réseaux cellulaires, bien que les débits de données, la taille des zones couvertes par chaque nœud de diffusion et les plages de fréquences soient très différents [17]. Ensuite, il y a les LAN sans fil (réseaux locaux). Ils sont conçus pour des débits de données beaucoup plus élevés que les systèmes cellulaires, mais sont par ailleurs similaires à une seule cellule d'un système cellulaire. Ceux-ci sont conçus pour connecter des ordinateurs portables et d'autres appareils portables au réseau local dans un immeuble de bureaux ou un environnement similaire.

Il y a peu de mobilité attendue dans tels systèmes et leur fonction principale. Les principales normes pour les réseaux locaux sans fil sont la famille IEEE 802.11. Il existe des normes à plus petite échelle comme Bluetooth ou une norme plus récente basée sur la communication Ultra-Wide band (UWB) dont le but est de réduire le câblage dans un bureau et de simplifier les transferts entre les appareils de bureau et portables [19].

I.3 Canal sans fil

La caractéristique déterminante du canal sans fil mobile se manifeste dans les variations de l'intensité du canal dans le temps et sur la fréquence. Les variations peuvent être grossièrement divisées en deux types [14-20]:

Évanouissement à grande échelle, en raison de la perte de signal sur le trajet en fonction de la distance et de l'ombre par de grands objets tels que des bâtiments et des collines. Cela se produit lorsque le mobile se déplace sur une distance de l'ordre de la taille de la cellule et est généralement indépendante de la fréquence.

Évanouissement à petite échelle, dû à l'interférence constructive et destructrice des multiples trajets de signaux entre l'émetteur et le récepteur. Cela se produit à l'échelle spatiale de l'ordre de la longueur d'onde porteuse et dépend de la fréquence.

Nous parlerons des deux types d'évanouissements dans ce chapitre, mais en mettant davantage l'accent sur ce dernier. La décoloration à grande échelle est plus pertinente pour des questions telles que la planification du site cellulaire. L'évanouissement par trajets multiples à petite échelle est plus pertinent pour la conception de systèmes de communication fiables et efficaces [17].

Nous commençons par la modélisation physique du canal sans fil en termes d'ondes électromagnétiques. Nous dérivons ensuite un modèle linéaire d'entrée-sortie variable dans le temps pour le canal et définissons certains paramètres physiques importants. Enfin, nous introduisons quelques modèles statistiques de la variation du canal dans le temps et sur la fréquence.

I.4 Modélisation physique des canaux sans fil

Les canaux sans fil fonctionnent grâce au rayonnement électromagnétique de l'émetteur au récepteur. En principe, on pourrait résoudre les équations du champ électromagnétique, en conjonction avec le signal émis, pour trouver le champ électromagnétique frappant l'antenne du récepteur. Cela devrait être fait en tenant compte des obstructions causées par le sol, les bâtiments, les véhicules, etc. à proximité de cette onde électromagnétique [16].

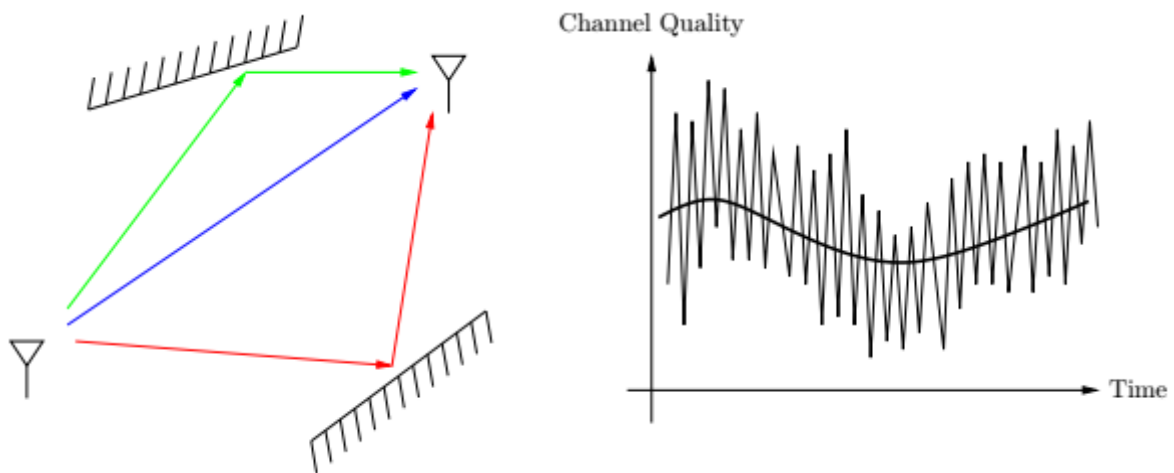


Figure I.2: La qualité du canal varie sur plusieurs échelles de temps. À une échelle lente, le canal varie en raison d'effets d'évanouissement à grande échelle. À une échelle rapide, le canal varie en raison des effets de trajets multiples [14-16].

La communication cellulaire aux États-Unis est limitée par la Federal Communication Commission (FCC) et par des autorités similaires dans d'autres pays, à l'une des trois bandes de fréquences, une autour de 0,9 GHz, une autour de 1,9 GHz et une autour de 5,8 GHz.

La longueur d'onde λ (f) du rayonnement électromagnétique à une fréquence f donnée par $\lambda = c / f$, où $c = 3 \cdot 10^8$ m / s est la vitesse de la lumière.

La longueur d'onde dans ces bandes cellulaires est donc une fraction de mètre, donc pour calculer le champ électromagnétique à un récepteur, les emplacements du récepteur et les obstructions devraient être connus avec des précisions inférieures à un mètre [12-15].

Les équations du champ électromagnétique sont donc trop complexes à résoudre, notamment pour les utilisateurs mobiles. Ainsi, nous devons nous demander ce que nous avons vraiment besoin de savoir sur ces canaux et quelles approximations pourraient être raisonnables.

L'une des questions importantes est de savoir où choisir de placer les stations de base et quelle plage de niveaux de puissance est alors nécessaire sur les canaux de liaison descendante et montante. Dans une certaine mesure, cette question doit recevoir une réponse expérimentale, mais cela aide certainement à avoir une idée sur les types de phénomènes à attendre. Une autre question majeure est de savoir quels types de techniques de modulation et de détection semblent prometteurs. Là encore, il faut savoir à quels types de phénomènes il faut s'attendre. Pour résoudre ce problème, nous construirons des modèles stochastiques du canal, en supposant que différents comportements de canal apparaissent avec des probabilités différentes et changent avec le temps (avec des propriétés stochastiques spécifiques). Nous reviendrons sur la question de savoir pourquoi de tels modèles stochastiques sont appropriés, mais pour l'instant, nous voulons simplement explorer les caractéristiques brutes de ces canaux. Commençons par examiner plusieurs exemples sur-idéalisés [22-23].

I.4.1 Espace libre, antennes d'émission et de réception fixes

Tout d'abord, considérons une antenne fixe rayonnant dans l'espace libre. Dans le champ lointain, le champ électrique et le champ magnétique à un endroit donné sont perpendiculaires à la fois l'un à l'autre et à la direction de propagation de l'antenne. Ils sont également proportionnels entre eux, il suffit donc de n'en connaître qu'un seul (tout comme dans une communication filaire, où nous considérons un signal comme simplement une forme d'onde de tension ou une forme d'onde de courant). En réponse à une sinusoïde transmise $\cos 2\pi f t$, nous pouvons exprimer le champ lointain électrique au temps t comme [14-17]:

$$E(f, t, (r, \theta, \psi)) = \frac{\alpha_s(\theta, \psi, f) \cos 2\pi f \left(t - \frac{r}{c}\right)}{r} \quad (\text{I.1})$$

Ici, (r, θ, ψ) représente le point u dans l'espace où le champ électrique est mesuré, où r est la distance de l'antenne émettrice à u et où (θ, ψ) représente les angles vertical et horizontal de l'antenne à u , respectivement. La constante c est la vitesse de la lumière et $\alpha_s(\theta, \psi, f)$ est le diagramme de rayonnement de l'antenne d'émission à la fréquence f dans la direction (θ, ψ) ; il contient également un facteur d'échelle pour tenir compte des pertes d'antenne. A noter que la phase du champ varie avec f_r/c , correspondant au retard provoqué par le rayonnement voyageant à la vitesse de la lumière.

Il ne s'agit pas ici de trouver réellement le diagramme de rayonnement pour une antenne donnée, mais seulement de reconnaître que les antennes ont des diagrammes de rayonnement et que le champ lointain de l'espace libre se comporte comme ci-dessus.

Il est important d'observer que, à mesure que la distance r augmente, le champ électrique diminue comme r^{-1} et donc la puissance par mètre carré dans l'onde d'espace libre diminue comme r^{-2} .

Ceci est attendu car si nous regardons des sphères concentriques de rayon croissant r autour de l'antenne, la puissance totale rayonnée à travers la sphère reste constante, mais la surface augmente à mesure que r^{-2} .

Ainsi, la puissance par unité de surface doit diminuer comme r^{-2} . Nous verrons bientôt que cette réduction r^{-2} de la puissance avec la distance n'est souvent pas valable lorsqu'il y a des obstructions à la propagation de l'espace libre.

Ensuite, supposons qu'il y ait une antenne de réception fixe à l'emplacement $u = (r, \theta, \psi)$. La forme d'onde reçue (en l'absence de bruit) en réponse à la sinusoïde transmise ci-dessus est alors

$$E_r(f, t, u) = \frac{\alpha(\theta, \psi, f) \cos 2\pi f \left(t - \frac{r}{c} \right)}{r} \quad (\text{I.2})$$

D'où $\alpha(\theta, \psi, f)$ est le produit des diagrammes d'antenne des antennes d'émission et de réception dans la direction donnée. Notre approche de (I.2) est un peu étrange puisque nous avons commencé avec le champ d'espace libre en u en l'absence d'antenne. Le fait d'y placer une antenne de réception modifie le champ électrique au voisinage de u , mais cela est pris en compte par le diagramme d'antenne de l'antenne de réception. Supposons maintenant, pour le u donné, que nous définissions

$$H(f) = \frac{\alpha(\theta, \psi, f) e^{-\frac{j2\pi fr}{c}}}{r} \quad (\text{I.3})$$

On a alors $E_r(f, t, u) = \Re[H(f)e^{j2\pi ft}]$.

Nous ne l'avons pas encore mentionné, mais (I.1) et (I.2) sont tous deux linéaires en entrée. C'est-à-dire que le champ reçu (forme d'onde) en u en réponse à une somme pondérée de formes d'onde transmises est simplement la somme pondérée des réponses à ces formes d'onde individuelles. Ainsi, $H(f)$ est la fonction système pour un canal LTI (linéaire invariant dans le temps), et sa transformée de Fourier inverse est la réponse impulsionnelle. La nécessité de comprendre l'électromagnétisme est de déterminer quelle est cette fonction du système [22-27]. Nous verrons dans ce qui suit que la linéarité est une bonne hypothèse pour tous les canaux sans fil que nous considérons, mais que l'invariance temporelle ne tient pas lorsque les antennes ou les obstructions sont en mouvement relatif.

I.4.2 Espace libre, antenne mobile

Ensuite, considérons l'antenne fixe et le modèle d'espace libre ci-dessus avec une antenne de réception qui se déplace à la vitesse v dans le sens de la distance croissante de l'antenne d'émission. Autrement dit, nous supposons que l'antenne de réception est à un emplacement mobile décrit par $u(t) = (r(t), \theta, \psi)$ avec $r(t) = r_0 + vt$. En utilisant (I.1) pour décrire le champ électrique en espace libre au point mobile $u(t)$ (pour le moment sans antenne de réception), nous avons :

$$E(f, t, (r_0 + vt, \theta, \psi)) = \frac{\alpha_s(\theta, \psi, f) \cos 2\pi f \left(t - \frac{r_0 + vt}{c} \right)}{r_0 + vt} \quad (\text{I.4})$$

Nous pouvons réécrire $f \left(\left(t - \frac{r_0}{c} \right) - \left(\frac{vt}{c} \right) \right)$ comme $f \left(\left(1 - \frac{v}{c} \right) t - \frac{r_0}{c} \right)$. Ainsi, la sinusoïde à la fréquence f a été convertie en une sinusoïde de fréquence $f \left(1 - \frac{v}{c} \right)$; il y a eu un décalage Doppler de $\frac{fv}{c}$ en raison du mouvement du point d'observation. Intuitivement, chaque crête successive de la sinusoïde transmise doit parcourir un peu plus loin avant d'être observée au point d'observation en mouvement [28].

Si l'antenne est maintenant placée à $u(t)$ et que le changement de champ dû à la présence de l'antenne est à nouveau représenté par le diagramme de l'antenne de réception, la forme d'onde reçue, par analogie avec (I.2), est

$$E_r(f, t, (r_0 + vt, \theta, \psi)) = \frac{\alpha(\theta, \psi, f) \cos 2\pi f \left(\left(1 - \frac{v}{c} \right) t - \frac{r_0}{c} \right)}{r_0 + vt} \quad (\text{I.5})$$

Ce canal ne peut pas être représenté comme un canal LTI. Si nous ignorons l'atténuation variable dans le temps dans le dénominateur de (I.5), cependant, nous pouvons représenter le canal en termes d'une fonction système suivie de la traduction de la fréquence f par le décalage Doppler - fv / c . Il est important d'observer que la quantité de décalage dépend de la fréquence f . Nous reviendrons sur l'importance de ce décalage Doppler et de l'atténuation variable dans le temps après avoir considéré l'exemple suivant [30].

L'analyse ci-dessus ne dépend pas du fait que ce soit l'émetteur ou le récepteur (ou les deux) qui se déplacent. Tant que $r(t)$ est interprété comme la distance entre les antennes (et que les orientations relatives des antennes sont constantes), (I.4) et (I.5) sont valides.

I.4.3 Mur réfléchissant, antenne fixe

Considérons la Figure I.3 ci-dessous dans laquelle il y a une antenne fixe émettant la sinusoïde $\cos(2\pi ft)$, une antenne de réception fixe, et une seule grande paroi fixe parfaitement réfléchissante. On suppose qu'en l'absence d'antenne de réception, le champ électromagnétique au point où l'antenne de réception sera placée est la somme du champ d'espace libre provenant de l'antenne d'émission plus une onde réfléchie provenant de la paroi [12-14]. Comme précédemment, en présence de l'antenne de réception, la perturbation du champ due à l'antenne est représentée par le diagramme d'antenne. Une hypothèse supplémentaire ici est que la présence de l'antenne de réception n'affecte pas sensiblement l'onde plane frappant la paroi. En substance, ce que nous avons fait ici est d'approcher la solution des équations de Maxwell par une méthode appelée lancer de rayons [25]. L'hypothèse ici est que la forme d'onde reçue peut être approximée par la somme de l'onde d'espace libre de l'émetteur émetteur plus les ondes d'espace libre réfléchies de chacun des obstacles réfléchissants.

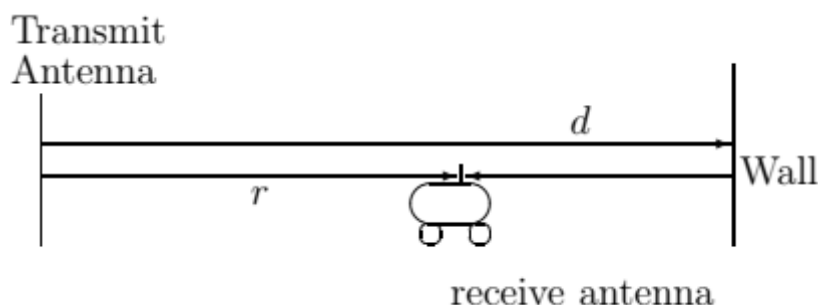


Figure I.3: Illustration d'un chemin direct et d'un chemin réfléchi [14].

Dans la situation actuelle, si l'on suppose que le mur est très grand, l'onde réfléchie en un point donné est la même (sauf pour un changement de signe) que l'onde d'espace libre qui existerait de

l'autre côté du mur si le mur n'était pas présent (voir Figure I.4). Cela signifie que l'onde réfléchie par le mur a l'intensité d'une onde d'espace libre à une distance égale à la distance par rapport au mur, puis retourne à l'antenne de réception, c'est-à-dire $2d - r$. En utilisant (I.2) pour l'onde directe et l'onde réfléchie, et en supposant le même gain d'antenne α pour les deux ondes, nous obtenons le signal reçu qui est une superposition de deux ondes, toutes deux de fréquence f .

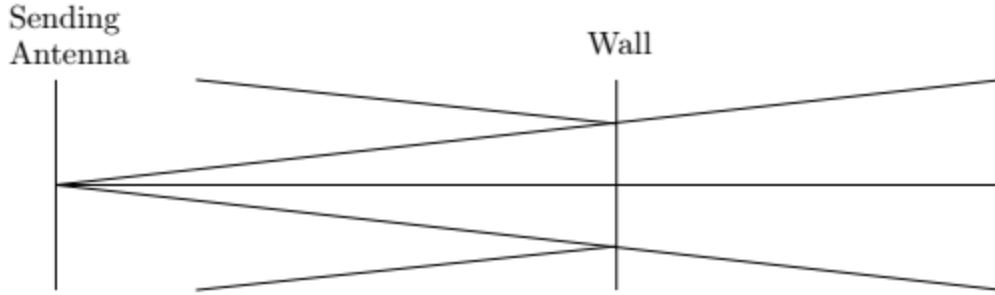


Figure I.4: Relation entre l'onde réfléchie et l'onde sans mur [14].

$$E_r(f, t) = \frac{\alpha \cos 2\pi f \left(t - \frac{r}{c} \right)}{r} - \frac{\alpha \cos 2\pi f \left(t - \frac{2d-r}{c} \right)}{2d-r} \quad (\text{I.6})$$

Lorsque la différence de phase entre les deux ondes est un multiple entier de 2π , les deux ondes s'additionnent de manière constructive et le signal reçu est fort.

$$\Delta\theta = \left(\frac{2\pi f(2d-r)}{c} + \pi \right) - \left(\frac{2\pi f r}{c} \right) = \frac{4\pi f}{c} (d - r) + \pi \quad (\text{I.7})$$

Lorsque la différence de phase est un multiple entier impair de π , les deux ondes s'additionnent de manière destructive et le signal reçu est faible. En fonction de r , cela se traduit par un modèle spatial d'interférences constructives et destructives des ondes. La distance d'un sommet à une vallée s'appelle la distance de cohérence [19]:

$$\Delta x_c = \frac{\lambda}{4} \quad (\text{I.8})$$

où $\lambda = c/f$ est la longueur d'onde de la sinusoïde transmise.

Le diagramme d'interférence constructif et destructif dépend également de la fréquence f : pour un r fixe, si f change de

$$\frac{1}{2} \left(\frac{2d-r}{c} + \frac{r}{c} \right)^{-1} \quad (\text{I.9})$$

On passe d'un sommet à une vallée. La quantité

$$T_d := \frac{2d-r}{c} + \frac{r}{c} \quad (\text{I.10})$$

S'appelle l'étalement du retard du canal: c'est la différence entre les retards de propagation le long des deux chemins de signal. Ainsi, le motif d'interférence constructif et destructif change de manière significative si la fréquence change d'une quantité de l'ordre de $1 / T_d$. Ce paramètre est appelé la bande passante de cohérence.

I.5 Modèle d'entrée/sortie du canal sans fil

Nous dérivons un modèle d'entrée / sortie dans cette section. Nous montrons tout d'abord que les effets multi-trajets peuvent être modélisés comme un système linéaire variable dans le temps. On obtient alors une représentation en bande de base de ce modèle [21]. Le canal à temps continu est ensuite échantillonné pour obtenir un modèle à temps discret. Enfin, nous intégrons du bruit additif.

I.5.1 Le canal sans fil en tant que système linéaire variable dans le temps

Dans la section précédente, nous nous sommes concentrés sur la réponse à l'entrée sinusoïdale $\varphi(t) = \cos 2\pi ft$. Le signal reçu peut être écrit comme $a_i(f, t) \varphi(t - \tau_i(f, t))$, où $a_i(f, t)$ et $\tau_i(f, t)$ sont respectivement les atténuations globales et le retard de propagation à l'instant t de l'émetteur au récepteur sur le trajet i .

L'atténuation globale est simplement le produit des facteurs d'atténuation dus au diagramme d'antenne de l'émetteur et du récepteur, à la nature du réflecteur, ainsi qu'à un facteur qui est fonction de la distance de l'antenne émettrice au réflecteur et de le réflecteur à l'antenne de réception [26].

Nous avons décrit l'effet de canal à une fréquence f particulière. Si nous supposons en outre que les $a_i(f, t)$ et les $\tau_i(f, t)$ ne dépendent pas de la fréquence f , alors nous pouvons utiliser le principe de superposition pour généraliser la relation entrée-sortie ci-dessus à un entrée arbitraire $x(t)$ avec une bande passante différente de zéro:

$$y(t) = \sum_i a_i(t)x(t - \tau_i(t)) \quad (\text{I.11})$$

En pratique, les atténuations et les retards de propagation sont généralement des fonctions de fréquence variant lentement. Ces variations découlent des longueurs de trajet variant dans le temps et également des gains d'antenne dépendant de la fréquence. Cependant, nous nous intéressons

principalement à la transmission sur des bandes étroites par rapport à la fréquence porteuse, et sur de telles plages, nous pouvons omettre cette dépendance en fréquence. Il convient cependant de noter que bien que les atténuations et retards individuels soient supposés être indépendants de la fréquence, la réponse globale du canal peut encore varier avec la fréquence du fait que différents chemins ont des retards différents [28-29].

Pour l'exemple d'un mur parfaitement réfléchissant de la Figure I.5, alors,

$$a_1(t) = \frac{|a|}{r_0+vt} \text{ et } a_2(t) = \frac{|a|}{2d-r_0-vt} \quad (\text{I.12})$$

$$\tau_1(t) = \frac{r_0+vt}{c} - \frac{\angle\Phi_1}{2\pi f} \text{ et } \tau_2(t) = \frac{2d-r_0-vt}{c} - \frac{\angle\Phi_2}{2\pi f} \quad (\text{I.13})$$

Où la première expression est pour le chemin direct et la seconde pour le chemin réfléchi. Le terme $\angle\phi_j$ sert ici à tenir compte des changements de phase possibles au niveau de l'émetteur, du réflecteur et du récepteur. Pour l'exemple ici, il y a une inversion de phase au niveau du réflecteur donc on prend $\phi_1 = 0$ et $\phi_2 = \pi$.

Le canal (I.11) étant linéaire, il peut être décrit par la réponse $h(\tau, t)$ au temps t à une impulsion transmise au temps $(t - \tau)$. En termes de $h(\tau, t)$, la relation entrée-sortie est donnée par:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau, t)x(t - \tau)d\tau \quad (\text{I.14})$$

En comparant (I.14) et (I.11), nous voyons que la réponse impulsionnelle pour le canal à trajets multiples à évanouissements est :

$$h(\tau, t) = \sum_i a_i(t)\delta(\tau - \tau_i(t)) \quad (\text{I.15})$$

Cette expression est vraiment assez utile. Il est dit que l'effet des utilisateurs mobiles, des réflecteurs et des absorbeurs en mouvement arbitraire, et toutes les complexités de la résolution des équations de Maxwell, la contribuent à réduire à une relation d'entrée / sortie entre les antennes d'émission et de réception qui sont simplement représentées comme la réponse impulsionnelle d'un filtre de canal linéaire variable dans le temps [33-34].

L'effet du décalage Doppler n'est pas immédiatement évident dans cette représentation. D'après (I.13) pour l'exemple de paroi réfléchissante unique, $\tau_{i0}(t) = v_i / c$ où v_i est la vitesse avec laquelle

la $i^{\text{ème}}$ longueur de trajet augmente. Ainsi, le décalage Doppler sur le $i^{\text{ème}}$ chemin est $-f\tau_{i0}(t)$.

Dans le cas particulier où l'émetteur, le récepteur et l'environnement sont tous stationnaires, les atténuations $a_i(t)$ et les retards de propagation $\tau_i(t)$ ne dépendent pas du temps t , et nous avons le canal linéaire invariant dans le temps habituel avec une réponse impulsionnelle

$$h(\tau) = \sum_i a_i \delta(\tau - \tau_i) \quad (\text{I.16})$$

Pour la réponse impulsionnelle variable dans le temps $h(\tau, t)$, nous pouvons définir une réponse en fréquence variable dans le temps

$$H(f; t) := \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau, t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau = \sum_i a_i(t) e^{-j2\pi f\tau_i(t)} \quad (\text{I.17})$$

Dans le cas particulier où le canal est invariant dans le temps, cela se réduit à la réponse en fréquence habituelle.

Une façon d'interpréter $H(f, t)$ est de considérer le système comme une fonction variant lentement de t avec une réponse en fréquence $H(f, t)$ à chaque instant t fixe. Par Correspondant, $h(\tau, t)$ peut être considéré comme la réponse impulsionnelle du système à un instant t fixe.

C'est une manière légitime et utile de penser les canaux à évanouissements par trajets multiples, car l'échelle de temps à laquelle le canal varie est généralement beaucoup plus longue que l'étalement du retard de la réponse impulsionnelle à un moment fixe.

Le temps mis par le canal pour changer de manière significative est de l'ordre de la milliseconde tandis que l'étalement du retard est de l'ordre de la microseconde [27-29]. Les canaux à évanouissement qui ont cette caractéristique sont parfois appelés sous canaux étalés.

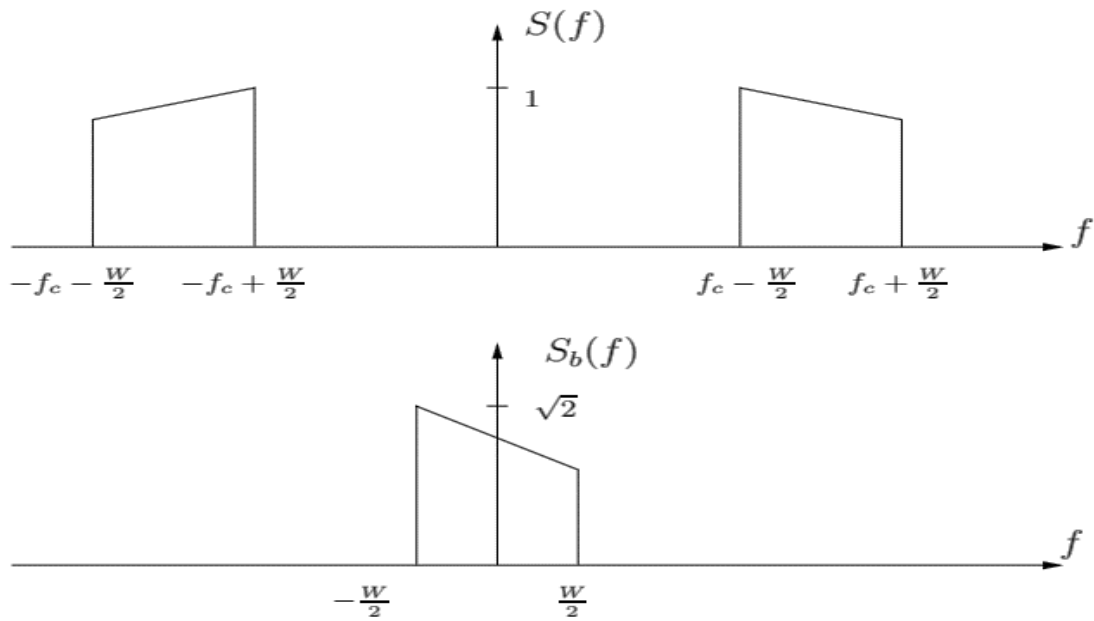


Figure I.5: Illustration de la relation entre un spectre de bande passante $S(f)$ et son équivalent en bande de base $S_b(f)$ [14].

I.6 Classifications des réseaux sans fil

Dans cette partie on va expliquer les types de réseaux sans fil (WLANS, WPANS, WMANS et WWANS) et la terminologie des réseaux sans fil (mode Ad hoc, mode Infrastructure, BSS, ESS, BSA, SSID, WEP, EAP, WPA, WPA2, infrarouge, Bluetooth, FHSS, DSSS, FHSS, OFDM, MIMO, RF, Omni directionnel, 802.11g, 802.11a et 802.11h) [32-35].

I.6.1 Réseau sans fil

Un réseau sans fil permet aux gens de communiquer et d'accéder aux applications et aux informations sans fil. Cela offre la liberté de mouvement et la possibilité d'étendre les applications à différentes parties d'un bâtiment, d'une ville ou presque partout dans le monde. Les réseaux sans fil permettent aux utilisateurs d'interagir avec leurs e-mails ou de naviguer sur Internet à partir d'un emplacement de leur choix.

De nombreux types de systèmes de communication sans fil existent, mais un attribut distinctif d'un réseau sans fil est que la communication a lieu entre des périphériques informatiques. Ces appareils comprennent les assistants numériques personnels (PDA), les ordinateurs portables, les ordinateurs personnels (PC), les serveurs et les imprimantes [30]. Les périphériques informatiques ont des processeurs, de la mémoire et un moyen d'interfaçage avec un type particulier de réseau. Les téléphones portables traditionnels n'entrent pas dans la définition d'un appareil informatique; cependant, les nouveaux téléphones et même les casques audio commencent à intégrer la puissance de calcul et les adaptateurs réseau. À terme, la plupart des appareils électroniques offriront des connexions réseau sans fil [34].

Comme pour les réseaux basés sur le fil ou la fibre optique, les réseaux sans fil véhiculent des informations entre les appareils informatiques. Les informations peuvent prendre la forme de messages électroniques, de pages Web, d'enregistrements de base de données, de vidéo en continu ou de voix. Dans la plupart des cas, les réseaux sans fil transfèrent des données, telles que des messages électroniques et des fichiers, mais les progrès dans les performances des réseaux sans fil permettent également la prise en charge des communications vidéo et vocales [28-30].

I.7 Types de réseaux sans fil

Un réseau sans fil (Wireless network) est un réseau où au moins deux nœuds peuvent avoir une communication sans liaison filaire. Ces réseaux de communications permettent aux utilisateurs de profiter de tous les services traditionnels des réseaux indépendamment de leurs positions géographiques [32-35].

Les réseaux sans fil peuvent avoir une classification selon deux critères. La première est la zone de couverture du réseau. Au vu de ce critère il existe quatre catégories : les réseaux personnels, les réseaux locaux, le réseau métropolitain et les réseaux étendus. Le second critère est l'infrastructure ainsi que le modèle adopté. Par rapport à ce critère on peut diviser les réseaux sans fils en : réseaux avec infrastructures et réseaux sans infrastructure, comme on le voit dans l'illustration de la figure suivante [36]:

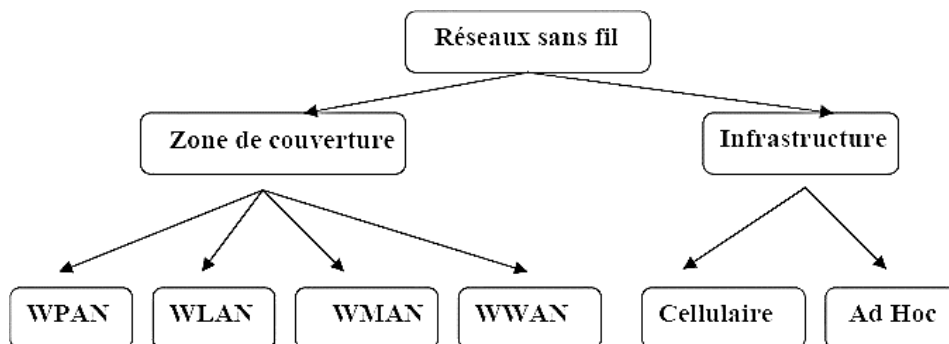


Figure I.6: Classification des réseaux sans fil [34].

Tableau I.1 : Comparaison des types de réseaux sans fil [37].

Type	Coverage	Performance	Standards	Applications
Wireless PAN	Within reach of a person	Moderate	Wireless PAN Within reach of a person Moderate Bluetooth, IEEE 802.15, and IrDa Cable replacement for peripherals	Cable replacement for peripherals
Wireless LAN	Within a building or campus	High	IEEE 802.11, Wi-Fi, and HiperLAN	Mobile extension of wired networks
Wireless MAN	Within a city	High	Proprietary, IEEE 802.16, and WIMAX	Fixed wireless between homes and businesses and the Internet
Wireless WAN	Worldwide	Low	CDPD and Cellular 2G, 2.5G, and 3G	Mobile access to the Internet from outdoor areas

I.7.1 WLAN: réseaux locaux sans fil

Les WLAN permettent aux utilisateurs d'une zone locale, telle qu'un campus universitaire ou une bibliothèque, de former un réseau ou d'accéder à Internet. Un réseau temporaire peut être formé par un petit nombre d'utilisateurs sans avoir besoin d'un point d'accès; étant donné qu'ils n'ont pas besoin d'accéder aux ressources du réseau. Ces réseaux sont principalement basés sur les technologies suivantes [37]:

I.7.1.1 IEEE 802.11, WiFi (Wireless Fidelity)

IEEE 802.11 est un standard de réseau sans fil local proposé par l'organisme de standardisation Américain IEEE. La technologie 802.11 est généralement considérée comme la version sans fil de 802.3 (Ethernet). La technologie 802.11 a connu beaucoup d'évolutions, notamment la 802.11.a et la 802.11b qui proposent une amélioration de la norme initiale en introduisant la modulation CCK (Complementary Code Keying) dans la bande des 2,4 GHz.

Deux nouveaux débits sont alors disponibles, 5,5 Mbits/s et 11 Mbits/s sur une portée de quelques dizaines de mètres environ. Le 802.11b est l'amendement de 802.11 qui a donné sa popularité au WiFi. Bien que 802.11b soit encore largement utilisé, il est maintenant supplanté par 802.11g. Ce

dernier constitue une amélioration directe de 802.11b avec un débit bande de base de 54 Mbits/s sur la bande des 2,4 GHz [31-38].

I.7.1.2 Hiperlan 1 & 2

Élaboré par l'ETSI (European Telecommunications Standards Institut), Hiperlan est exclusivement une norme européenne. La technologie de Hiperlan exploite la bande de fréquence de 5GHz et les débits changent selon la version, ainsi : Hiperlan1 apporte un débit de 20 Mbit/s et Hiperlan2 offre un débit de 54 Mbit/s sur une portée d'action semblable dans celui de la Wi-Fi (100 mètres) [31-38].

I.7.2 WPAN: Réseaux personnels sans fil

Les deux technologies actuelles pour les réseaux personnels sans fil sont l'infrarouge (IR) et le Bluetooth (IEEE 802.15). Ceux-ci permettront la connectivité des appareils personnels dans une zone d'environ 30 pieds. Cependant, l'IR nécessite une ligne directe de site et la portée est moindre. Les réseaux personnels sans fil ou Wireless Personal Area Network (WPAN), sont des réseaux sans fil à très faible portée, de l'ordre d'une dizaine de mètres. Ils sont le plus souvent utilisés à faire communiquer entre eux des matériels présents sur une personne (par exemple une oreillette et un téléphone portable). Ils sont également utilisés pour relier des équipements informatiques entre eux sans liaison filaire : par exemple pour relier une imprimante ou un PDA (Personal Digital Assistant) à un ordinateur de bureau ou faire communiquer deux machines très peu distantes. Il existe plusieurs technologies permettant la mise en œuvre de tels réseaux qui sont [38]:

I.7.2.1 Bluetooth

La norme Bluetooth (pris en charge par IEEE 802.15.1) est une technologie de moyen débit, elle permet d'atteindre un débit maximal théorique de 1Mbps (environ 720Kbps effectif) à basse consommation énergétique. Bluetooth utilise la bande de fréquence 2.4GHz avec une couverture entre 10 et 30 mètres. Cette technologie permet de créer un réseau de 8 appareils en communication simultanée. La petite taille des composants Bluetooth lui permet d'être inséré dans des équipements tels que les claviers et les souris sans fil, les kits main libre ou écouteur et le transfert de données entre un pc et les PDA (Personal digital assistant) ou téléphones mobiles...etc [35-40].

I.7.2.2 Home RF

Comme son nom l'indique, Home RF est une norme de réseau destinée à un usage domestique pour partager un accès à Internet ou transporter des communications téléphoniques DECT3. Il a été lancé par le consortium industriel formé entre autres par HP, IBM, Siemens, Proxim, Compaq, Intel et Microsoft. Home RF proposait une couche physique travaillant dans la bande des 2,4 GHz,

en FHSS (à 50 sauts par secondes), sur une modulation de type 2- FSK ou 4 -FSK.

Le débit bande de base est de 1 Mbits/s ou 2 Mbits/s, suivant la modulation utilisée, avec une portée typique de l'ordre d'une cinquantaine de mètres. Home RF n'a pas connue de succès et a été abandonnée [35-40].

I.7.2.3 ZigBee

Le standard IEEE 802.15.4 propose une norme pour les couches physique et liaison de données, orientée très faible consommation énergétique, qui rend cette bien adaptée à de petits appareils électroniques (appareils électroménagers, hifi, jouets,..), et plus particulièrement aux réseaux de capteurs. La pile proposée par l'IEEE et la ZigBee qui a pour objectif de promouvoir une puce offrant un débit relativement faible (100Kbps environ) mais à un coût très bas, et une consommation électrique extrêmement réduite [35-40].

I.7.2.4 Liaisons infrarouges

La technologie infrarouge ou IrDA est également utilisée dans ce type de réseaux. Cette technologie est cependant beaucoup plus sensible que Bluetooth aux perturbations lumineuses et nécessite une vision directe entre les éléments souhaitant communiquer, ce qui la limite bien souvent à un usage de type télécommande [35-40].

I.7.3 WMAN: Réseaux métropolitains sans fil

Les réseaux métropolitains sans fil ou Wireless Metropolitan Area Network (WMAN) sont aussi connus sous l'appellation de boucle locale radio (BLR). Les réseaux basés sur la technologie IEEE 802.16 ont une portée de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres (50km de portée théorique annoncée) et un taux de transmission radio théorique pouvant atteindre 74 Mbit/s pour IEEE 802.16, plus connu sous le nom commercial de WiMAX. Cette technologie permet la connexion de plusieurs réseaux dans une zone métropolitaine tels que différents bâtiments d'une ville, ce qui peut être une alternative ou une sauvegarde à la pose de câbles en cuivre ou en fibre [35-40].

I.7.4 WWAN: Réseaux étendus sans fil

Les réseaux sans fil (WWAN pour Wireless Wide Area Network) Cette catégorie possède assez peu de technologies à l'heure actuelle. Les seules technologies de WWAN disponibles sont des technologies utilisant les satellites géostationnaires ou en orbite basse pour relayer l'information entre plusieurs points du globe. Ces types de réseaux peuvent être maintenus sur de vastes zones, telles que des villes ou des pays, via plusieurs systèmes satellitaires ou sites d'antennes gérés par un FAI. Ces types de systèmes sont appelés systèmes 2G (2e génération). Les principales technologies sont les suivantes [38-39]:

I.7.4.1 GSM

GSM est l'abréviation de (Global System for Mobile Communication), c'est une norme établie en commun par les opérateurs européens depuis 1982, ayant pour objectif le développement d'un système de téléphonie mobile permettant des communications outre-mer. La communication a lieu par un paquet d'onde ayant deux fréquences : 900 MHz et 1800 MHz.

Le GSM se distingue par plusieurs spécificités, le premier est l'aspect numérique du réseau, qui offre une qualité supérieure grâce à sa résistance aux interférences. La deuxième spécificité du réseau de GSM réside dans sa configuration cellulaire. Le territoire est subdivisé en petites cellules attachées les unes aux autres. Chaque cellule se voit assigner un certain nombre de canaux permettant les communications [35-40].

I.7.4.2 GPRS

Le GPRS (General Packet Radio Services) est une technologie de radiocommunication par commutation de paquets pour les réseaux de GSM. Les connexions des services de GPRS sont toujours ouvertes afin d'offrir aux utilisateurs des terminaux mobiles une disponibilité de réseau identique à celle qu'ils pourraient atteindre par des réseaux d'entreprise. Le GPRS offre une connectivité d'IP de bout en bout, du terminal GPRS jusqu'à n'importe quel réseau IP.

Les terminaux peuvent être intégrés efficacement aux réseaux Internet. La vitesse "utile" sera d'environ 40 Kb/s (vitesse maximum : 171 Kb/s), l'un ou l'autre est quatre fois supérieure à celle du GSM [35-40].

I.7.4.3 UMTS

UMTS L'abréviation de « Universal Mobile Telecommunications System », l'UMTS désigne une nouvelle norme de téléphonie mobile. Le principe de l'UMTS consiste à exploiter une bande de fréquences plus grande pour faire transmettre plus des données et donc obtenir un débit plus important. En théorie, il peut atteindre 2 Mb/s.

La norme d'UMTS exploite de nouvelles bandes de fréquences situées entre 1900 et 2200 MHz. Cette technologie permet de faire passer des données simultanément et offre alors des débits nettement supérieurs à ceux atteints par le GSM et le GPRS [35-40].

I.8 Classification selon l'infrastructure

Les environnements mobiles sont des systèmes composés de sites mobiles et qui permettent à leurs utilisateurs d'accéder à l'information indépendamment de leurs positions géographiques. Les réseaux mobiles ou sans fil, peuvent être classés en deux classes : les réseaux avec infrastructure et les réseaux sans infrastructure [35-40].

I.8.1 Réseaux cellulaires (avec infrastructure)

Ce type de réseaux se compose des éléments suivants :

Les "sites fixes" du réseau filaire.

Les "sites mobiles", réseaux sans fils.

Certains sites fixes, appelés stations de base (SB) sont munis d'une interface de communication sans fil pour la communication directe avec les sites mobiles localisés dans une zone géographique limitée, appelée cellule comme le montre la figure suivante:

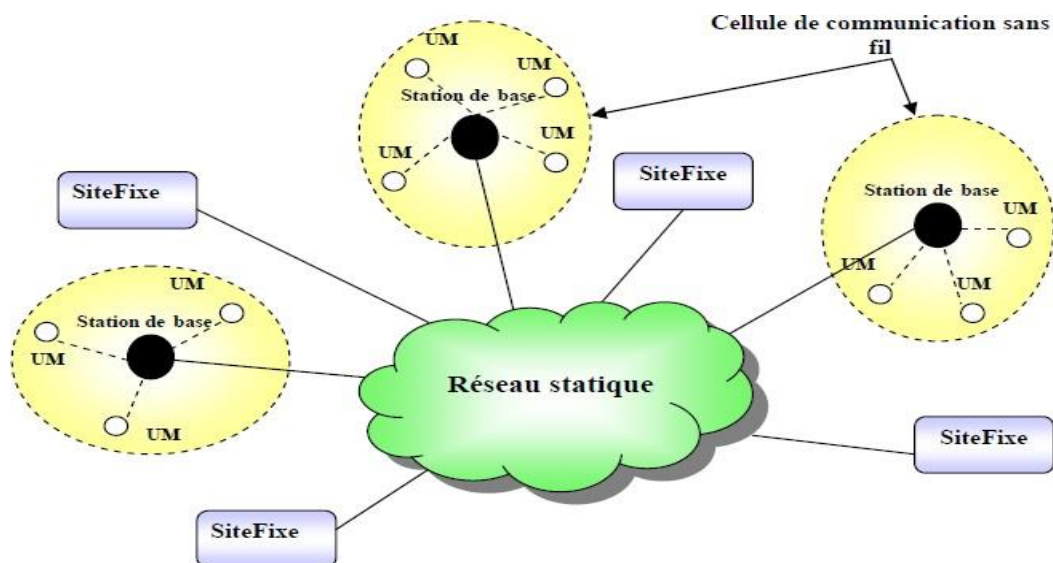


Figure I.7 : Le modèle des réseaux mobiles avec infrastructure [40].

A chaque station de base correspond une cellule à partir de laquelle des unités mobiles peuvent émettre et recevoir des messages. Alors que les sites fixes sont interconnectés entre eux à travers un réseau de communication filaire. Une unité mobile ne peut être, à un instant donné, directement connectée qu'à une seule station de base. Elle peut communiquer avec les autres sites à travers la station à laquelle elle est directement rattachée [35-40].

I.8.2 Réseaux ad hoc (sans infrastructure)

L'évolution récente de la technologie dans le domaine de la communication sans fil et l'apparition des unités de calculs portables (les laptops par exemple), poussent aujourd'hui les chercheurs à faire des efforts afin de réaliser le but des réseaux :

Le concept des réseaux mobiles ad hoc essaie d'étendre les notions de la mobilité à tous les composants de l'environnement.

Ici, contrairement aux réseaux sans fil basés sur les points d'accès (avec infrastructure), aucune

administration centralisée n'est disponible, ce sont les hôtes mobiles elles-mêmes qui forment, d'une manière ad hoc, une infrastructure du réseau. Aucune supposition ou limitation n'est faite sur la taille du réseau ad hoc, le réseau peut contenir des centaines ou des milliers d'unités mobiles.

Les réseaux ad hoc sont idéals pour les applications caractérisées par une absence (ou la non fiabilité) d'une infrastructure préexistante, tel que les applications militaires et les autres applications de tactique comme les opérations de secours (incendies, tremblement de terre...) et les missions d'exploration.

Un réseau ad hoc, connu aussi sous le nom de MANET (Mobile Ad hoc NETWORK), est un réseau dont la topologie ne bénéficie d'aucune infrastructure fixe préexistante ou administration topologie ne bénéficie d'aucune infrastructure fixe préexistante ou administration centralisée.

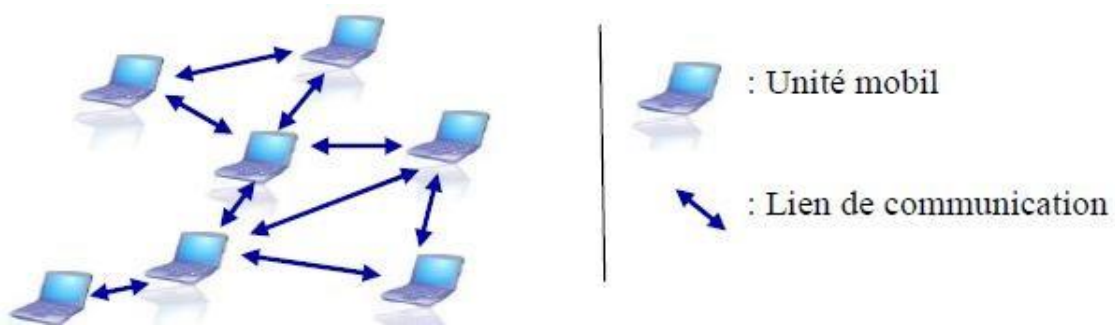


Figure I.8 : Réseau en mode ad hoc [38].

Ici, contrairement aux réseaux basés sur la communication cellulaire, ce sont les unités mobiles elles même qui forment, d'une manière ad hoc, une infrastructure du réseau et en maintiennent la connectivité d'une façon décentralisée. L'information est transmise par l'intermédiaire des mobiles présents.

Un réseau ad hoc est un réseau sans fil auto-configurable. Lorsque deux machines mobiles ou plus se retrouvent dans le même secteur géographique, elles doivent se reconnaître pour pouvoir s'échanger des données. Le réseau doit se configurer automatiquement ; périodiquement ou à la demande pour assurer la liaison entre ces machines [35-40].

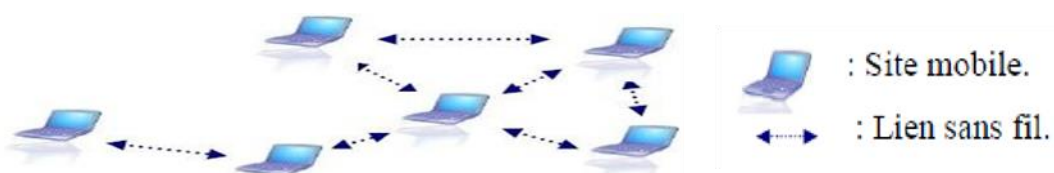


Figure I.9 : La modélisation des réseaux ad hoc [38].

Un réseau ad hoc doit être facilement déployé, les nœuds peuvent rejoindre et quitter le réseau de façon totalement dynamique sans devoir en informer le réseau et si possible sans perturber les communications entre les autres nœuds du réseau.

La topologie des réseaux ad hoc est dynamique et décentralisée. Elle peut changer aléatoirement, et les unités mobiles sont libres de se déplacer arbitrairement. De ce fait, la déconnexion de ces unités est très fréquente [38-40].

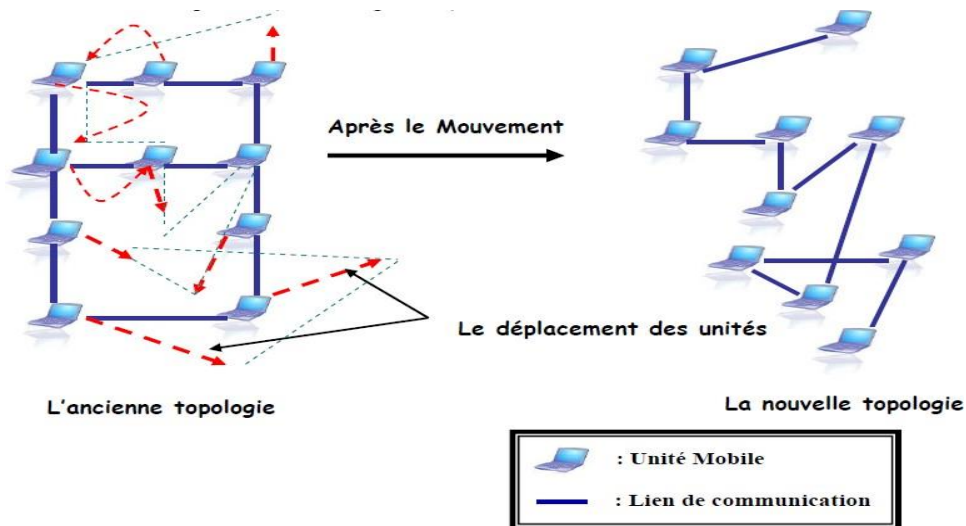


Figure I.10 : Le changement de la topologie des réseaux ad hoc [38].

Dans le cas, le plus compliqué, où une machine voudrait communiquer avec une autre se trouvant hors de portée, chaque nœud du réseau peut alors servir de routeur. Dans l'exemple ci-dessous, la **machine A** veut communiquer avec la **machine C** se trouvant hors de son champ de réception. Pour aboutir, la connexion réseau va donc utiliser la machine B se trouvant à la fois à portée de réception des machines A et C [39]. A partir de cette définition générale, il est intéressant de mettre en avant les caractéristiques principales qui différencient un réseau ad hoc d'un réseau classique.

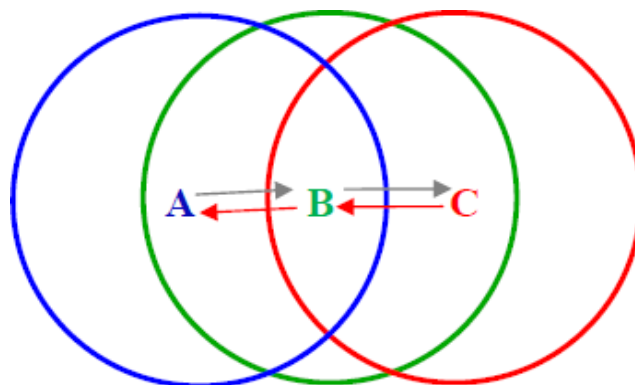


Figure I.11 : Communication entre les nœuds [40].

I.9 Conclusion

Le type d'exemple opposé se produit aujourd'hui dans la téléphonie, où la technologie sans fil (cellulaire) remplace partiellement l'utilisation du réseau téléphonique filaire (en particulier dans les régions du monde où le réseau filaire n'est pas bien développé). Le point de ces exemples est qu'il existe de nombreuses situations dans lesquelles il y a un choix entre les technologies sans fil et filaires, et le choix change souvent lorsque de nouvelles technologies deviennent disponibles.

Dans ce chapitre, nous avons rassemblé les réseaux cellulaires, à la fois parce qu'ils présentent un grand intérêt actuel et aussi ces caractéristiques sont nombreuses qu'autres systèmes sans fil peuvent être facilement comprises comme des cas particuliers ou de simples généralisations des caractéristiques des réseaux cellulaires. Un réseau cellulaire se compose d'un grand nombre d'abonnés sans fil qui ont des téléphones cellulaires (utilisateurs), qui peuvent être utilisés dans les voitures, dans les bâtiments, dans la rue ou presque partout. Il existe également un certain nombre de stations de base fixes, agencées pour assurer la couverture des abonnés.

Enfin, il existe un autre type de réseau de communication, le réseau 5G, qu'il sera le sujet du chapitre 3. Ici, au lieu d'un nœud central (station de base) à travers lequel circule tout le trafic, les nœuds se ressemblent tous. Le réseau s'organise en liens entre différentes paires de nœuds et développe des tables de routage à partir de ces liens. Ici, les problèmes de routage, de diffusion des informations de contrôle, etc. de la couche réseau sont des préoccupations importantes, bien que les problèmes de relais et de coopération distribuée entre les nœuds puissent également être abordés à partir de la couche physique et soient des domaines actifs de la recherche actuelle.

CHAPITRE II : Les réseaux coopératifs sans fil

CHAPITRE II : Les réseaux coopératifs sans fil

II.1 Introduction

Le schéma de codage réseau est un domaine de recherche actif pour les dispositifs coopératifs. En employant un schéma de codage de réseau ; pour indiquer les nœuds ou les messages sources, le paquet transmis devrait avoir des informations supplémentaires à partir desquels il a été combiné. Pour les réseaux sans fil, les faibles exigences en matière de capacité de traitement du signal sont plus appréciées. Dans la couche physique, deux autres types de schémas coopératifs sont principalement utilisés. En utilisant le schéma de décodage et avant ou le schéma d'amplification et de transmission, le nœud de relais retransmet le signal reçu du nœud source au nœud de destination.

II.2 Partie 01: Concepts associés

II.2.1 les topologies des réseaux

Les applications des réseaux sans fil sont diverses [35] et ont été mises en œuvre pour la surveillance environnementale, le suivi de cibles ou le contrôle industriel. Ils ont un grand impact direct sur notre vie. Selon les exigences de l'application, les réseaux sans fil peuvent fonctionner dans l'une des deux topologies de base ou une combinaison des deux en même temps [42-44].

La figure II.1 montre qu'il existe deux topologies de base: la topologie en étoile et la topologie peer-to-peer [38, 45]. Dans la topologie en étoile, le contrôleur principal est représenté par le nœud principal. Tous les autres nœuds sont des nœuds associés qui sont contrôlés et gérés par le nœud principal.

Les nœuds associés communiquent uniquement avec le nœud principal, qui peut transmettre les informations et les messages entre les nœuds principaux autour du réseau. Contrairement à la topologie en étoile, la topologie peer-to-peer fonctionne en mode ad hoc. Un nœud peut communiquer directement avec tous les autres nœuds tant qu'ils sont à portée radio. Les multi-sauts sont autorisés à acheminer les messages entre les nœuds qui ne sont pas dans une plage de sauts. L'extensibilité de la topologie peer-to-peer est meilleure qu'une topologie en étoile. La topologie peer-to-peer a l'avantage d'être implémentée dans des réseaux à plus grande échelle, mais avec un prix de maintenance plus élevé [46].

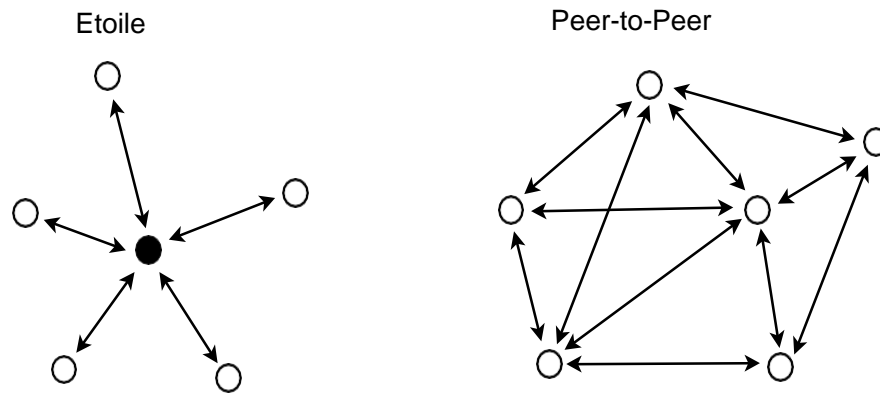


Figure II.1: Topologie en étoile et topologie Peer-to-Peer [46]

Il faut noter que la topologie de cluster qui fonctionne avec une combinaison de topologie en étoile et de topologie peer-to-peer pourrait être un bon choix afin de réduire le coût de la maintenance tout en préservant l'extensibilité du réseau et son efficacité. Dans la topologie de cluster, chaque cluster est une topologie en étoile locale. Le nœud principal de chaque cluster, désigné comme tête de cluster, est responsable de la collecte des informations dans la région locale. Tous les chefs de cluster du réseau pourraient mettre en œuvre une communication d'égal à égal. Les messages sont acheminés entre ces nœuds principaux sur le réseau. En outre, les chefs de groupe pourraient également être organisés en groupes. Cela donne lieu à une topologie de cluster hiérarchique. La figure II.2 montre une topologie de cluster à un niveau où les têtes de cluster fonctionnent à la manière d'égal à égal [46-47].

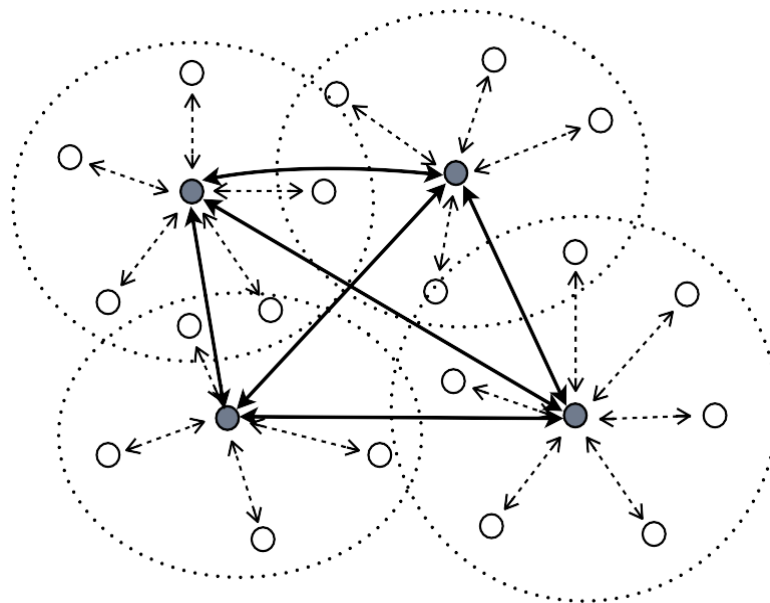


Figure II.2: Topologie de cluster à un niveau [46]

II.2.2 Modèles de canaux sans fil

Le canal de communication sans fil joue un rôle important pour le bon fonctionnement des réseaux sans fil. La conception des piles de protocoles doit prendre en compte les conditions des canaux sans fil. Une condition de canal rigoureuse nécessite que certains schémas compensatoires ou atténuants soient appliqués à différentes couches de protocole. Pour diverses applications, et comme l'environnement pourrait être intérieur ou extérieur, les caractéristiques des canaux sans fil seraient différentes. Le canal de bruit gaussien blanc additif classique (AWGN) est généralement considéré comme une dégradation de base des performances des systèmes de communication. La principale source d'AWGN provient du bruit thermique généré dans le récepteur. De plus, le signal propagé dans les canaux sans fil peut souffrir de deux effets d'évanouissement: un évanouissement à grande échelle et un évanouissement à petite échelle [47]. Ces effets d'évanouissement auraient un impact plus important sur les performances du récepteur.

II.2.2.1 Canal AWGN

Dans les systèmes de communication, l'AWGN est modélisé comme un bruit additif avec une densité spectrale de puissance constante et une distribution d'amplitude gaussienne. La densité spectrale de puissance N_0 est généralement déterminée par la valeur de température T_0 de l'émetteur-récepteur et la constante de Boltzmann $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ Ws/K}$: [47-49].

$$N_0 = k_B T_0 \quad (\text{II.1})$$

Ce modèle mathématique simple donne un aperçu utile du comportement sous-jacent d'un système avant de prendre en compte d'autres phénomènes. Le canal AWGN est un bon modèle pour les satellites et les liaisons de communication dans l'espace lointain. Cependant, ce modèle reste insuffisant pour les liaisons terrestres en raison de l'existence de propagation par trajets multiples, d'obstacles bloquants, d'interférences, et d'autres. Donc, pour la modélisation de canal terrestre, l'AWGN est généralement simulé comme bruit de fond vers le canal en plus d'autres effets d'évanouissement de canal [47-49].

II.2.2.2 Effacement à grande échelle

Les évanouissements à grande échelle sont caractérisés par l'effet de perte de trajet et l'atténuation de puissance moyenne sur le signal propagé. Sur le canal radio, l'effet de perte de trajet exprime que l'atténuation sur la puissance du signal est proportionnelle à la distance de propagation. Dans l'hypothèse idéale du modèle d'espace libre, l'espace entre l'émetteur et le récepteur est supposé être dans la région du champ lointain et être exempt d'objets qui pourraient absorber ou réfléchir le signal. A noter que l'atmosphère dans la région du champ se

comporte comme un milieu uniforme. Ainsi, dans le modèle d'espace libre idéalisé, l'atténuation de la puissance du signal est conforme à une loi du carré inverse. La puissance du signal reçu est donnée par [47]:

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_t G_r \quad (\text{II.2})$$

Où P_t et P_r sont respectivement les puissances émise et reçue, λ est la longueur d'onde, d est la distance de séparation, G_t et G_r sont les gains de puissance des antennes d'émission et de réception respectivement.

Rappelons qu'une région de champ lointain est supposée entre les antennes d'émission et de réception. Dans les réseaux sans fil, cette hypothèse pourrait être satisfaite, car la région de champ lointain est communément reconnue pour exister si la distance d entre les antennes est supérieure à une distance seuil $d_{ff} = \frac{2D^2}{\lambda}$, où D est la dimension maximale d'antenne [46-48].

En règle générale, les fréquences porteuses utilisées dans les nœuds sont 868 MHz, 915 MHz et 2,45 GHz [45]. Les longueurs d'onde correspondantes sont d'environ 34,6 cm, 32,8 cm et 12,2 cm. Pour un nœud de réseau normal avec une taille d'antenne ne dépassant pas quelques centimètres, la distance seuil est inférieure à un mètre. Par conséquent, l'hypothèse du champ lointain est justifiée pour la plupart des déploiements de réseaux sans fil [48].

L'hypothèse selon laquelle le chemin de propagation est exempt d'objets est loin d'être le cas réel. En réalité, les environnements de déploiement des réseaux sans fil sont complexes. Divers objets, comme les plafonds et les murs dans les environnements intérieurs ou les forêts et les bâtiments dans les environnements extérieurs, encombrant le chemin de propagation radio. Ainsi, les statistiques de l'évanouissement à grande échelle devraient considérer non seulement l'effet de perte de chemin, mais aussi l'effet d'évanouissement macroscopique qui peut être représenté par une variation log-normalement distribuée comme décrit dans [48]. Il a la fonction de densité de probabilité (FDP) de:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} e^{-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2}} \quad (\text{II.3})$$

où x est une variable aléatoire en décibels représentant la fluctuation de la puissance du signal à long terme. Les paramètres μ_x et σ_x , également exprimés en décibel, sont respectivement la variance moyenne et standard de x . Une représentation plus complète de l'atténuation des évanouissements à grande échelle est définie comme suit [49]:

$$L_P(d)_{dB} = L_S(d_0)_{dB} + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma(dB)} \quad (\text{II.4})$$

où d_0 correspond à une distance de référence de la région de champ lointain à partir de l'antenne. il est considéré comme 1 m pour le scénario de réseaux sans fil.

$L_S(d_0)$ a la forme de $L_S(d_0) = \frac{P_t}{P_r} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$ en considérant l'équation (II.2) et en supposant la **S 0 Pr** λ les antennes d'émission et de réception doivent être isotropes ($G_t = G_r = 1$). Le facteur de perte de chemin n dépend principalement de l'environnement de déploiement. En espace libre, $n = 2$ comme dans l'équation (II.2). Dans un déploiement réel, n peut varier de 2 à 4 selon une grande variété de conditions de canal. X_{σ} (dB) représente une marge qui capture la fluctuation de la puissance du signal à long terme, qui est liée à σ_x décrite dans l'équation (II.3). Il est noté que cette fluctuation à long terme est différente de l'effet d'évanouissement à court terme qui sera discuté dans la partie suivante. De plus, comme la fluctuation à long terme X_{σ} (dB) est supposée évoluer plus lentement que les évanouissements à court terme, X_{σ} (dB) comme marge de liaison [47] à compenser avant chaque transmission de message. Ce paramètre serait une constante, qui limite la fluctuation réelle à long terme, pendant une période relativement longue.

II.2.2.3 Évanouissement à petite échelle

En plus de l'effet de perte de trajet et de la fluctuation à long terme, le signal reçu sur le canal radio peut présenter une fluctuation rapide du niveau du signal. La fluctuation est due à l'un ou l'autre de deux mécanismes: la variation temporelle du canal et l'étalement temporel du signal. Un comportement variant dans le temps du canal est normalement provoqué par le mouvement des antennes ou par les mouvements d'objets à l'intérieur du canal. Ainsi, pour un signal continu transmis dans le canal, le récepteur détecte des variations d'amplitude et de phase du signal. Ces variations proviennent de la réponse du canal variant dans le temps. Le temps cohérent T_c est une mesure de la durée attendue pendant laquelle la réponse du canal est essentiellement invariante. Selon la vitesse d'évanouissement du canal, cette nature variant dans le temps peut être classée comme évanouissement rapide et évanouissement lent [47-49].

L'étalement temporel du signal survient lorsque le signal propagé passe par différents chemins de propagation et arrive au récepteur à des moments différents. Ce phénomène est très normal pour la communication entre les nœuds. Les objets dans les régions de déploiement des réseaux sans fil provoquent la réflexion de l'onde radio dans différents chemins. Ces signaux reçus par

trajets multiples aboutissent à des combinaisons constructives ou destructives au niveau du récepteur. Selon différentes relations entre le retard de temps maximum et la durée de symbole transmis, l'étalement temporel du signal a un effet d'évanouissement plat ou un effet d'évanouissement sélectif en fréquence. Ils seront examinés ci-après [47-50].

II.2.2.3.1 Effet de fondu plat

En retard par trajets multiples, le temps de retard maximal T_m fait référence à un retard maximal pour lequel le profil de retard est supérieur à une puissance seuil. Si T_m est inférieur à un intervalle de symboles T_s , on dit que le canal de dégradation présente un évanouissement plat. Le signal reçu est composé de multiples composants réfléchissants arrivant dans l'intervalle de temps de symbole. Puisqu'aucun chevauchement significatif entre les symboles voisins n'est généré, le canal n'induit pas de distorsion inter-symboles (ISI) dans ce cas [50].

Selon la contribution de différents types de composants à trajets multiples, l'effet d'évanouissement plat peut être principalement caractérisé comme un évanouissement de Rician ou un évanouissement de Rayleigh. Pour le canal d'évanouissement de Rician, il existe un composant de ligne de visée important en plus de plusieurs composants réfléchissants. L'amplitude de l'enveloppe a un pdf de Rician. Lorsque le composant de ligne de visée approche les zéros, le pdf de Rician tend vers le pdf de Rayleigh qui peut être exprimé comme: [50]

$$P_r = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{II.5})$$

Où r est la variable aléatoire représentant l'amplitude de l'enveloppe du signal reçu, $2\sigma^2$ est la puissance moyenne des signaux à trajets multiples. Pour plus de simplicité, le canal d'évanouissement de Rayleigh peut être modélisé comme une variable complexe $\mathbf{a} \cdot \mathbf{e}^{j\theta}$ montrant les éléments de gain et de phase. Dans ce cas, le canal d'évanouissement de Rayleigh est présenté par l'hypothèse que les parties réelle et imaginaire sont modélisées par des distributions gaussiennes indépendantes et identiques de moyenne nulle avec une variance de σ^2 [50-51].

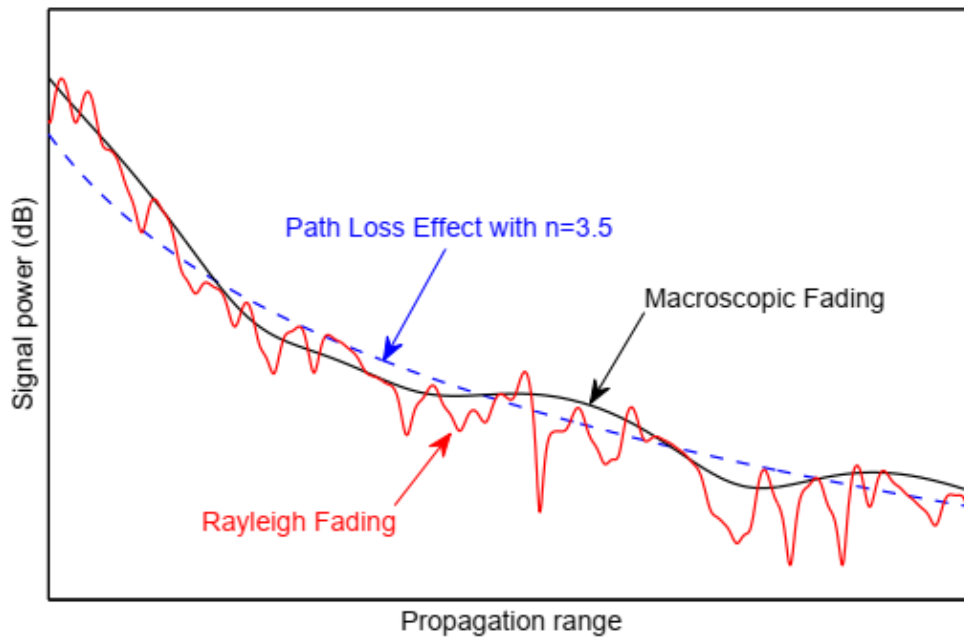


Figure II.3: Expositions de canal: effet de perte de chemin avec $n = 3,5$, évanouissement macroscopique avec $\sigma_x^2 = 8dB$ et évanouissement de Rayleigh [51].

Lorsque l'effet d'évanouissement plat, le canal d'évanouissement de Rayleigh est presque superposé. C'est un modèle raisonnable lorsque de nombreux objets existent dans l'environnement diffusant le signal radio avant qu'il n'arrive au récepteur. De plus, la radio de propagation sur une grande zone sur une région de champ lointain subit les deux types d'évanouissements à petite et à grande échelle. Il est montré à titre d'exemple sur la Figure II.3 où un évanouissement à petite échelle de l'effet d'évanouissement de Rayleigh est superposé à un évanouissement à grande échelle de la perte de trajet et des effets d'évanouissement macroscopiques [51].

II.2.2.3.2 Effet de fondu sélectif en fréquence

Un canal est dit sélectif en fréquence si $T_m > T_S$. Dans ce cas, toutes les composantes à trajets multiples du signal reçu arrivent pendant une durée s'étendant au-delà du temps de symbole T_S . Une caractérisation intuitive de l'évanouissement sélectif en fréquence peut être exprimée dans le domaine fréquentiel en utilisant la terminologie de la largeur de bande cohérente f_0 , qui présente une mesure statique de la plage de fréquences sur laquelle les réponses des canaux aux composantes du signal ont un gain et une rotation de phase approximativement égaux. Ainsi, dans la plage d'une largeur de bande cohérente, les composantes spectrales du signal présentent un effet d'évanouissement plat comme décrit dans la sous-section précédente. On dit qu'un signal souffrant d'un évanouissement sélectif en fréquence a une plage de composantes spectrales plus grande que la largeur de bande de cohérence du canal [51-52].

A notez que f_0 et T_m sont réciproquement liés par l'approximation de $f_0 \approx 1/T_m$.

II.2.3 Capacité et performances

II.2.3.1 Capacité de canal

Dans la communication sans fil, la capacité du canal fournit une vision théorique de la limite de performance qu'un système peut atteindre. Shannon [50] a défini la capacité du canal comme l'information mutuelle maximale sur toutes les distributions d'entrée possibles. Plus précisément, il fournit une limite supérieure la plus étroite sur la quantité d'informations qui peuvent être transmises de manière fiable à travers le canal. Compte tenu d'un canal sans fil à bande limitée avec une capacité C , il est théoriquement possible d'obtenir une transmission fiable ou sans erreur avec un débit d'information R inférieur à C . Par contre, si $R > C$, la transmission fiable n'est pas possible [50-51].

Quelle que soit la technologie de traitement du signal ou le code de contrôle d'erreur. Faire approcher cette limite théorique est pratiquement difficile pour les réseaux sans fil où les nœuds fonctionnent à des niveaux de puissance inférieurs et ont une capacité de traitement de signal limitée. Cependant, il fournit un indice sur la conception de protocoles coopératifs cadres de communication entre les nœuds [50-51].

Le théorème de Shannon-Hartley stipule que le canal brouillé par AWGN a une capacité de canal C donnée par [47]:

$$C = \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right) \text{ bps/Hz} \quad (\text{II.6})$$

Où S est la puissance d'émission moyenne du signal, N est la puissance moyenne du bruit. L'équation (II.6) montre que la capacité de canal disponible du canal AWGN est dans une augmentation logarithmique avec le rapport signal sur bruit (SNR) reçu.

Contrairement au canal AWGN, les évanouissements à grande échelle et à petite échelle sont plus courants dans les réseaux sans fil. Les effets d'évanouissement réduiront le SNR reçu et réduiront donc la capacité de canal disponible. Le codage spatio-temporel coopératif et les schémas de relais coopératifs, qui seront étudiés en détail dans les chapitres suivants, sont des solutions prometteuses pour surmonter ces effets d'évanouissement. La construction du schéma coopératif signifie qu'un choix de canaux à entrer unique-multi-sortie (SIMO), multi entrée sortie unique (MISO) et multi-entrée-multi-sortie (MIMO) sera établi parmi les nœuds [51].

Dans un cas plus général, il est considéré que la capacité des canaux MIMO qui sont couverts par les antennes d'émission MT et les antennes de réception MR . La matrice de canal $MR \times MT$ est désignée par:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1M_T} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2M_T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M_R1} & h_{M_R2} & \dots & h_{M_RM_T} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

où chaque composante $h_{i,j}$ pour la paire d'antennes d'émission et de réception est supposée être une variable aléatoire gaussienne complexe de moyenne nulle (c'est-à-dire que $|h_{i,j}|$ a une distribution de Rayleigh). Ensuite, le signal reçu en bande de base y (vecteur $M_R \times 1$) peut être modélisé comme [50-51] :

$$y = Hx + n \quad (\text{II.8})$$

où $x \in \mathbb{C}^{M_T \times 1}$ est le vecteur du signal de transmission, $n \in \mathbb{C}^{M_R \times 1}$ est le bruit gaussien complexe symétrique circulairement à moyenne nulle (ZMCSCG) avec matrice de covariance $E[nn^H] = NI_{M_R}$.

En considérant une matrice de canal fixe H , la capacité du canal MIMO peut être dérivé pour être:

$$C = \log_2 \det \left(I_{M_n} + \frac{H A_S H^H}{N} \right) \quad (\text{II.9})$$

où $A_S = E[xx^H]$ est une matrice diagonale représentant la covariance du mot de code.

Pour un système de communication avec une puissance d'émission totale disponible comme $\text{tr}(A_S) = S$ (où $\text{tr}(\cdot)$ désigne l'opérateur de trace) et la fraction de la puissance d'émission totale allouée à la $i^{\text{ème}}$ antenne d'émission comme ε_i , la capacité du canal dans l'équation (II.9) peut être réécrit comme:

$$C = \sum_{i=1}^{M_T} \log_2 \left(1 + \varepsilon_i \lambda_i \frac{S}{N} \right) \quad (\text{II.10})$$

où λ_i est une valeur propre positive de $H^H H$. On note que la capacité exprimée dans les équations (II.9) et (II.10) se réfère à la capacité instantanée dans le canal d'évanouissement. Ils n'ont aucune signification au sens Shannon où le mot de code a une durée infinie.

Si λ_i varie sur un mot de code transmis avec une durée infinie mais que tous ses moments sont constants, alors le canal est appelé canal ergodique. En supposant que le mot de code transmis soit distribué **ZMCSCG**, la capacité du canal MIMO ergodique peut être maximisée comme suit:

$$C = E(\log_2 \det(I_{M_R} + \frac{HH^H S}{M_T N})) \quad (\text{II.11})$$

Avec les paramètres définis $m = \Delta \min \{M, M\}$ et $n = \max \{M_R T, M_R\}$, l'expression dans l'équation (II.11) peut également être évaluée comme [10]:

$$C = E_{\vec{\lambda}}[\sum_{i=1}^m \log_2(\frac{\lambda_i S}{M_T N})] \quad (\text{II.12})$$

où $\vec{\lambda} = (\lambda_1, \lambda_2 \cdots \lambda_m)$ est les valeurs propres ordonnées [51]:

$$pdf_{\lambda}(\vec{\lambda}) = \frac{1}{K_{mn}} \prod_i (e^{-\lambda_i} \lambda_i^{n-m}) \prod_{i>j} (\lambda_i - \lambda_j)^2 \quad (\text{II.13})$$

où K_{mn} est un facteur de normalisation. Par conséquent, l'équation (II.12) se transforme en:

$$C = \int \dots_{\vec{\lambda}} \int \sum_{i=1}^m \log_2(1 + \frac{\lambda_i S}{M_T N}) \cdot pdf_{\lambda}(\vec{\lambda}) d\vec{\lambda} \quad (\text{II.14})$$

Après quelques manipulations algébriques comme montré dans [10-12], un repère de la capacité ergodique MIMO peut être exprimé comme suit:

$$C = \int_0^{\infty} m \log_2 \left(1 + \frac{\lambda S}{M_T N} \right) \frac{1}{m} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{k!}{(k+n-m)} [L_k^{n-m}(\lambda)]^2 \lambda^{n-m} e^{-\lambda} d\lambda \quad (\text{II.15})$$

où $L_k^{n-m}(\lambda)$ est le polynôme de Laguerre associé d'ordre k. Cette forme intégrale de la capacité a été étendue à une forme fermée explicite comme [52]:

avec $Ei(\zeta) = \int_{-\infty}^{\zeta} \frac{e^t}{t} dt$ est une intégrale exponentielle typique. En considérant le système MISO avec $M_R = 1$, la capacité dans l'équation (II.16) peut être exprimée en un simple forme comme [50-52] :

$$C = \hat{C}_{M_T-1}(\frac{1}{M_T} \frac{S}{N}) / \Gamma(M_T) \quad (\text{II.18})$$

Alors que pour le système SIMO avec $M_T = 1$, la capacité peut être exprimée comme:

$$C = \hat{C}_{M_R-1}(\frac{S}{N}) / \Gamma(M_R) \quad (\text{II.19})$$

Où $\Gamma(n) = (n - 1)!$ de n est un entier. La capacité du canal d'évanouissement de Rayleigh est présentée pour divers systèmes comme le montre la Figure II.4. Il est intéressant de comparer les systèmes 2×2 , 1×4 et 4×1 . Pour chacun de ces cas, il existe quatre liens d'évanouissement Rayleigh indépendants. Le système 2×2 montre une capacité plus élevée à un SNR supérieur à 8 dB, tandis que le système 1×4 obtient un meilleur gain de capacité dans la région à faible SNR [51].

En outre, l'augmentation du nombre d'antennes de réception dans le système SIMO permet d'obtenir plus de gain de capacité que l'augmentation du nombre d'antennes d'émission dans le système MISO. Cela peut être montré plus clairement dans la Figure II.5. La capacité sature le plus rapidement dans le système MISO. Il semble que plus de deux antennes d'émission ne soient pas nécessaires du point de vue de l'obtention d'un gain de capacité dans le canal d'évanouissement ergodique de Rayleigh [51-54].

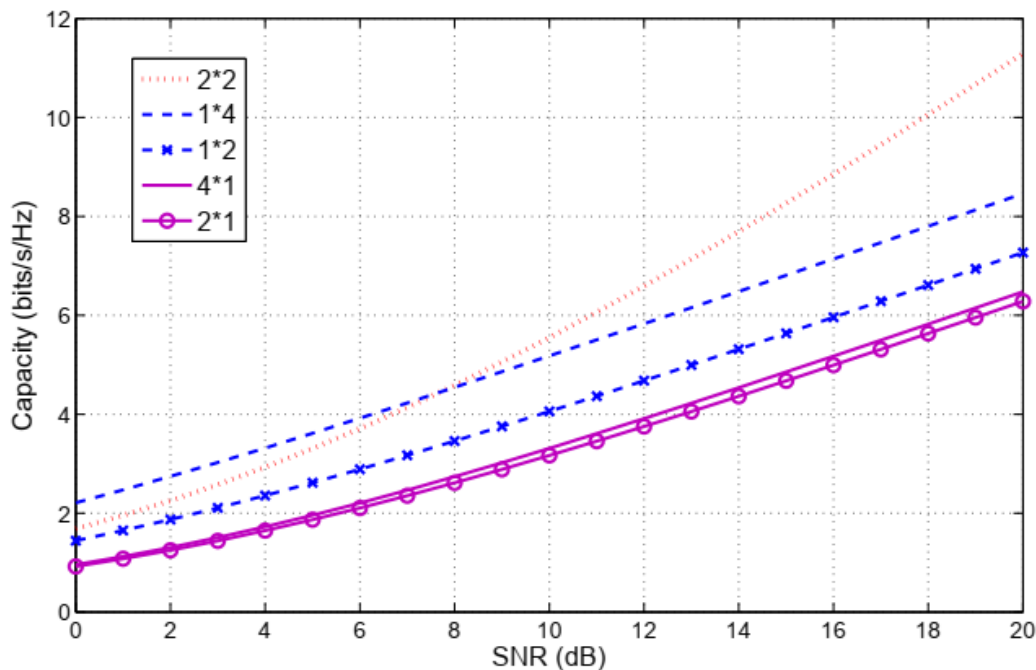


Figure II.4: Capacité par rapport au SNR pour divers systèmes dans le canal à évanouissement Rayleigh [53].

Si la puissance d'émission totale disponible pour le système MISO est limitée, et d'avoir utilisé plus d'antennes d'émission semble un gaspillage de ressources dans la perspective d'obtenir une plus grande capacité de canal. Par conséquent, un système de communication avec plusieurs antennes de réception réalise un gain de capacité plus important qu'avec de multiples antennes de transmission. Mais il faut mentionner que, dans ces cas de figures, la puissance d'émission au niveau de chaque antenne du système MISO (M antennes d'émission) est divisée par M par rapport au système SIMO correspondant (M antennes de réception) [51-53].

II.2.3.2 Probabilité de panne

Le canal d'évanouissement ergodique signifie que tous les états de canal sont réalisés sur une séquence infinie. En pratique, il est plus raisonnable de supposer que la réalisation du canal est fixée aléatoirement pour une séquence finie et qui change ses états pour les autres séquences. Dans ce cas précis, il est important que pour chaque réalisation de canal, si cette transmission peut être supportée par un débit de communication donné [53].

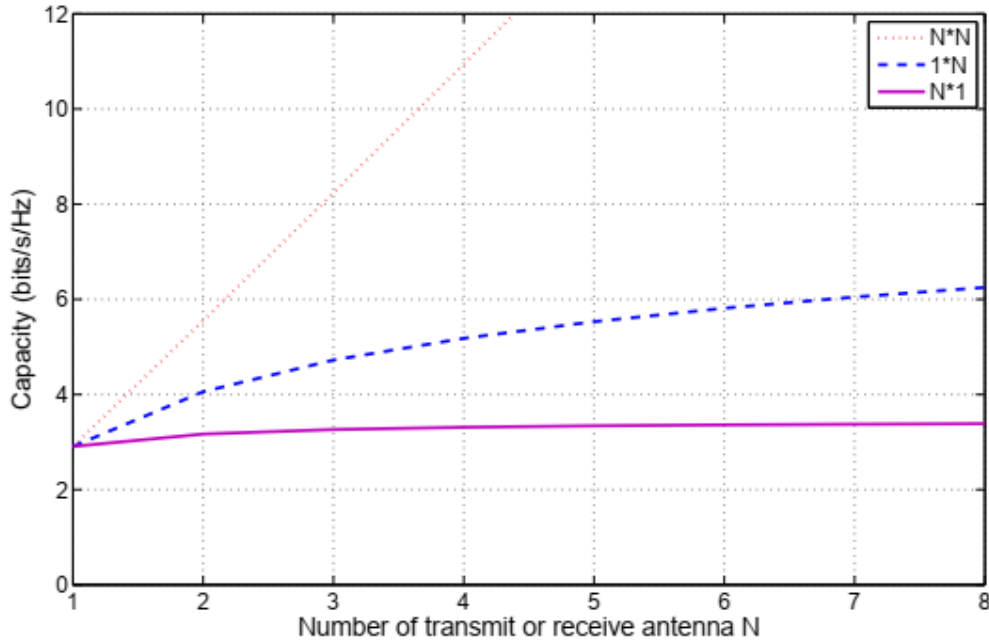


Figure II.5: Capacité Vs Nombre d'antennes d'émission ou de réception pour divers systèmes dans le canal à évanouissements de Rayleigh; SNR = 10 dB [53].

La probabilité de panne est utilisée pour indiquer la probabilité qu'un certain débit de communication puisse être pris en charge par les réalisations de canal. Pour un débit de communication R donné, l'expression de la probabilité de panne peut être donnée comme [52]:

$$P_{out}(R) = P_r(\log_2 \det(I_{M_T} + \frac{H H^H S}{M_T N}) < R) \quad (II.20)$$

Qui peut aussi s'écrire:

$$P_{out}(R) = P_r(\sum_{i=1}^m \log_2(1 + \frac{\lambda_i S}{M_T N}) < R) \quad (II.21)$$

Cela nécessite le calcul d'une intégrale m fois sur le λ_i aléatoire avec la fonction de distribution de probabilité donnée par l'équation (II.13). Pour le cas particulier du canal d'évanouissement MISO Rayleigh, la solution peut être exprimée par [12-13]:

$$P_{out,MT \times 1}(R) = \gamma(M_T, \frac{M_T(2^R-1)}{S/N}) / \Gamma(M_T) \quad (\text{II.22})$$

Où $\gamma(\cdot)$ est la fonction Gamma incomplète inférieure définie comme:

$$\gamma(a, x) = \int_0^x u^{a-1} e^{-u} du \quad (\text{II.23})$$

Dans la Figure II.6 et la Figure II.7, la performance de la probabilité de panne dans le système MISO a été montrée et détaillée. En considérant les cas où le débit de communication souhaité est respectivement de 1 bit / s / Hz et 2 bits / s / Hz, il est intéressant de noter que les points d'intersection dans les deux cas se situent autour du SNR de 0 dB et 5 dB respectivement. Comme le montre la Figure II.4, ces régions coïncident également avec la capacité du canal à environ 1 bit / s / Hz et 2 bits / s / Hz. Par conséquent, à un SNR spécifique, des antennes de transmission plus engagées ne peuvent pas augmenter sensiblement la capacité de canal mais peuvent diminuer la probabilité de panne lorsque le débit de communication est inférieur à la capacité de canal réalisable. Ceci est illustré à la Figure II.7 où ils ont trouvé que le SNR est de 5 dB. Lorsque le débit de communication souhaité est inférieur à environ 2 bits / s / Hz, des antennes de transmission plus engagées réduisent considérablement la probabilité de panne. La discussion sur la diversité et les gains du multiplexage dans la prochaine sous-section peut encore renforcer ces déclarations. [51-53].

II.2.3.3 Diversité et multiplexage

Les liaisons sans fil sont altérées par des fluctuations aléatoires dans l'espace, le temps et la fréquence sont appelées évanouissements. La diversité fournit au récepteur plusieurs regards sur le même signal transmis afin d'améliorer la fiabilité des liaisons sans fil. Il est basé sur le principe que le récepteur reçoit plusieurs répliques atténuées indépendamment du même signal d'information, de sorte que la probabilité que toutes les composantes du signal soient simultanément atténuées est réduite. Ainsi, les techniques de diversité stabilisent les liaisons sans fil et conduisent à une amélioration de la fiabilité [50-52].

À titre d'exemple, les signaux de modulation par déplacement de phase binaire (BPSK) non codés sur le canal à évanouissements de Rayleigh. Dans le cas de la communication SISO, la probabilité d'erreur sur les bits reçus (BER) à un SNR élevé est bien connue [47-49] :

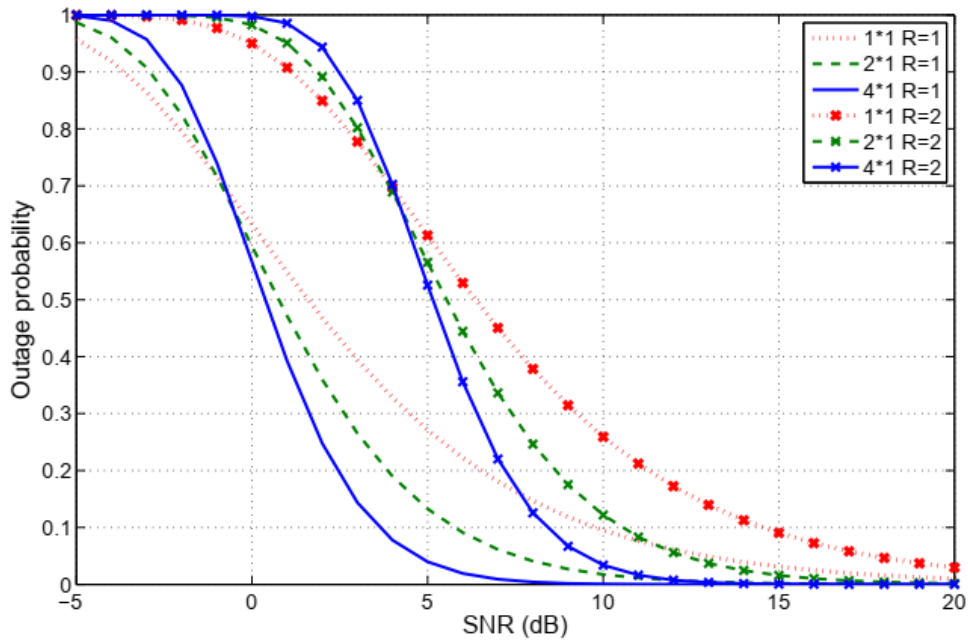


Figure II.6: Probabilité de panne par rapport au SNR dans le système MISO, les débits de communication souhaités sont respectivement $R = 1 \text{ bit} / \text{s} / \text{Hz}$ et $R = 2 \text{ bits} / \text{s} / \text{Hz}$ [53].

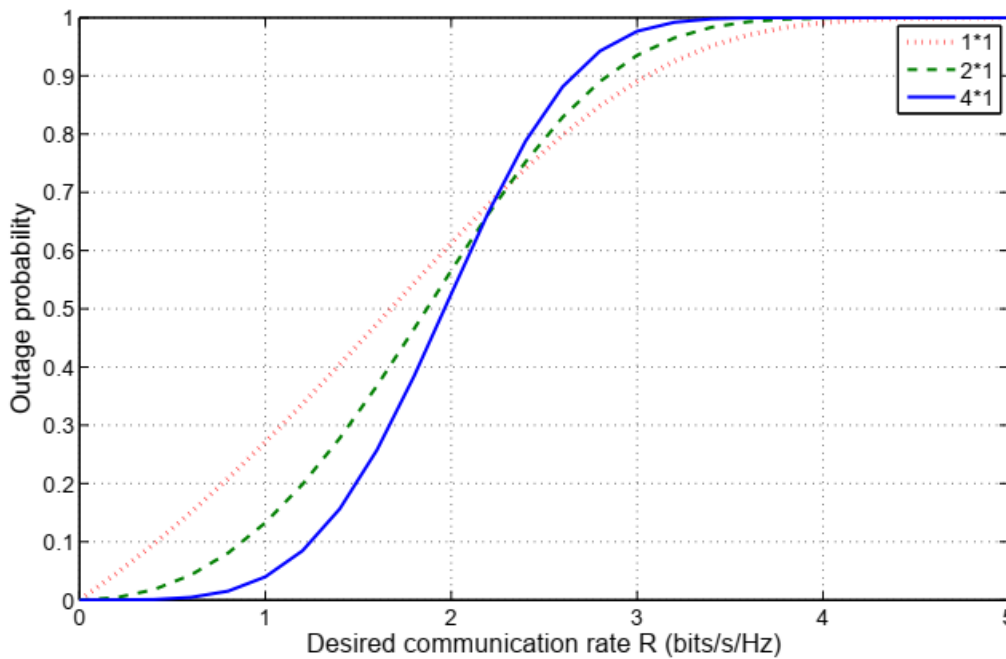


Figure II.7: Probabilité de panne par rapport au débit de communication souhaité dans le système MISO, $\text{SNR} = 5 \text{ dB}$ [53].

$$P_e(\text{SNR}) \approx \frac{1}{4} \text{SNR}^{-1} \quad (\text{II.24})$$

En revanche, en supposant que deux répliques du signal évanoui indépendamment soient reçues et correctement combinées (par exemple, combinaison de rapport maximum), la probabilité d'erreur dans la région de SNR élevé est:

$$P_e(SNR) \approx \frac{3}{16} SNR^{-2} \quad (\text{II.25})$$

Il est observé qu'en ayant l'antenne de réception supplémentaire, la probabilité d'erreur diminue avec SNR à une vitesse plus rapide de SNR⁻². Des résultats similaires peuvent être obtenus même si les signaux BPSK en d'autres constellations ont changé. Depuis le gain de performance à haut SNR région est indiqué par l'exposant SNR comme indiqué dans les équations (II.24) et (II.25), cet exposant est appelé le gain de diversité. Ainsi, la définition du gain de diversité d peut être représentée par [53-54]:

$$d = - \lim_{SNR \rightarrow \infty} \left(\frac{\log(P_e(SNR))}{\log(SNR)} \right) \quad (\text{II.26})$$

Intuitivement, il correspond au nombre de chemins d'évanouissement indépendants traversés par le signal. Dans un système général avec des antennes d'émission M_T et des antennes de réception M_R , il existe au total des facteurs d'évanouissement aléatoire $M_T \times M_R$. Par conséquent, le gain de diversité maximal (complet) fourni par le canal est $M_T \times M_R$. Des schémas coopératifs explorant la diversité spatiale du canal peuvent être utilisés pour améliorer la fiabilité des liaisons sans fil [53].

En plus de fournir une diversité pour améliorer la fiabilité, un système à antennes multiples prend également en charge un débit de données plus élevé qu'un système à antenne unique. Considérant un canal à évanouissement plat ergodique, où la matrice de canal est i.i.d. à travers les blocs de message, la capacité dans l'équation (II.11) peut être approximée comme [53]:

$$C(SNR) = \min\{M_T, M_R\} \log \frac{SNR}{M_T} + \sum_{i=|\min\{M_T, M_R\}|+1}^{\max\{M_T, M_R\}} \varepsilon[\log \chi_{2i}^2] + o(1) \quad (\text{II.27})$$

Où χ^2 est le chi carré distribué avec $2i$ degrés de liberté. Ainsi, dans une région SNR élevée, le nombre de degrés de liberté est le minimum de M_T et M_R . Cela suggère que le canal MIMO peut être considéré comme des canaux spatiaux parallèles $\min\{M_T, M_R\}$. Notez que la capacité du canal augmente avec le SNR comme indiqué dans l'équation (II.27). Donc, un ensemble de codes dont le débit de communication $R(SNR)$ (bps / Hz) augmente également avec le niveau SNR. Le gain de multiplexage spatial r peut être défini comme: [53-54].

$$r = \lim_{SNR \rightarrow \infty} \left(\frac{R(SNR)}{\log_2(SNR)} \right) \quad (\text{II.28})$$

Cela signifie que des symboles d'information indépendants pourraient être transmis simultanément dans ces r canaux parallèles. Ainsi, le gain de multiplexage offre un débit de communication plus élevé.

II.2.4 Communication à bande étroite et large bande

Dans la discussion précédente sur les canaux sans fil, le signal souffrira d'un évanouissement sélectif en fréquence si sa bande passante dépasse la bande passante cohérente du canal. Dans les réseaux sans fil, le débit des données de communication est inférieur à celui des autres réseaux sans fil utilisant la technologie Wi-Fi. Ainsi, la bande passante dans les réseaux sans fil est généralement dans une situation à bande étroite. Pendant ce temps, la propagation du retard des canaux sans fil est normalement à l'échelle nanométrique. Cela implique que, pour les réseaux sans fil, la communication souffre dans la plupart des cas [55].

Bien que la communication à bande étroite puisse éviter l'effet d'évanouissement sélectif en fréquence dans la plupart des canaux, certaines liaisons de communication utilisent délibérément une bande passante plus large que nécessaire afin d'obtenir d'autres avantages. Le système à spectre étalé en est un exemple typique. D'une part, en diffusant le message original avec un spectre plus large, les interférences avec d'autres communications peuvent être réduites. D'autre part, un système CDMA utilisant la technologie à spectre étalé permet à plusieurs utilisateurs d'être multiplexés sur le même canal physique. L'OFDM devient également un système populaire de communication large bande. Le principal avantage de l'OFDM est sa capacité à surmonter les interférences à bande étroite et les évanouissements sélectifs en fréquence dus à la propagation par trajets multiples. La communication large bande peut donc parfois être intéressante pour les réseaux sans fil. [48-50].

L'utilisation d'une communication à bande étroite ou l'exploration d'une bande plus large, comme le système à spectre étalé et le système OFDM, peuvent faciliter la communication coopérative. De ce point de vue, on remarque que la communication à bande étroite présente l'avantage d'une moindre complexité pour la mise en œuvre, alors qu'elle est vulnérable aux erreurs de synchronisation temporelle entre les nœuds coopératifs. D'autre part, l'exploration des systèmes à bande plus large mentionnés précédemment à l'avantage de tolérer un retard de trajets multiples ou une erreur de synchronisation temporelle. Mais ils nécessitent une complexité plus élevée au niveau du traitement du signal en bande de base. De plus, le problème de synchronisation de fréquence ne doit pas être ignoré pour le système OFDM. [52-56].

II.3 Partie 02: Communication coopérative dans les réseaux sans fil

II.3.1 Présentation

Les réseaux sans fil sont généralement déployés dans un environnement rigoureux où les canaux de communication souffrent d'ombrage et d'évanouissement par trajets multiples. Les nœuds étant généralement limités en puissance et en taille limitée, les systèmes multi-antennes ne peuvent pas être mis en œuvre dans ces minuscules nœuds. Les communications coopératives exploitant la diversité des canaux d'évanouissement pourraient être intéressantes pour les réseaux sans fil. Il permet de garantir une communication fiable et de maintenir une bonne connectivité du réseau. En outre, la diversité des canaux peut être explorée dans les domaines spatiaux et fréquentiels. Les résultats expérimentaux montrent que des bénéfices significatifs peuvent être trouvés lorsque la séparation entre les fréquences porteuses ou l'espace entre les antennes est suffisante. Pendant ce temps, des schémas coopératifs pourraient être appliqués à différentes couches de protocole, telles que la couche réseau et la couche physique [54-56].

Le message de transmission sera d'abord codé par un type de code spatio-temporel au niveau de chaque nœud coopératif. Des copies redondantes du flux de données, transmises au récepteur, sont dans l'espoir qu'au moins certaines d'entre elles puissent survivre aux chemins évanouis entre les émetteurs et le récepteur. Le schéma coopératif virtuel MISO peut être intégré au schéma de modulation OFDM pour surmonter le problème de synchronisation temporelle pour les nœuds distribués. Il est donc appelé un schéma coopératif basé sur l'OFDM [56-58].

II.3.2 Schéma de codage du réseau

Lors de l'utilisation du codage réseau pendant la communication de données, au lieu de renvoyer les paquets originaux, les nœuds peuvent recombinaison plusieurs paquets d'entrée en un ou plusieurs paquets de sortie combinés. La combinaison peut être faite sur des flux binaires ou sur des symboles modulés analogiques. Il est appelé respectivement schémas de codage de réseau numérique et schémas de codage de réseau analogique [63].

Un exemple simple avec deux nœuds sans fil (A et B) échangeant des messages via un nœud de routeur (R), comme le montre la figure II.1, peut être utilisé pour expliquer le principe de base du codage de réseau. Étant donné qu'un seul canal est utilisé, les interférences de signal doivent être évitées dans la méthode traditionnelle. Ainsi, l'échange de messages entre les deux nœuds A et B nécessite quatre intervalles de temps, où les deux premiers intervalles de temps sont alloués pour la collecte de messages et les deux derniers intervalles de temps sont pour la

distribution des messages. Semblable à la méthode traditionnelle, deux intervalles de temps sont nécessaires pour la collecte de messages dans un schéma de codage de réseau numérique. Au contraire, le schéma de codage de réseau numérique ne diffuse que la combinaison de $[a \times$ ou $b]$, de sorte qu'un seul intervalle de temps est nécessaire pour la distribution des messages. Puisque les nœuds A et B connaissent déjà respectivement les messages a et b, ils peuvent obtenir le message b de $[a \text{ xor } (a \text{ xor } b)]$ et le message a de $[b \text{ xor } (a \text{ xor } b)]$. Il convient de mentionner que tout nœud qui souhaite récupérer le message d'origine doit être capable de recevoir suffisamment de messages combinés indépendants [62-64].

Les travaux dans [56, 57] ont montré qu'au lieu d'implémenter le codage réseau sur des trains de bits numériques, on peut également l'implémenter sur des symboles modulés analogiques. La figure II.8 montre le schéma de codage du réseau analogique où $f(a, b)$ fait référence à la combinaison de (a et b) au niveau du symbole analogique. Le schéma de codage de réseau analogique pourrait obtenir plus de gain de débit de réseau, comme illustré à la figure II.8, où seuls deux intervalles de temps sont nécessaires pour l'échange de messages.

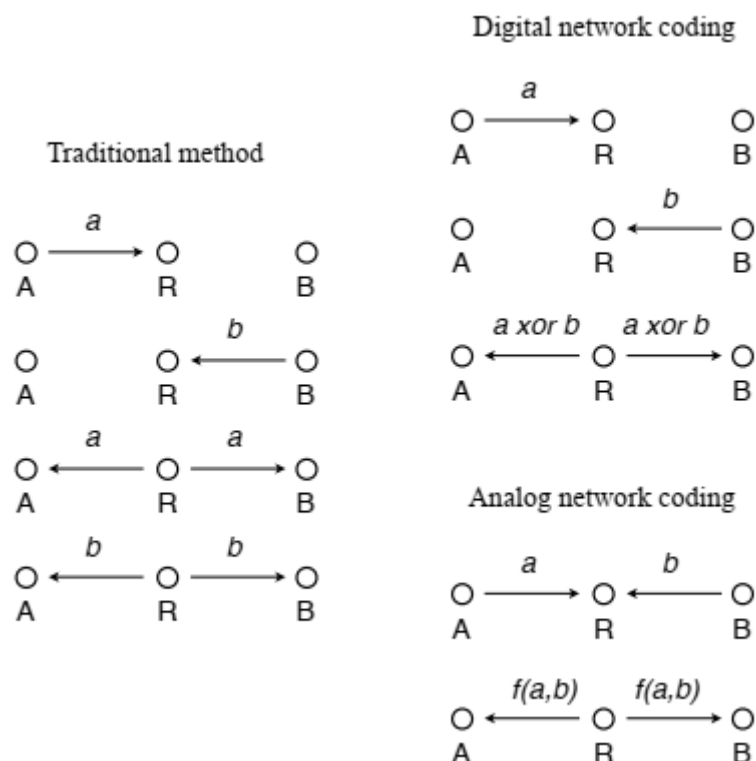


Figure II.8: Exemples d'échange de messages utilisant la méthode traditionnelle, le schéma de codage de réseau numérique et le schéma de codage de réseau analogique [62].

L'algorithme de [66] suppose que la synchronisation du temps au niveau du symbole, la synchronisation de la phase de la porteuse et le contrôle de la puissance entre les nœuds sont

parfaits. Par conséquent, les signaux émis simultanément par A et B arrivent à R avec la même phase et amplitude. Ensuite, les signaux en bande de base combinés passeront par un mappage de démodulation / modulation spécial pour obtenir un train binaire équivalent à la combinaison utilisée dans le schéma de codage de réseau numérique. Compte tenu de la modulation BPSK, le tableau de mappage peut être illustré sur le Tableau II.1 Les mappages de modulation à A et B dans le premier intervalle de temps et à R dans le deuxième intervalle de temps sont les mêmes que pour la modulation BPSK, tandis que le mappage de démodulation à R est effectué de manière similaire à l'opération xor, à la différence qu'il est estimé sur le décision douce. Les processus de décodage en A et B sont les mêmes que le schéma de codage de réseau numérique. Cependant, l'exigence de synchronisation ajoutera plus de contraintes sur le déploiement ou introduira plus de consommation d'énergie [63].

Tableau II.1: Cartographie de la modulation et de la démodulation

Cartographie de la modulation en A et B				Cartographie de démodulation à R		
				entrée	sortie	
entrée	sortie			Cartographie de démodulation à R		
				entrée	sortie	
1	1	1	1	2	0	-1
0	1	-1	1	0	1	1
1	0	1	-1	0	1	1
0	0	-1	-1	2	0	-1

Dans [57-58], les auteurs ont présenté un algorithme plus général qui ne fait aucune hypothèse de synchronisation. En fait, un retard aléatoire de la transmission dans la première tranche de temps en A et B a été intentionnellement introduit. Le nœud de relais R ne prend aucune décision sur les signaux de réception, il amplifie simplement et transmet les signaux. En raison du retard intentionnel supplémentaire, les signaux reçus aux nœuds A et B auront des symboles sans interférence à la tête et à la queue de la trame.

Dans la deuxième tranche de temps, ces symboles sans interférence sont utilisés pour estimer les canaux sans fil. En utilisant les informations de canal et en s'auto-annulant avec les signaux déjà connus, la trame reçue pourrait être correctement décodée. Il est noté que l'exigence de capacité de traitement du signal doit être prise en compte lorsque le schéma de codage de réseau analogique est mis en œuvre dans la couche physique [60-62].

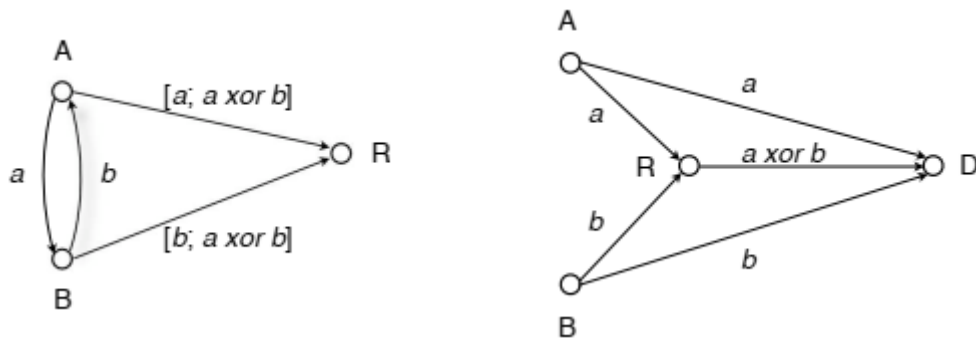


Figure II.9: Deux paradigmes coopératifs simples utilisant un schéma de codage de réseau [63].

En plus de l'échange de messages, des schémas de codage de réseau peuvent également être incorporés à des schémas coopératifs dans la couche physique. Deux paradigmes coopératifs simples mettant en œuvre le codage de réseau numérique, où l'opération de combinaison est également définie comme xor, sont illustrés à la figure II.9. Les paradigmes coopératifs comprennent le processus coopératif virtuel MISO et le processus de relais coopératif qui seront illustrés dans les sections suivantes. Dans ces paradigmes, le message combiné numérique supplémentaire ($a \text{ x } b$), au lieu du seul message a ou b , sera transmis. Dans ce cas, un gain de diversité coopérative pourrait également être obtenu.

Les travaux de [63] ont montré qu'un schéma de codage de réseau pourrait améliorer les performances de panne de la communication coopérative. En outre, comme les avantages du schéma de codage de réseau sont d'augmenter le débit du réseau sur la couche réseau, il est également raisonnable d'obtenir un gain de débit de réseau en incorporant la communication coopérative avec le schéma de codage de réseau.

II.3.3 Schéma de relais coopératif

La transmission multi-sauts est un schéma traditionnel de communication longue distance dans les réseaux sans fil. Sur la base de ce schéma traditionnel et exploitant la nature diffusée du support sans fil, plusieurs schémas de relais coopératifs ont été discutés dans [58, 64]. En général, ils peuvent être classés en schémas de relais fixes explorant le relais de décodage et en avant ou le relais d'amplification et de transmission et les schémas de relais en option utilisant un relais sélectif ou un relais incrémental [58].

II.3.3.1 Amplifier et avancer

Le processus de décodage et retransmission est également utilisé dans un schéma traditionnel à sauts multiples. Alors que la différence dans le schéma de relais coopératif est que le nœud

source S tente de transmettre un message au nœud de destination D avec la coopération du nœud relais R, autrement que par le saut de relais du nœud R. Comme le montre la figure II.10, la transmission est divisée en deux tranches de temps. Au premier intervalle de temps, le message est diffusé par le nœud source. La destination et le nœud de relais reçoivent ce message de par la nature de la diffusion sans fil. Le signal reçu au nœud de relais et au nœud de destination peut être écrit comme suit: [64].

$$r_1 = h_{sd}\sqrt{P_s}S_0 + n_1 \quad (\text{II.29})$$

$$r_2 = h_{sr}\sqrt{P_s}S_0 + n_2 \quad (\text{II.30})$$

Où s_0 est le signal transmis par le nœud source avec une puissance P_s , r_1 et r_2 sont les signaux reçus au niveau du relais et du nœud de destination, h_{sd} et h_{sr} sont les coefficients de canal, n_1 et n_2 capturent l'effet d'AWGN.

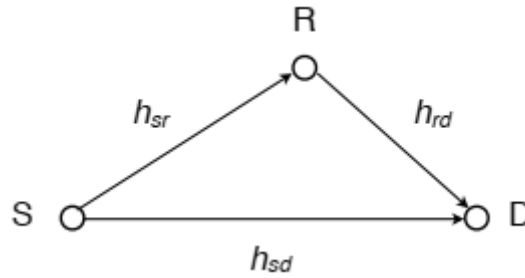


Figure II.10: Relais coopératif fixe [64].

En raison des différentes conditions de canal, les nœuds de relais et de destination détectent le message différemment. Il est raisonnable que, dans la plupart des cas, le nœud de relais puisse recevoir ce message avec moins de probabilité d'erreur que le nœud de destination. Ainsi, au deuxième intervalle de temps, le nœud relais retransmettra le message décodé. Le signal retransmis est exprimé comme suit: [64].

$$r_3 = h_{rd}\sqrt{P_s}S_0 + n_3 \quad (\text{II.31})$$

Où s_r est le signal retransmis par le nœud de relais de puissance P_r , h_{rd} est le coefficient de canal entre les nœuds de relais et de destination, n_3 capture l'effet de l'AWGN. Sur la base des deux signaux reçus représentés dans les équations (II.29) et (II.31), le nœud de destination utilisant une combinaison de rapport maximum (MRC) peut détecter le signal source avec moins de probabilité d'erreur.

Le schéma d'amplification et de transmission se compose également de trois nœuds, comme le montre la figure II.10. Cependant, dans le schéma d'amplification et de transmission, le nœud de relais amplifie simplement le signal reçu sans le décoder. Ainsi, dans le premier intervalle de temps, les signaux reçus au niveau du nœud de relais et du nœud de destination sont les mêmes que dans le schéma de décodage et retransmission montré dans les équations (II.29) et (II.30). Dans le deuxième intervalle de temps, le nœud de destination reçoit le signal amplifié du chemin de relais comme [63-65]:

$$r_3 = \alpha_r h_{rd} r_2 + n_3 \quad (\text{II.32})$$

Notez que, pour rester dans sa contrainte de puissance, le nœud de relais utilise le facteur d'amplification α_r . Il est déterminé par la puissance d'émission allouée et le gain instantané du canal comme indiqué ci-dessous:

$$\alpha_r = \sqrt{\frac{P_r}{|h_{sr}|^2 P_s + N_0 B}} \quad (\text{II.33})$$

où N_0 est la densité spectrale de puissance de l'AWGN et B est la bande passante des signaux en bande de base. Sur la base des signaux reçus dans les deux intervalles de temps représentés dans les équations (II.29) et (II.32), le nœud de destination décode le message source. Compte tenu du MRC des signaux reçus au nœud de destination, le SNR reçu après la combinaison est: [65]

$$\gamma_{AF} = \gamma_{sd} + \frac{\gamma_{sr} \gamma_{rd}}{1 + \gamma_{sr} + \gamma_{rd}} \quad (\text{II.34})$$

$$\text{Avec : } \gamma_{sd} = \frac{|h_{sd}|^2 P_s}{N_0 B}, \gamma_{sr} = \frac{|h_{sr}|^2 P_s}{N_0 B}, \gamma_{rd} = \frac{|h_{rd}|^2 P_r}{N_0 B},$$

II.3.3.2 Relayage sélective

Les schémas de relais fixes décrits précédemment sont généralement pris en compte lorsque le nœud de relais a été attribué à l'avance. Cependant, dans la plupart des cas, le signal diffusé par le nœud source est entendu par plusieurs nœuds, tandis que le nœud coopératif attribué peut ne pas être le meilleur nœud capable de recevoir correctement ce signal. Ainsi, dans un schéma de relais sélectif, le nœud qui peut mieux recevoir le signal sera sélectionné comme nœud coopératif. Ceci peut être réalisé par la stratégie que parmi les nœuds relais entre le nœud source et le nœud de destination si le $|h_{sr}|^2$ mesuré tombe en dessous d'un certain seuil, le nœud source continue simplement sa transmission vers le nœud de destination sous forme de répétition ou en allouer plus de puissance d'émission. Si le $|h_{sr}|^2$ mesuré se situe au-dessus du

seuil, le meilleur nœud qui a le plus $|hsr|$ sera sélectionné comme relais [65-66].

Le processus efficace de sélection du nœud de relais peut être effectué de la même manière que décrit dans [25], où chaque nœud de relais utilise une minuterie liée à la condition du canal. Le temporisateur du nœud de relais avec la meilleure condition de canal expirera en premier. Ensuite, il transmet un drapeau court, annonçant sa présence, et arrête le chronomètre des autres nœuds. Les modèles de canaux de ce schéma sont similaires à ceux employés dans le schéma de relais décodé et aller ou le schéma de relais amplification et transmission [67].

II.3.3.3 Relais incrémental

Dans les schémas de relais ci-dessus, le nœud de relais effectue un relais coopératif tout le temps. Dans certains cas, il peut être inefficace d'utiliser les degrés de liberté des canaux. Parfois, si le canal entre les nœuds source et de destination est suffisamment bon, il n'est pas nécessaire que le nœud relais retransmette ou amplifie le signal reçu vers le nœud de destination. Sinon, le nœud de destination peut indiquer un échec de la transmission directe depuis la source. En exploitant cette rétroaction de la destination, le processus de relais doit être exécuté. Il peut alternativement utiliser un relais fixe ou un relais sélectif [18, 27]. D'autre part, en plus de relayer toute la séquence des informations sources, une redondance incrémentielle peut également être nécessaire. Cela pourrait être réalisé en implémentant un code de contrôle d'erreur plus fort dans le processus de relais.

II.3.4 Schéma coopératif virtuel MISO

Les codes de blocs spatio-temporels introduits dans [66] peuvent être employés sur de multiples antennes de transmission pour exploiter toute la diversité des canaux à évanouissements de Rayleigh. Le schéma de codage peut être défini comme une matrice de codage $m \times n$ comme suit:

$$C_2 = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix}, C_3 = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 \\ -s_2 & s_1 & s_4 \\ -s_3 & s_4 & s_1 \\ -s_4 & -s_3 & s_2 \\ s_1^* & s_2^* & s_3^* \\ -s_2^* & s_1^* & s_4^* \\ -s_3^* & s_4^* & s_1^* \\ -s_4^* & -s_3^* & s_2^* \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

Ces deux matrices peuvent être utilisées respectivement dans deux antennes d'émission et trois systèmes d'antennes d'émission. Le message sera d'abord codé à l'aide de ces matrices puis transmis simultanément à partir de plusieurs antennes. Dans les réseaux sans fil, en raison de la

petite taille physique des nœuds, la mise en œuvre directe d'un système multi-antenne sur le nœud n'est pas pratique.

Le schéma coopératif virtuel MISO a été proposé dans [67] pour fournir des performances comparables à un système multi-antenne. Elle peut être réalisée en sélectionnant m nœuds coopératifs parmi un ensemble de nœuds de relais potentiels pour constituer un système multi-antenne virtuel. Les données sont codées par une matrice de codage espace-temps $m \times n$ et découpées en m flux de données qui sont simultanément transmis par les nœuds coopératifs. Afin d'explorer plus en détail l'utilisation des codes de blocs spatio-temporels de manière distribuée, l'implémentation la plus simple de ce schéma a été définie par [67], en utilisant le code décrit par C2 dans (II.35), qui est généralement appelé code Alamouti [68].

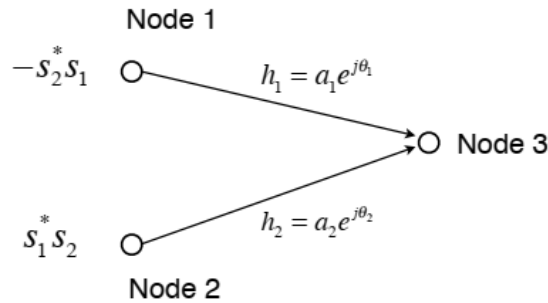


Figure II.11: Communication coopérative virtuelle MISO utilisant le code Alamouti [68]

Comme le montre la figure II.11, il existe deux nœuds de transmission et un nœud de réception. Il est supposé que les deux nœuds de transmission ont déjà reçu le même message d'origine. La transmission en bande de base pourrait utiliser une constellation de signaux avec $2b$ éléments. Au premier intervalle de temps, $2b$ bits arrivent au codeur qui sélectionne les signaux de constellation s_1 et s_2 . Ces deux signaux sont transmis simultanément depuis Node1 et Node2. Au deuxième intervalle de temps, les signaux $-s_2^*$ et s_1 sont transmis simultanément depuis Node1 et Node2. L'opérateur $*$ fait référence à la conjugaison complexe. Si le canal est statique pendant ces deux intervalles de temps, les signaux reçus r_1 et r_2 au Node3 seront:

$$r_1 = h_1 \sqrt{P_{T_1}} s_1 + h_2 \sqrt{P_{T_2}} s_2 + n_1 \quad (\text{II.36.a})$$

$$r_2 = -h_1 \sqrt{P_{T_1}} s_1^* + h_2 \sqrt{P_{T_2}} s_2^* + n_2 \quad (\text{II.36.b})$$

où P_{T_1} et P_{T_2} sont les puissances d'émission au nœud 1 et au nœud 2, h_1 et h_2 sont les coefficients de canal des canaux respectifs définis comme $a_1 e^{j\theta_1}$ et $a_2 e^{j\theta_2}$, n_1 et n_2 capturent l'effet d'AWGN. Ensuite, comme discuté dans, la détection du maximum de vraisemblance est utilisée pour minimiser la métrique de décision [69] :

$$\left[|r_1 - h_1\sqrt{P_{T_1}}s_1 - h_2\sqrt{P_{T_2}}s_2|^2 + |r_2 + h_1\sqrt{P_{T_1}}s_2^* - h_2\sqrt{P_{T_2}}s_1^*|^2 \right] \quad (\text{II.37})$$

Ceci équivaut à son tour à minimiser la métrique de décision pour la détection s1 comme:

$$\left| (r_1 h_1^* \sqrt{P_{T_1}} + r_2^* h_2 \sqrt{P_{T_2}}) - s_1 \right|^2 + (-1 + \sum_{i=1}^2 |h_i|^2 P_{T_i}) * |s_1|^2 \quad (\text{II.38})$$

et pour la détection s2 comme:

$$\left| (r_1 h_2^* \sqrt{P_{T_2}} + r_2^* h_1 \sqrt{P_{T_1}}) - s_2 \right|^2 + (-1 + \sum_{i=1}^2 |h_i|^2 P_{T_i}) * |s_2|^2 \quad (\text{II.39})$$

Ainsi, les signaux combinés envoyés au détecteur de maximum de vraisemblance sont:

$$\begin{cases} \bar{s}_1 = r_1 h_1^* \sqrt{P_{T_1}} + r_2^* h_2 \sqrt{P_{T_2}} = (\alpha_1^2 P_{T_1} + \alpha_2^2 P_{T_2}) s_1 + h_1^* \sqrt{P_{T_1}} n_1 + h_2 \sqrt{P_{T_2}} n_2^* \\ \bar{s}_2 = r_1 h_2^* \sqrt{P_{T_2}} + r_2^* h_1 \sqrt{P_{T_1}} = (\alpha_1^2 P_{T_1} + \alpha_2^2 P_{T_2}) s_2 + h_1 \sqrt{P_{T_1}} n_2^* + h_2^* \sqrt{P_{T_2}} n_1 \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

Ce type de schéma coopératif, utilisant le codage Alamouti, peut atteindre une diversité avec deux degrés de liberté. Cependant, lors de l'application de schémas coopératifs virtuels MISO à des réseaux sans fil, il reste quelques problèmes pratiques à prendre en compte. Dans l'analyse précédente, il est supposé que la fréquence et l'heure sont parfaitement synchronisées. Alors qu'en réalité, en raison de l'incohérence sur l'oscillateur et du déploiement distribué des nœuds, le problème de la synchronisation ne doit pas être ignoré [69-70].

Pour la synchronisation de la porteuse, nous pouvons supposer qu'une porteuse de référence est transmise et que tous les nœuds peuvent se verrouiller sur cette porteuse de référence en utilisant une boucle à verrouillage de phase, ou elle peut être estimée à l'aide de quelques symboles pilotes au début du paquet comme présenté dans [70-71].

II.3.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les communications coopératives et nous avons montré leur efficacité potentielle dans les réseaux sans fil en utilisant la diversité spatiale. Finalement, nous avons donné un aperçu des différents techniques concernant les communications coopératives dans les différents niveaux physiques, MAC et réseau. Nous nous sommes concentrés sur la couche MAC et nous avons donné une classification selon deux critères importants dans les communications coopératives.

Le chapitre suivant présente la nouvelle technologie, la cinquième génération de communication mobile(5G).

CHAPITRE III: Réseau mobile 5e Génération

CHAPITRE III : Réseau mobile 5e Génération

III.1 Introduction

La communication mobile est devenue un produit de tous les jours. Au cours des dernières décennies, il est passé d'une technologie coûteuse pour quelques individus sélectionnés à des systèmes omniprésents d'aujourd'hui utilisés par la majorité de la population mondiale.

Le monde a été témoin de quatre générations de systèmes de communication mobile, chacun associé à un ensemble spécifique de technologies et à un ensemble spécifique de cas d'utilisation pris en charge, voir Figure III.1. Les générations et les démarches entreprises entre elles sont ici utilisées comme arrière-plan pour introduire le contenu. Le reste se concentre sur les dernières générations déployées et envisagées, à savoir la quatrième génération (4G) et la cinquième génération (5G).

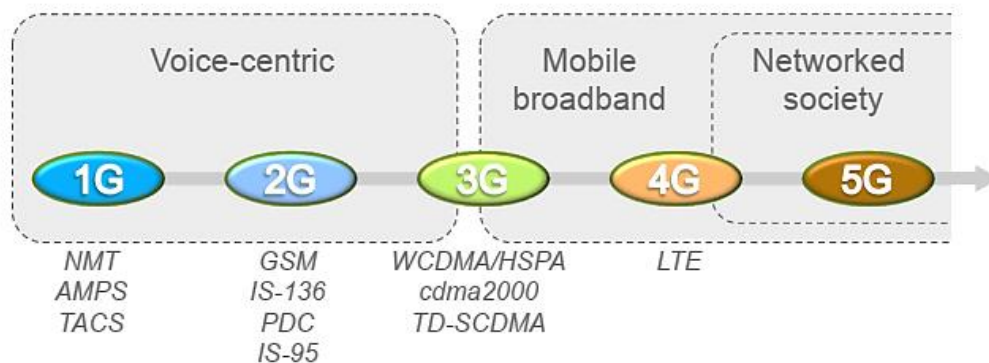


Figure III.1 Générations cellulaires [72]

III.2 Technologies centrées sur la voix 1G et 2G

Les systèmes de première génération (1G) étaient les systèmes de téléphonie mobile à voix seule analogique des années 80, souvent disponibles sur une base nationale avec une itinérance internationale limitée ou inexistante. Les systèmes 1G comprennent NMT, AMPS et TACS. La communication mobile était disponible avant les systèmes 1G, mais généralement à petite échelle et ciblant un groupe de personnes très sélectionné [73].

Les systèmes de deuxième génération (2G) sont apparus au début des années 1990. Des exemples de technologies 2G incluent la technologie GSM d'origine européenne, les technologies américaines IS-95 / CDMA et IS-136 / TDMA et la technologie PDC japonaise. Les systèmes 2G étaient toujours centrés sur la voix, mais grâce à leur tout numérique, ils offraient une capacité nettement supérieure à celle des systèmes 1G précédents. Au fil des ans,

certaines de ces premières technologies ont été étendues pour prendre également en charge les services de données par paquets (primitifs) [73-74]. Ces extensions sont parfois appelées 2,5G pour indiquer qu'elles ont leurs racines dans les technologies 2G mais qu'elles ont une gamme de capacités beaucoup plus large que les technologies d'origine. EDGE est un exemple bien connu de technologie 2,5G.

Le GSM / EDGE est encore largement utilisé dans les smartphones, mais il est également fréquemment utilisé pour certains types de communication de type machine tels que les alarmes, les systèmes de paiement et la surveillance immobilière [71].

III.3 Haut débit mobile 3G et 4G

Au cours des années 90, le besoin de prendre en charge non seulement les services vocaux mais aussi les services de données commencé à émerger, ce qui a conduit au besoin d'une nouvelle génération de technologies cellulaires allant au-delà des services vocaux uniquement. À cette époque, à la fin des années 1990, le GSM 2G, bien qu'il ait été développé en Europe, était déjà devenu une norme mondiale de facto. Pour assurer une portée mondiale également aux technologies 3G, il a été réalisé que le développement de la 3G devait être réalisé à l'échelle mondiale. Pour faciliter cela, le projet de partenariat de troisième génération (3GPP) a été formé pour développer les technologies 3G WCDMA et TD-SCDMA [73]. Peu de temps après, l'organisation parallèle 3GPP2 a été formée pour développer la technologie 3G cdma2000 concurrente, une évolution de la technologie 2G IS-95.

La première version de WCDMA a été finalisée en 1999 (la première version 3GPP porte le nom de l'année où elle a été gelée (1999) [72-74], tandis que les versions suivantes sont numérotées 4, 5, 6, etc.). Elle comprenait des services vocaux et vidéo à commutation de circuits et des services de données sur des supports à commutation de paquets et à commutation de circuits [72-75].

Les premières améliorations majeures de WCDMA sont venues avec l'introduction de HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access) dans la version 5, suivie de Enhanced Uplink dans la version 6, collectivement connue sous le nom de High-Speed Packet Access (HSPA) [73]. HSPA, parfois appelé 3,5G, permettait une « véritable » expérience haut débit mobile avec des débits de données de plusieurs Mbit / s tout en maintenant la compatibilité avec les spécifications 3G d'origine. Avec la prise en charge du haut débit mobile, les bases de l'adoption rapide des smartphones tels que l'iPhone et de la large gamme d'appareils Android était en place.

Sans la large disponibilité du haut débit mobile pour le marché de masse, l'adoption par les utilisateurs de smartphones aurait été nettement plus lente et leur utilisation gravement limitée. Dans le même temps, l'utilisation massive de smartphones et d'un large éventail de services basés sur les données par paquets tels que les réseaux sociaux, la vidéo, les jeux et les achats en ligne se traduisent par des exigences en matière de capacité accrue et d'efficacité spectrale améliorée. Les utilisateurs qui s'habituent de plus en plus aux services mobiles augmentent également leurs attentes en termes d'augmentation des débits de données et de réduction de la latence [74].

Ces besoins ont été en partie comblés par une évolution continue et toujours en cours du HSPA, mais cela a également déclenché les discussions sur la technologie 4G au milieu des années 2000.

La technologie 4G LTE a été dès le début développée pour la prise en charge des données par paquets et ne prend pas en charge la voix à commutation de circuits, contrairement à la 3G où HSPA était un « add-on » pour fournir des données par paquets hautes performances en plus de la technologie existante. Les services mobiles à large bande étaient au centre des préoccupations, avec des exigences strictes en matière de débits de données élevés, de faible latence et de capacité élevée. La flexibilité du spectre et le maximum de points communs entre les solutions FDD et TDD étaient d'autres exigences importantes. Une nouvelle architecture de réseau central a également été développée, appelée Enhanced Packet Core (EPC), pour remplacer l'architecture utilisée par GSM et WCDMA / HSPA. La première version de LTE faisait partie de la version 8 des spécifications 3GPP et le premier déploiement commercial a eu lieu fin 2009, suivi d'un déploiement rapide et mondial des réseaux LTE [72].

Un aspect important du LTE est l'acceptation mondiale d'une seule technologie, contrairement aux générations précédentes pour lesquelles il y a eu plusieurs technologies concurrentes, voir la figure III.2. Le fait de disposer d'une technologie unique et universellement acceptée accélère le développement de nouveaux services et réduit les coûts tant pour les utilisateurs que pour les opérateurs de réseau.

Depuis son introduction commerciale en 2009, le LTE a considérablement évolué en termes de débits de données, de capacité, de spectre et de flexibilité de déploiement, et de gamme d'applications. À partir de déploiements macro-centriques avec des débits de données de pointe de 300 Mbit / s dans 20 MHz de spectre contigu sous licence, l'évolution du LTE peut dans la version 13 prendre en charge des débits de données de pointe multi-Gbit / s grâce à des

améliorations en termes de technologies d'antenne, de coordination multi site, l'exploitation du spectre fragmenté et non autorisé et les déploiements densifiés pour ne citer que quelques domaines. L'évolution du LTE a également considérablement élargi les cas d'utilisation au-delà du haut débit mobile, par exemple en améliorant la prise en charge des communications massives de type machine et en introduisant une communication directe entre appareils.

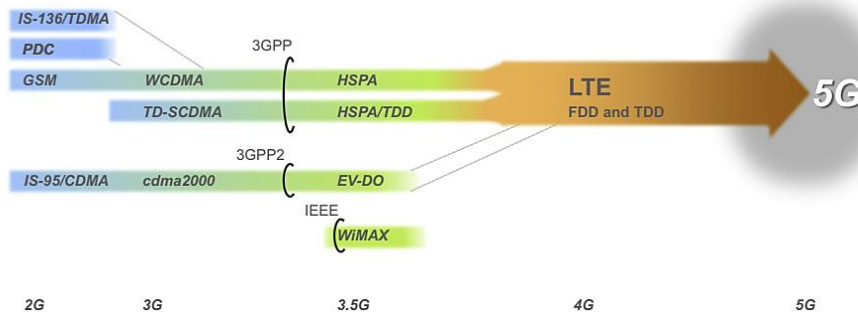


Figure III.2 La convergence des technologies sans fil [72]

III.4 5G au-delà de la société mobile en réseau à large bande

Bien que le LTE en soit encore à un stade de déploiement relativement précoce, le secteur est déjà bien sur la voie de la prochaine génération de communications mobiles, communément appelée cinquième génération ou 5G.

Les communications ultra-fiables et à faible latence (URLLC), également connues sous le nom de communication de type machine critique, constituent un autre exemple d'applications à large bande non mobiles. Des exemples en sont l'automatisation industrielle, où les exigences de latence et de fiabilité sont très strictes. La communication de véhicule à véhicule pour la sécurité routière en est un autre exemple.

Néanmoins, le haut débit mobile restera un cas d'utilisation important et la quantité de trafic sur les réseaux sans fil augmente rapidement, tout comme les attentes des utilisateurs en matière de débits de données, de disponibilité et de latence. Ces exigences améliorées doivent également être satisfaites par les réseaux sans fil 5G.

L'augmentation de la capacité peut se faire de trois manières: une efficacité spectrale améliorée, des déploiements densifiés et une quantité accrue de spectre. L'efficacité spectrale du LTE est déjà élevée et bien que des améliorations puissent être apportées, elle n'est pas suffisante pour faire face à l'augmentation du trafic. La densification du réseau devrait également se produire, non seulement du point de vue de la capacité, mais également du point de vue de la disponibilité du débit de données élevé, et peut fournir une augmentation considérable de la capacité, mais

au prix de la recherche de sites d'antennes supplémentaires. Augmenter la quantité de spectre aidera, mais malheureusement, la quantité de spectre non encore exploitée dans les bandes cellulaires typiques, jusqu'à environ 3 GHz, est limitée et assez petite [76].

Par conséquent, l'attention s'est portée sur des bandes de fréquences un peu plus élevées, à la fois dans la gamme 3e6 GHz mais aussi dans la gamme 6e30 GHz et au-delà pour lesquelles le LTE n'est pas conçu, comme moyen d'accéder à un spectre supplémentaire. Cependant, comme les conditions de propagation dans les bandes de fréquences plus élevées sont moins favorables pour une couverture étendue et nécessitent des techniques d'antenne plus avancées telles que la formation de faisceaux, ces bandes peuvent principalement servir de complément aux bandes de fréquences inférieures existantes.

Comme le montre la discussion précédente, la gamme d'exigences pour les réseaux sans fil 5G est très large, ce qui nécessite un degré élevé de flexibilité du réseau. En outre, comme de nombreuses applications futures ne peuvent pas être prévues pour le moment, la preuve future est une exigence clé. Certaines de ces exigences peuvent être traitées par l'évolution LTE, mais pas toutes, ce qui nécessite une nouvelle technologie d'accès radio pour compléter l'évolution LTE, comme illustré dans la figure III.3.

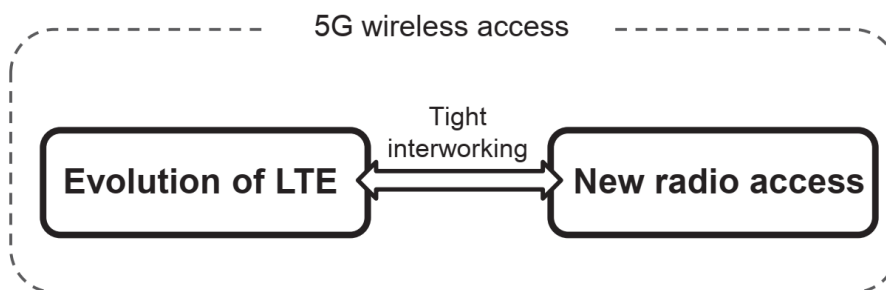


Figure III.3 5G composé de l'évolution LTE et de la nouvelle technologie d'accès radio [72]

III.5 accès sans fil 5G

Le monde a connu quatre générations de communications mobiles, chaque nouvelle génération émergeant environ 10 ans après l'émergence de la génération précédente.

La première génération (1G) était constituée des systèmes analogiques introduits au début des années 1980. Ils ne prenaient en charge que les services vocaux et, pour la première fois, rendaient la téléphonie mobile accessible aux gens ordinaires.

La deuxième génération (2G), qui a émergé au début des années 90, a fait passer la téléphonie mobile d'une utilisation par certaines personnes à un accès à pratiquement tout le monde et

partout. Sur le plan technologique, la principale caractéristique de la 2G était la transition de la transmission analogique-numérique. Bien que le service principal soit toujours la voix, l'introduction de la transmission numérique a également permis la première prise en charge des données mobiles.

Le WCDMA de troisième génération (3G), plus tard évolué en HSPA, a été introduit en 2001. La 3G a jeté les bases du haut débit mobile et, en particulier avec HSPA, a rendu un véritable accès Internet mobile accessible aux gens ordinaires [77-78].

Nous sommes maintenant bien entrés dans l'ère de la communication mobile de quatrième génération (4G) avec les premiers systèmes LTE introduits en 2009. Par rapport au HSPA, le LTE offre un haut débit mobile encore meilleur, y compris des débits de données plus élevés et une plus grande efficacité, par exemple., utilisation du spectre.

Il est important de noter que l'introduction d'une nouvelle génération de communication mobile n'a en aucun cas impliqué la fin de la génération précédente. La situation a plutôt été le contraire. Le déploiement des systèmes 2G s'est en fait accéléré après l'introduction de la 3G. De même, il y a encore un déploiement massif de systèmes 3G malgré l'introduction du LTE il y a plus de 6 ans.

Il n'est donc pas surprenant que, bien que le LTE soit encore un stade de déploiement relativement précoce, l'industrie soit déjà bien sur la voie de la prochaine étape de la communication mobile, à savoir la cinquième génération ou 5G.

La 5G continuera sur la voie du LTE, permettant des débits de données encore plus élevés et une efficacité encore plus élevée pour le haut débit mobile. Cependant, la portée de la 5G est beaucoup plus large que le simple haut débit mobile amélioré. Au contraire, la 5G est souvent décrite comme une plate-forme qui devrait permettre la connectivité sans fil pour essentiellement tout type d'appareil ou tout type d'application qui pourrait bénéficier de la connexion. Le concept de communication de type machine (MTC) fait partie de cet ensemble étendu de cas d'utilisation attendus à l'ère de la 5G. Des mesures importantes pour améliorer encore la prise en charge de certains types d'applications MTC ont déjà été prises dans le cadre de l'évolution du LTE. Plus précisément, ces étapes se sont concentrées sur des applications MTC massives associées à des appareils à très faible coût avec une très longue durée de vie de la batterie mais avec des exigences de débit de données et de latence relativement modestes. [78].

Cependant, la 5G est supposée permettre la connectivité pour un éventail beaucoup plus large de nouveaux cas d'utilisation. Des exemples de cas d'utilisation supplémentaires explicitement mentionnés dans le contexte de la 5G incluent la connectivité sans fil pour le contrôle à distance des machines, la connectivité sans fil pour la sécurité et le contrôle du trafic, et la surveillance / contrôle de l'infrastructure, pour n'en nommer que quelques-uns. En outre, la 5G ne devrait pas seulement être une plate-forme pour fournir une connectivité pour des applications et des cas d'utilisation déjà identifiés. La 5G devrait plutôt être suffisamment flexible pour permettre la connectivité également pour les applications futures et les cas d'utilisation qui ne sont peut-être même pas encore anticipés [83].

Le très large éventail de cas d'utilisation à couvrir par la 5G implique que les capacités de l'accès sans fil 5G doivent s'étendre bien au-delà de celles des générations précédentes. Pour les réseaux de première et de deuxième génération, le cas d'utilisation ciblé était la téléphonie mobile, l'objectif principal étant de fournir une bonne qualité vocale au plus grand nombre d'utilisateurs possible.

Pour la 3G et la 4G, le changement d'orientation vers le haut débit mobile impliquait que la mesure de la qualité passait de la qualité vocale à un débit de données atteignable par l'utilisateur final. Dans cette optique, l'objectif principal de la 3G et de la 4G a été de permettre des débits de données aussi élevés que possible pour le plus grand nombre d'utilisateurs possible. Cependant, pour la 5G, il y aura un ensemble beaucoup plus large de capacités et d'exigences, dont certaines peuvent même se contredire en partie [70-72].

III.5.1 tarifs de données

Offrir la possibilité de débits de données encore plus élevés pour les utilisateurs finaux sera une exigence importante également à l'ère de la 5G, principalement dans le cadre d'une quête d'une expérience à large bande mobile encore améliorée. Bien que la prise en charge de débits de données de pointe extrêmement élevés de 10 Gbit / s et plus soit souvent mentionnée dans le contexte de la 5G, ce n'est qu'un aspect d'un objectif plus général de débits de données plus élevés dans tous les types d'environnements.

Fournir des débits de données plus élevés peut, par exemple, inclure également la mise à disposition générale de plusieurs 100 Mbit / s dans des environnements urbains et suburbains. Cela impliquerait une augmentation des débits de données réalisables d'environ un facteur 10 par rapport à ce qui peut être fourni avec les technologies actuelles [74].

En outre, si l'on est d'accord avec la vision d'une connectivité sans fil disponible « partout et pour tout le monde », des débits de données plus élevés peuvent, par exemple, inclure également quelques Mbits / s essentiellement partout dans le monde, y compris les zones rurales des pays en développement où il n'y a pas d'accès à large bande.

III.5.2 latence

En termes d'exigences de latence, la possibilité de fournir une latence de bout en bout de l'ordre de 1 ms est souvent évoquée dans le contexte de la 5G. La faible latence est reconnue depuis l'émergence du HSPA comme un élément important pour permettre une bonne expérience haut débit mobile.

Cependant, pour la 5G, la possibilité de fournir une connectivité avec une latence très faible sera également un catalyseur pour les nouvelles applications sans fil critiques pour la latence, telles que la télécommande avec retour haptique et la connectivité sans fil pour la sécurité routière.

(Le terme retour haptique est utilisé pour indiquer la télécommande où le retour du dispositif contrôlé est utilisé pour fournir une sensation « réelle » au dispositif de contrôle.) [69-71].

Il convient cependant de souligner que très peu d'applications sans fil qui nécessitent réellement une latence de bout en bout aussi faible que 1 ms ont été identifiées.

Offrir la possibilité d'une latence aussi faible devrait donc être davantage considéré comme un facilitateur d'applications futures encore inconnues, plutôt que comme quelque chose qui a été jugé nécessaire pour les applications actuellement envisagées.

Il convient également de noter que la latence de bout en bout dépend de bien plus que de la solution d'accès radio. En fonction de la distance physique entre les points d'extrémité, une latence de bout en bout de 1 ms peut même être physiquement impossible. Néanmoins, l'exigence d'une latence de bout en bout de 1 ms implique que le réseau d'accès radio, y compris la liaison réseau-appareil, devrait être en mesure de fournir une latence nettement inférieure à 1 ms.

III.5.3 fiabilité extrême

Une autre caractéristique souvent mentionnée dans le contexte de la 5G est la possibilité de permettre une connectivité avec une fiabilité extrêmement élevée.

Il convient de noter qu'une fiabilité élevée, dans ce contexte, pourrait signifier des choses très différentes. Dans certains cas, une fiabilité élevée a été associée à la capacité de la solution d'accès sans fil à fournir une connectivité avec un taux d'erreur extrêmement faible, par exemple un taux d'erreur inférieur à 10^{-9} .

Dans d'autres contextes, une fiabilité extrême a, par exemple, été associée à la capacité de conserver la connectivité même en cas d'événements imprévus, y compris des catastrophes naturelles. Il s'agit évidemment d'une exigence très différente, nécessitant des solutions très différentes, par rapport à l'exigence de fournir une connectivité avec un taux d'erreur extrêmement faible dans des conditions plus normales [74].

III.5.4 Appareils à faible coût avec une durée de vie de batterie très longue

Certaines applications, comme la collecte de données à partir d'un très grand nombre de capteurs, nécessitent la possibilité de disposer d'appareils d'un coût bien moindre par rapport aux appareils d'aujourd'hui. Dans de nombreux cas, de telles applications nécessitent également la possibilité d'utiliser des appareils avec une consommation d'énergie extrêmement faible, permettant une autonomie de plusieurs années de la batterie.

Dans le même temps, ces applications ne nécessitent généralement que des débits de données très modestes et peuvent accepter une longue latence. L'évolution du LTE a déjà franchi des étapes substantielles dans cette direction, répondant à de nombreuses exigences 5G dans ce domaine.

III.5.5 Efficacité énergétique du réseau

Une autre exigence importante apparue au cours des dernières années a été l'objectif d'une efficacité énergétique nettement plus élevée du réseau. Bien qu'en partie motivée par la recherche générale d'une société plus durable, l'amélioration de l'efficacité énergétique des réseaux a également des moteurs très réels et concrets.

Premièrement, le coût de l'énergie nécessaire pour faire fonctionner le réseau représente en fait une part importante des dépenses d'exploitation globales de nombreux opérateurs. L'augmentation de l'efficacité énergétique du réseau est donc un outil important pour réduire le coût opérationnel d'un réseau.

Deuxièmement, il existe de nombreux endroits, en particulier dans les pays en développement, où il est nécessaire de fournir une connectivité mobile mais où il n'y a pas d'accès facile au

réseau électrique. La manière typique de fournir de l'énergie aux infrastructures dans de tels endroits est au moyen de générateurs diesel, une approche intrinsèquement coûteuse et complexe. En améliorant l'efficacité énergétique des infrastructures, principalement des stations de base, la fourniture d'électricité au moyen de panneaux solaires de taille décente devient une option beaucoup plus viable [64-66].

Il convient de noter qu'une efficacité énergétique élevée des réseaux n'est pas seulement un problème pour les futurs réseaux 5G. L'amélioration de l'efficacité énergétique du réseau des technologies et des réseaux actuellement disponibles est au moins aussi importante, compte tenu notamment du fait qu'en termes d'infrastructure déployée, les technologies actuellement disponibles domineront pendant de nombreuses années. Cependant, l'introduction d'une nouvelle génération non contrainte par la rétrocompatibilité ouvre de nouvelles opportunités en termes d'efficacité énergétique. D'un autre côté, le potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique des technologies existantes est en partie limité par l'exigence de conserver la rétrocompatibilité et de prendre en charge les anciens appareils.

III.6 5G ET IMT-2020

Depuis l'émergence de la 3G, les différentes générations de communications mobiles ont été étroitement associées aux technologies dites IMT définies par l'UIT-R. L'UIT-R ne développe pas, à elle seule, de spécifications techniques détaillées relatives aux IMT. Ce que fait l'UIT-R est plutôt de spécifier les capacités requises d'une certaine technologie IMT et les exigences que la technologie doit satisfaire.

La technologie actuelle est développée ailleurs, par exemple au sein du 3GPP, puis soumise à l'UIT-R en tant que technologie IMT candidate. Après évaluation par rapport aux exigences spécifiées, la technologie candidate soumise peut être approuvée en tant que technologie IMT.

Vers l'an 2000, l'UIT-R a défini le concept des IMT-2000. Les technologies 3G WCDMA / HSPA, cdma2000 et TD-SCDMA ont toutes été soumises à l'UIT-R puis approuvées en tant que technologies IMT-2000. Dix ans plus tard, l'UIT-R a défini le concept d'IMT-Advanced. Deux technologies, LTE et WiMax [74], ont été soumises à l'UIT-R et toutes deux ont été approuvées en tant que technologies IMT-Advanced (2 Strictement parlant, seule la version 10 et au-delà de LTE est approuvée comme technologie IMT- 4G), parmi ceux-ci, le LTE est de loin le plus dominant [70-71].

En 2013, l'UIT-R a lancé des activités pour définir la prochaine étape des IMT, appelée IMT-2020. En ligne avec IMT-2000 étant associé à la 3G et IMT-Advanced étant associé à 4G, IMT-2020 peuvent être considérés comme étant associés à l'accès sans fil 5G. Les étapes les plus importantes étant résumées dans la figure III.4.



Figure III.4 Calendrier de l'UIT-R pour les IMT-2020 [72]

Les activités de l'UIT-R sur les IMT-2020 ont commencé par l'élaboration d'un document de « vision » [73], décrivant les scénarios d'utilisation prévus et les capacités requises correspondantes des IMT-2020. L'UIT-R est actuellement en train de définir des exigences plus détaillées pour IMT-2020, les exigences par rapport auxquelles les technologies candidates doivent ensuite être évaluées. Ces exigences devraient être finalisées mi-2017. Une fois les exigences définies, les technologies candidates peuvent être soumises à l'UIT-R.

III.6.1 Scénarios d'utilisation pour imt-2020

Un large éventail de nouveaux cas d'utilisation étant l'un des principaux moteurs de la 5G, l'UIT-R a défini trois scénarios d'utilisation qui font partie de la recommandation de vision IMT [73]. Les contributions de l'industrie mobile et de différentes organisations régionales et d'opérateurs ont été prises en compte dans le processus IMT-2020 de l'UIT-R WP5D, et ont été synthétisées dans les trois scénarios [72-73]:

- Haut débit mobile amélioré (EMBB): le haut débit mobile étant aujourd'hui le principal moteur de l'utilisation des systèmes mobiles 3G et 4G, ce scénario met en évidence son rôle continu comme le scénario d'utilisation le plus important. La demande ne cesse d'augmenter et de nouveaux domaines d'application font leur apparition, établissant de nouvelles exigences pour ce que l'UIT-R appelle le haut débit mobile amélioré. En raison de son utilisation large et omniprésente, il couvre une gamme de cas d'utilisation avec différents défis, y compris à la fois les points chauds et la couverture étendue, le premier permettant des débits de données élevés, une densité d'utilisateurs élevée et un besoin de très grande capacité, tout en le second met l'accent sur la mobilité et une expérience utilisateur transparente, avec des exigences moindres en termes de débit de données et de densité d'utilisateurs. Le scénario du haut débit mobile amélioré est généralement considéré comme traitant de la communication centrée sur l'humain.

- Communications ultra-fiables et à faible latence (URLLC): ce scénario est destiné à couvrir à la fois la communication humaine et la communication centrée sur la machine, cette dernière étant souvent appelée communication de type machine critique (C-MTC). Il se caractérise par des cas d'utilisation avec des exigences strictes en matière de latence, de fiabilité et de haute disponibilité. Les exemples incluent la communication de véhicule à véhicule impliquant la sécurité, le contrôle sans fil des équipements industriels, la chirurgie médicale à distance et l'automatisation de la distribution dans un réseau intelligent. Un exemple de cas d'utilisation centré sur l'humain est le jeu 3D et « Internet tactile », où l'exigence de faible latence est également associée à des débits de données très élevés.
- Communications massives de type machine (M-MTC): Il s'agit d'un cas d'utilisation purement centré sur la machine, où la caractéristique principale est un très grand nombre d'appareils connectés qui ont généralement des transmissions très rares de petits volumes de données qui ne sont pas sensibles au retard. Le grand nombre d'appareils peut donner une densité de connexion très élevée localement, mais c'est le nombre total d'appareils dans un système qui peut être le véritable défi et souligne la nécessité d'un faible coût. En raison de la possibilité de déploiement à distance des appareils M-MTC, ils doivent également avoir une très longue durée de vie de la batterie.

Les scénarios d'utilisation sont illustrés dans la figure III.5, avec quelques exemples de cas d'utilisation. Les trois scénarios décrits dans la liste précédente ne sont pas censés couvrir tous les cas d'utilisation possibles, mais ils fournissent un regroupement pertinent de la majorité des cas d'utilisation actuellement prévus et peuvent donc être utilisés pour identifier les capacités clés nécessaires pour la radio de prochaine génération. - technologie d'interface pour IMT-2020. Il y aura très certainement de nouveaux cas d'utilisation émergents, que nous ne pouvons pas prévoir aujourd'hui ni décrire en détail. Cela signifie également que la nouvelle interface radio doit avoir une grande flexibilité pour s'adapter aux nouveaux cas d'utilisation, et que « l'espace » englobé par la gamme des capacités clés prises en charge doit prendre en charge les exigences connexes issues de l'évolution des cas d'utilisation [70].

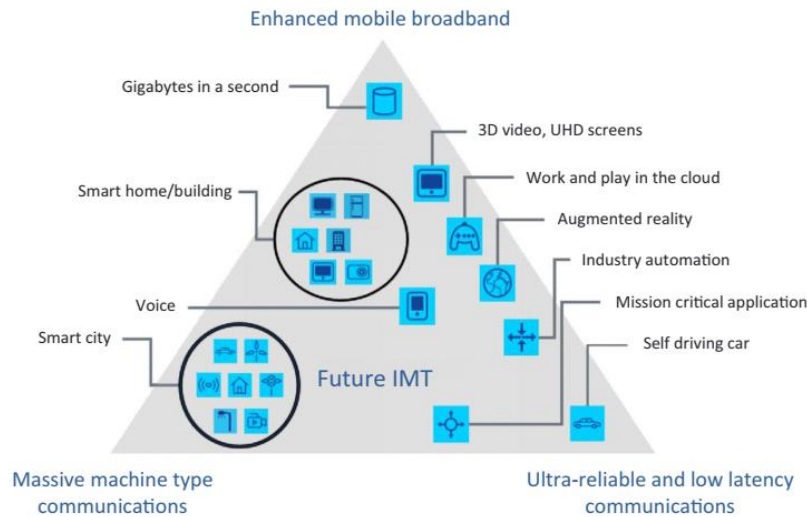


Figure III.5 Cas d'utilisation IMT-2020 et mappage aux scénarios d'utilisation [72]

III.6.2 Capacités des IMT-2020

Dans le cadre du développement du cadre pour les IMT-2020 tel que documenté dans la recommandation sur la vision IMT [73], l'UIT-R a défini un ensemble de capacités nécessaires pour une technologie IMT-2020 pour prendre en charge les cas d'utilisation et les scénarios d'utilisation de la 5G identifiés par le contributions d'organismes régionaux, de projets de recherche, d'opérateurs, d'administrations et d'autres organisations. Il y a un total de 13 capacités définies dans [73], où huit ont été sélectionnées comme capacités clés. Ces huit capacités clés sont illustrées par deux diagrammes de « toile d'araignée », voir les figures 3.6 et 3.7 [71].

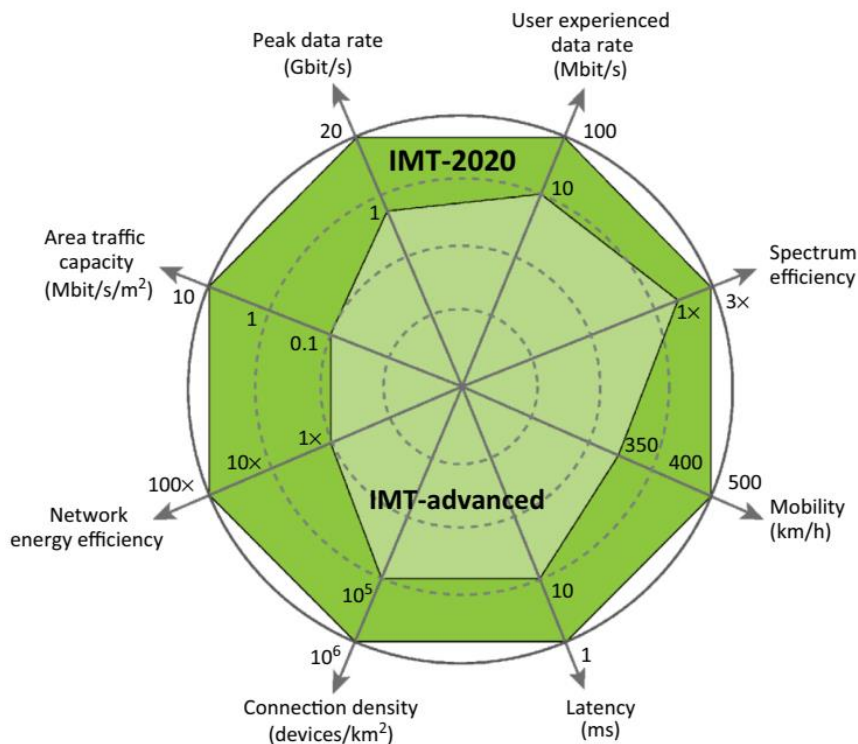


Figure III.6 Principales capacités des IMT-2020 [72]

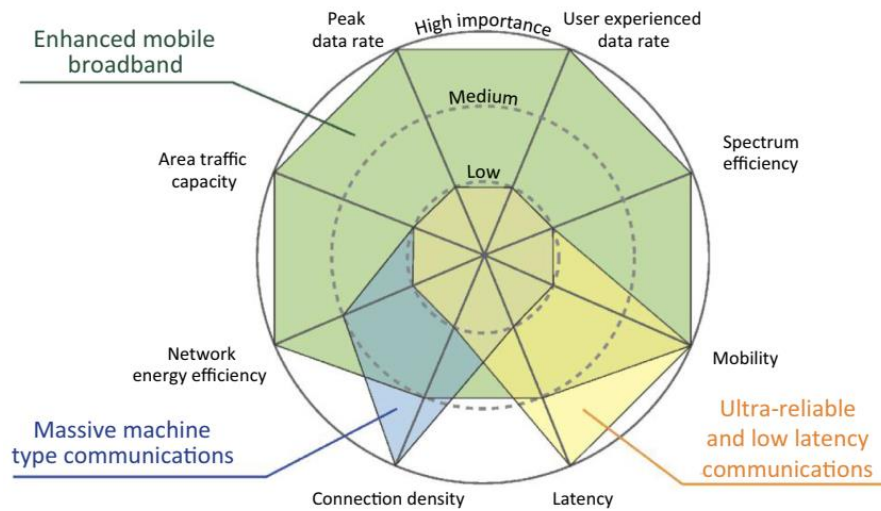


Figure III.7 Relation entre les capacités clés et les trois scénarios d'utilisation de l'UIT-R [72]

La figure III.6 illustre les capacités clés ainsi que les chiffres cibles indicatifs destinés à donner une première orientation de haut niveau pour les exigences plus détaillées des IMT-2020 qui sont actuellement en cours d'élaboration. Comme on peut le voir, les valeurs cibles sont en partie absolues et en partie relatives aux capacités correspondantes de l'IMT avancé.

Les valeurs cibles pour les différentes capacités clés ne doivent pas être atteintes simultanément, et certaines cibles sont même dans une certaine mesure exclusive les unes des autres. Pour cette raison, un deuxième diagramme est présenté à la figure III.7 qui illustre « l'importance » de chaque capacité clé pour réaliser les trois scénarios d'utilisation de haut niveau envisagés par l'UIT-R.

Le débit de données de pointe est un nombre qui a toujours beaucoup d'attention, mais c'est en fait un exercice assez académique. L'UIT-R définit les débits de données de pointe comme le débit de données maximal réalisable dans des conditions idéales, ce qui signifie que les dégradations d'une mise en œuvre ou l'impact réel d'un déploiement en termes de propagation, etc. n'entrent pas en jeu [70-73].

Il s'agit d'un indicateur de performance clé (KPI) dépendant en ce sens qu'il dépend fortement de la quantité de spectre disponible pour un déploiement d'opérateur. En dehors de cela, le débit de données de crête dépend de l'efficacité spectrale de crête, qui est le débit de données de crête normalisé par la bande passante:

Débit de données maximal = bande passante du système × efficacité spectrale maximale.

Etant donné que de grandes largeurs de bande ne sont réellement disponibles dans aucune des bandes IMT existantes au-dessous de 6 GHz, on s'attend à ce que des débits de données vraiment élevés soient plus facilement atteints à des fréquences plus élevées. Cela conduit à la conclusion que les débits de données les plus élevés peuvent être obtenus dans des environnements intérieurs et de points chauds, où les propriétés de propagation les moins favorables à des fréquences plus élevées sont moins importantes [75].

Le débit de données expérimenté par l'utilisateur est le débit de données qui peut être atteint sur une large zone de couverture pour une majorité d'utilisateurs. Cela peut être évalué comme le 95e centile de la distribution des débits de données entre les utilisateurs.

C'est également une capacité dépendante, non seulement du spectre disponible, mais également de la façon dont le système est déployé. Alors qu'un objectif de 100 Mbit / s est fixé pour une couverture étendue dans les zones urbaines et suburbaines, on s'attend à ce que les systèmes 5G puissent offrir un débit de données de 1 Gbit / s de manière omniprésente dans les environnements intérieurs et de points chauds.

L'efficacité spectrale donne le débit moyen de données par Hz de spectre et par « cellule », ou plutôt par unité d'équipement radio (également appelé point de réception d'émission, TRP).

C'est un paramètre essentiel pour le dimensionnement des réseaux, mais les niveaux atteints avec les systèmes 4G sont déjà très élevés. L'objectif a été fixé à trois fois l'objectif d'efficacité spectrale de la 4G, mais l'augmentation réalisable dépend fortement du scénario de déploiement.

La capacité de trafic de zone est une autre capacité dépendante, qui dépend non seulement de l'efficacité du spectre et de la bande passante disponible, mais également de la densité du réseau déployé [73-76]:

$$\text{Capacité de trafic de zone} = \text{efficacité spectrale} \times \text{BW} \times \text{densité TRP}.$$

En supposant la disponibilité de plus de spectre à des fréquences plus élevées et que des déploiements très denses peuvent être utilisés, un objectif d'une multiplication par 100 par rapport à la 4G a été fixé pour les IMT-2020.

L'efficacité énergétique des réseaux est, comme déjà décrit, une capacité de plus en plus importante. L'objectif global déclaré par l'UIT-R est que la consommation d'énergie du réseau

d'accès radio des IMT-2020 ne devrait pas être supérieure à celle des réseaux IMT déployés aujourd'hui, tout en offrant des capacités améliorées.

L'objectif signifie que l'efficacité énergétique du réseau en termes d'énergie consommée par bit de données doit donc être réduite d'un facteur au moins aussi important que l'augmentation du trafic envisagée des IMT-2020 par rapport aux IMT avancés.

Ces cinq premières capacités clés sont de la plus haute importance pour le scénario d'utilisation améliorée du haut débit mobile, bien que la mobilité et les capacités de débit de données n'aient pas la même importance simultanément.

Par exemple, dans les points chauds, un débit de données de pointe et d'expérience utilisateur très élevé, mais une mobilité plus faible, serait nécessaire que dans le cas d'une couverture étendue.

La latence est définie comme la contribution du réseau radio entre le moment où la source envoie un paquet et le moment où la destination reçoit. Ce sera une capacité essentielle pour le scénario d'utilisation d'URLLC et l'UIT-R envisage qu'une réduction de 10 fois de la latence des IMT-avancées est nécessaire.

La mobilité s'inscrit dans le contexte de capacités clés définies uniquement comme la vitesse mobile, et l'objectif de 500 km / h est envisagé en particulier pour les trains à grande vitesse et ne représente qu'une augmentation modérée par rapport à l'IMT avancé.

En tant que capacité clé, elle sera cependant également essentielle pour le scénario d'utilisation d'URLLC en cas de communication de véhicule critique à haute vitesse et sera alors d'une grande importance simultanément avec une faible latence. Notez que la mobilité et les débits de données élevés expérimentés par l'utilisateur ne sont pas ciblés simultanément dans les scénarios d'utilisation.

La densité de connexion est définie comme le nombre total d'appareils connectés et / ou accessibles par unité de surface. L'objectif est pertinent pour le scénario d'utilisation M-MTC avec une densité élevée d'appareils connectés, mais un bureau intérieur dense EMBB peut également donner une densité de connexion élevée. En plus des huit capacités indiquées dans la figure III.6, il existe cinq capacités supplémentaires [73]:

- Flexibilité du spectre et de la bande passante
- La flexibilité du spectre et de la bande passante fait référence à la flexibilité de la conception du système pour gérer différents scénarios, et en particulier à la capacité de fonctionner à différentes gammes de fréquences, y compris des fréquences plus élevées et des bandes passantes de canaux plus larges qu'aujourd'hui.
- Fiabilité
- La fiabilité concerne la capacité à fournir un service donné avec un très haut niveau de disponibilité.
- Résilience
- La résilience est la capacité du réseau à continuer de fonctionner correctement pendant et après une perturbation naturelle ou d'origine humaine, telle que la perte de l'alimentation secteur.
- Sécurité et confidentialité
- La sécurité et la confidentialité font référence à plusieurs domaines tels que le cryptage et la protection de l'intégrité des données et de la signalisation des utilisateurs, ainsi que la confidentialité des utilisateurs finaux empêchant le suivi des utilisateurs non autorisés et la protection du réseau contre le piratage, la fraude, le déni de service, les attaques de l'homme du milieu, etc.
- Durée de vie opérationnelle
- La durée de vie opérationnelle fait référence au temps de fonctionnement par capacité d'énergie stockée. Ceci est particulièrement important pour les dispositifs de type machine nécessitant une très longue durée de vie de la batterie (par exemple plus de 10 ans) dont la maintenance régulière est difficile pour des raisons physiques ou économiques.

Notez que ces capacités ne sont pas nécessairement moins importantes que les capacités de la figure III.6 bien que ces dernières soient appelées « capacités clés ». La principale différence est que les capacités clés sont plus facilement quantifiables tandis que les cinq capacités restantes sont davantage des capacités qualitatives qui ne peuvent pas être facilement quantifiées [68-70].

III.6.3 Études de la 5G dans les groupes régionaux et opérateurs

Comme indiqué précédemment, le moteur d'une nouvelle génération de systèmes mobiles est cette fois non seulement une évolution envisagée des services mobiles à large bande qui nécessiteraient des débits de données plus élevés, des retards plus faibles et une demande de

capacité plus élevée, mais aussi de nouveaux scénarios d'utilisation qui pourraient être de nature plus révolutionnaire.

Une telle évolution est prévue dans les premiers projets de recherche pour la prochaine génération, comme le projet européen METIS. Les exigences des opérateurs de téléphonie mobile, telles que mises en avant par l'alliance des réseaux mobiles de nouvelle génération (NGMN) [76], s'appuient également sur de nouveaux cas d'utilisation similaires et sur l'interaction avec de nouvelles industries comme base de leurs besoins sur la prochaine génération. Les études ont été fournies à l'UIT-R dans le cadre des travaux sur les IMT-2020.

Le projet METIS en Europe a effectué des travaux préliminaires sur l'identification des solutions nécessaires pour l'accès radio de nouvelle génération en [77]. Alors qu'une nouvelle évolution des réseaux actuels peut répondre à de nombreuses nouvelles demandes grâce à une approche évolutive, METIS a identifié des défis qui nécessiteraient également une approche disruptive pour gérer une « explosion de trafic » en termes d'utilisation accrue de la communication mobile et en plus une extension à une nouvelle application. Des champs. Cinq défis principaux ont été identifiés qui correspondaient chacun à des scénarios spécifiques [77-78]:

- « Incroyablement rapide » est un scénario dans lequel la connectivité instantanée donne à l'utilisateur un comportement « flash » lors de l'utilisation du réseau mobile pour le travail ou l'info divertissement. Le défi réside dans les débits de données très élevés requis, ce qui implique également que de très gros volumes de données seront échangés.
- « Excellent service dans une foule » implique un scénario avec un accès Internet sans fil dans des endroits à forte densité d'utilisateurs dans une grande foule, comme dans un stade. Le défi dans de tels scénarios sera la haute densité des appareils communicants, en plus des débits et des volumes de données élevés.
- « Les objets omniprésents communiquent » est un scénario qui va au-delà de la communication centrée sur l'humain, se concentrant sur le MTC, parfois également appelé Internet des objets (IoT). Ces appareils connectés seront souvent simples, tels que des capteurs de température, mais il peut y en avoir beaucoup dans des déploiements massifs. Le défi sera alors la durée de vie de la batterie, le coût et juste le grand nombre d'appareils lui-même.
- « La meilleure expérience qui vous suit » est un scénario envisageant une expérience utilisateur cohérente et fiable de haute qualité pour l'utilisateur entièrement mobile, que vous soyez chez vous, que vous marchiez dans la rue ou que vous voyagiez en train.

Cela pourrait également s'appliquer à la communication machine dans, par exemple, des véhicules. Le défi ici est la mobilité, en combinaison avec l'expérience de haute qualité.

- « Connexions super temps réel et fiables » est un scénario ciblant la communication machine à machine, où une très faible latence de bout en bout doit être garantie avec une très grande fiabilité. Des exemples sont les applications industrielles et la communication de véhicule à véhicule impliquant la sécurité. Le défi sera de fournir la faible latence avec une probabilité très élevée.

Ces cinq scénarios ne sont pas mutuellement exclusifs, mais offrent une large couverture des applications possibles de la 5G.

Le groupe d'opérateurs mobiles NGMN Alliance a publié un livre blanc sur la 5G [76] dans lequel les exigences relatives aux systèmes mobiles de nouvelle génération sont analysées pour un total de 24 cas d'utilisation différents, répartis en 14 catégories et 8 familles.

Les cas d'utilisation correspondent en général à des scénarios similaires à ceux proposés par le projet METIS. Une différence notable est que la « diffusion » est présentée par NGMN comme une catégorie de cas d'utilisation distincte. Pour chaque catégorie de cas d'utilisation, un ensemble d'exigences est défini par NGMN [76-77].

Un autre groupe d'opérateurs qui a également produit un livre blanc sur la 5G est 5G Americas (L'organisation était auparavant connue sous le nom de 4G Americas) [78], où cinq moteurs de marché et cas d'utilisation sont identifiés pour la 5G. En plus des scénarios déjà identifiés pour l'Internet des objets et le haut débit mobile extrême, y compris les jeux et la vidéo extrême, La 5G Amériques insiste également sur les besoins des opérations de sécurité publique en matière de communications vocales et de données essentielles à la mission et sur la tâche de l'écosystème 5G de remplacer également le réseau fixe (RTPC) par le haut débit sans fil. Un autre cas d'utilisation identifié par 5G Americas est celui des appareils sensibles au contexte, en tant que nouveau modèle de service répondant au besoin de l'utilisateur final de trouver des informations pertinentes dans la quantité toujours croissante d'informations disponibles [78-79].

Il existe également plusieurs groupes régionaux qui ont contribué aux exigences du système mobile de nouvelle génération, tels que le Forum 5G en Corée et l'ARIB 2020 Beyond AdHoc au Japon, et le groupe de promotion IMT-2020 (5G) en Chine. Ce dernier a publié un livre blanc [79] avec une vision globale très proche de celle proposée par les opérateurs et les groupements régionaux. Il identifie une utilisation plus large de la 5G qui pénétrera tous les éléments de la

société future, non seulement grâce à une utilisation étendue du haut débit mobile, mais aussi en « connectant tout » et en assurant une interconnexion entre les personnes et les choses. Un aspect particulièrement souligné est la durabilité des futurs réseaux, où l'efficacité énergétique sera un paramètre essentiel.

III.7 Technologies une contre plusieurs: « network slicing »

Le très large éventail d'applications et de cas d'utilisation à traiter par l'accès sans fil 5G a soulevé la question de savoir si cela devrait être réalisé avec une seule solution d'accès radio 5G ou s'il fallait plutôt développer un ensemble de solutions d'accès radio adressant différents groupes de applications [72-74].

L'optimisation de la solution d'accès radio vers un groupe spécifique d'applications avec un espace d'exigence plus limité peut évidemment conduire à une solution plus efficace pour ces applications spécifiques.

Dans le même temps, il y a des avantages évidents à pouvoir prendre en charge une gamme d'applications aussi large que possible avec la même technologie de base et dans un pool de spectre commun. Plus important encore, il existe encore un degré élevé d'incertitude sur ce qui sera vraiment les nouvelles applications sans fil les plus importantes et les plus réalisables économiquement à l'ère de la 5G. Développer une technologie et déployer un système ciblant spécifiquement un groupe limité d'applications implique donc un risque important du point de vue de l'opérateur. En développant et en déployant une technologie qui peut être utilisée pour un large éventail d'applications différentes, ce risque sera considérablement réduit [77].

On peut faire un parallèle avec l'introduction de la 3G il y a environ 15 ans. À cette époque, il y avait encore un degré élevé d'incertitude sur le potentiel réel du haut débit mobile. Cependant, les technologies 3G ont également pu prendre en charge le service vocal avec un rendement élevé, ce qui a motivé en soi le déploiement des réseaux 3G. Le haut débit mobile pourrait alors être introduit progressivement avec un investissement supplémentaire limité.

Ainsi, il existe un consensus relativement large au sein de l'industrie et en particulier parmi les opérateurs sur le fait que l'objectif devrait être de développer une solution d'accès radio 5G flexible unique capable de traiter autant d'applications et de cas d'utilisation que possible.

En relation avec cela, le concept de découpage de réseau a été introduit. Comme indiqué dans la figure III.8, le découpage de réseau implique que les techniques de virtualisation sont utilisées

pour créer plusieurs réseaux virtuels, ou tranches de réseau, au-dessus de la même infrastructure physique et d'un pool de spectre commun [70-72].

Par exemple, on peut créer une tranche de réseau pour le haut débit mobile, une autre tranche de réseau ciblant les applications MTC massives, une autre tranche de réseau optimisée pour l'automatisation industrielle, et ainsi de suite. Chaque tranche de réseau apparaîtra, de l'extérieur, comme un réseau indépendant avec ses propres ressources et ses propres capacités optimisées pour l'ensemble des applications ciblées par la tranche.

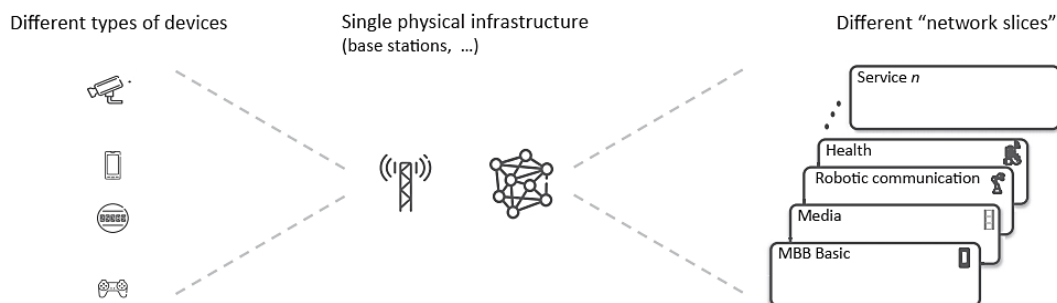


Figure III.8 Tranchage de réseau créant plusieurs réseaux virtuels pour différentes applications et différents cas d'utilisation au-dessus d'une infrastructure physique commune et d'un pool de spectre commun [72]

III.8 Spectre 5G

Le spectre est l'un des piliers fondamentaux de la communication sans fil, et l'histoire de la communication mobile a consisté dans une large mesure à étendre la quantité de spectre disponible et à introduire une nouvelle technologie permettant une utilisation plus efficace du spectre disponible.

III.8.1 EXPANSION DANS DES BANDES DE FRÉQUENCES PLUS ÉLEVÉES

Comme l'illustre la figure III.9, chaque génération de communications mobiles a élargi la gamme de spectre dans laquelle la technologie d'accès sans fil peut fonctionner dans des bandes de fréquences plus élevées [79-80]:

- Les systèmes de première génération étaient limités aux opérations en dessous de 1 GHz.
- Les systèmes de deuxième génération ont été initialement déployés en dessous de 1 GHz, mais ont ensuite été étendus aux bandes 1,8 / 1,9 GHz.
- Le déploiement initial des systèmes 3G pour la première fois a étendu la communication mobile au-dessus de 2 GHz, plus spécifiquement dans les bandes de base dites IMT autour de 2,1 GHz.

- LTE a été déployé pour la première fois dans la bande 2,5 GHz et s'est récemment étendu à des bandes de fréquences aussi élevées que 3,5 GHz environ.

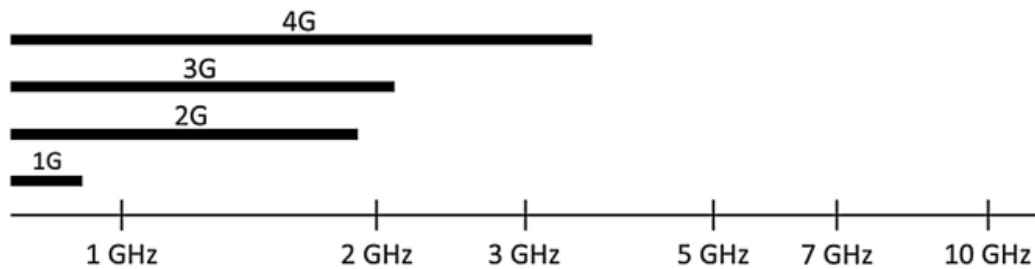


Figure III.9 Gamme de spectre étendue de 1G à 4G [72]

Il convient de noter que l'expansion vers des bandes de fréquences plus élevées n'implique en aucun cas que les générations ultérieures ne peuvent pas être déployées dans des bandes de fréquences plus basses. Par exemple, bien que le LTE se soit étendu dans des bandes de fréquences plus élevées au-dessus de 3 GHz, il existe des réseaux basés sur LTE fonctionnant à des fréquences basses comme 450 MHz. Le principal avantage du fonctionnement dans les bandes de fréquences inférieures est une meilleure couverture permettant à une zone donnée d'être couverte par moins d'infrastructures (stations de base). L'expansion vers des bandes de fréquences plus élevées, d'autre part, est principalement motivée par un besoin de plus de spectre offrant une capacité de système plus élevée pour gérer les volumes de trafic en constante augmentation [73].

La tendance à utiliser des bandes de fréquences plus élevées se poursuivra et sera encore plus prononcée à l'ère de la 5G. On s'attend déjà à ce que la première phase de l'accès sans fil 5G prenne en charge le fonctionnement dans le spectre jusqu'à environ 30 GHz, c'est-à-dire bien dans la gamme des ondes millimétriques (À proprement parler, la bande d'onde mm commence à 30 GHz (longueur d'onde de 10 mm). Cependant, les fréquences déjà au-dessus de 10 GHz, ou dans certains cas déjà au-dessus de 6 GHz, font l'objet de discussions quotidiennes souvent appelées « fréquences MMW ») [73, 75-77].

Les phases ultérieures pourraient étendre encore plus cela, jusqu'à 60-70 GHz et peut-être même plus. Notez que cela implique une étape beaucoup plus grande en termes d'adressage de nouvelles gammes de spectre, par rapport aux étapes générationnelles précédentes. De la première génération à la quatrième génération, la limite supérieure de la bande de fréquence de fonctionnement est passée d'un peu moins de 1 GHz à un peu plus de 3,5 GHz, soit environ un facteur de 4. En comparaison, la première phase de la 5G est déjà devrait augmenter la limite supérieure de la bande de fréquences de fonctionnement de près d'un facteur 10 par rapport à la

gamme de fréquences actuellement prise en charge par LTE. Une conséquence directe de cela est que, par rapport aux changements de génération précédents, il y a beaucoup plus d'incertitude en termes de caractéristiques du spectre lors de l'entrée dans l'ère de la 5G.

Les bandes de fréquences plus élevées, en particulier au-delà de 10 GHz, ont longtemps été considérées comme inadaptées aux communications mobiles en raison de la très forte perte de propagation et de la portée limitée correspondante. Une raison à cela a été une hypothèse implicite que les dimensions de la configuration de l'antenne correspondent à la longueur d'onde, ce qui implique que le fonctionnement dans des bandes de fréquences plus élevées conduit à une zone d'antenne effective beaucoup plus petite et donc moins d'énergie reçue capturée. Dans le même temps, la plus petite taille des éléments d'antenne permet également d'utiliser plus d'éléments d'antenne pour une taille donnée de la configuration d'antenne globale. En appliquant de nombreux petits éléments d'antenne du côté du récepteur, la zone d'antenne de réception efficace globale peut être maintenue constante en évitant la perte d'énergie capturée. Une autre manière de décrire cela est de dire que la plus grande surface d'antenne par rapport à la longueur d'onde permet une formation de faisceau côté récepteur plus étendue ou, de manière équivalente, un gain d'antenne efficace plus élevé du côté récepteur [77].

En supposant des configurations multi-antennes et une possibilité associée de formation de faisceaux également du côté de l'émetteur, on pourrait même affirmer que, pour une taille physique donnée des configurations d'antennes globales, le fonctionnement dans des bandes de fréquences plus élevées peut en fait permettre une portée étendue, en supposant des conditions de propagation en visibilité directe.

C'est la raison principale de l'utilisation de bandes de fréquences plus élevées dans la gamme de 10 GHz à 100 GHz pour les liaisons radio point à point. Cependant, ceci n'est valable que pour les conditions de visibilité directe. Dans des scénarios de la vie réelle, avec des conditions sans visibilité directe, le besoin de propagation de l'extérieur vers l'intérieur, etc., la propagation radio est sans aucun doute plus difficile dans les bandes de fréquences plus élevées au-dessus de 10 GHz par rapport, par exemple, au fonctionnement dans la bande 2 GHz.

À titre d'exemple, la communication mobile repose fortement sur la diffraction, c'est-à-dire la propriété qu'une onde radio « se plie » autour des coins pour permettre la connectivité dans des emplacements sans visibilité directe. La quantité de diffraction est réduite au fur et à mesure que la fréquence de fonctionnement augmente, ce qui rend plus difficile la couverture des emplacements ombragés. Néanmoins, des études récentes [75] ont montré qu'une couverture

jusqu'à quelques 100 m est également possible dans des conditions hors ligne de vue au moins jusqu'à environ 30 GHz, en supposant une utilisation correcte de la formation de faisceaux. Une des raisons est que la diffraction dégradée à des fréquences plus élevées est au moins partiellement compensée par des réflexions plus fortes [76].

Cependant, il existe également d'autres facteurs qui ont un impact sur la propagation et limitent l'utilisation de fréquences plus élevées pour les communications mobiles. L'un de ces facteurs est la perte de pénétration du bâtiment. La plupart des stations de base, y compris les stations de base de faible puissance dans les déploiements denses, sont situées à l'extérieur. Dans le même temps, la plupart des utilisateurs sont situés à l'intérieur, ce qui rend une bonne couverture extérieure-intérieure essentielle pour de nombreux déploiements. Cependant, la perte de pénétration du bâtiment dépend généralement de la fréquence avec, en général, une augmentation de la perte de pénétration et, par conséquent, une couverture extérieure-intérieure dégradée lorsque la fréquence porteuse augmente, voir par exemple [80].

Il convient de noter que la perte de pénétration dans le bâtiment dépend du type de matériau de construction. Il peut également être fortement impacté par le type de fenêtres utilisées. Les bâtiments modernes, en particulier les immeubles de bureaux, sont souvent équipés de fenêtres en verre à réflexion infrarouge (IRR) pour des raisons d'économie d'énergie. Cependant, ces fenêtres ont également une perte de pénétration plus élevée, ce qui entraîne une dégradation supplémentaire de la couverture extérieure-intérieure. Notez qu'il s'agit d'un effet général non seulement lié au fonctionnement à haute fréquence [80-81].

Les facteurs supplémentaires ayant un impact sur la propagation à des fréquences plus élevées comprennent l'atténuation atmosphérique, la décoloration due à la pluie, l'atténuation du feuillage et la perte de corps. Bien qu'étant très importants, par exemple, pour les liaisons radio, les deux premiers sont moins pertinents pour les distances de liaison relativement courtes envisagées pour la communication mobile sur les hautes fréquences. D'autre part, l'atténuation du feuillage et la perte de corps sont très pertinentes dans le scénario de communication mobile [81-82].

Un autre facteur limitant la couverture aux fréquences plus élevées est la réglementation sur la puissance d'émission autorisée pour les fréquences supérieures à 6 GHz, en raison de la réglementation internationale actuelle, la puissance d'émission maximale à des fréquences plus élevées peut être jusqu'à 10 dB inférieure aux niveaux de puissance maximaux des technologies

cellulaires actuelles. Cela pourrait toutefois changer avec les futures mises à jour de la réglementation [76-80].

Dans l'ensemble, cela signifie que les bandes de fréquences inférieures resteront l'épine dorsale de la communication mobile également à l'ère de la 5G, fournissant des services 5G avec une couverture étendue. Cependant, les bandes de fréquences inférieures seront complétées par des fréquences plus élevées, y compris des bandes de fréquences supérieures à 10 GHz, pour une capacité de trafic très élevée et des débits de données très élevés, mais principalement dans les déploiements denses à l'extérieur et à l'intérieur [72-76].

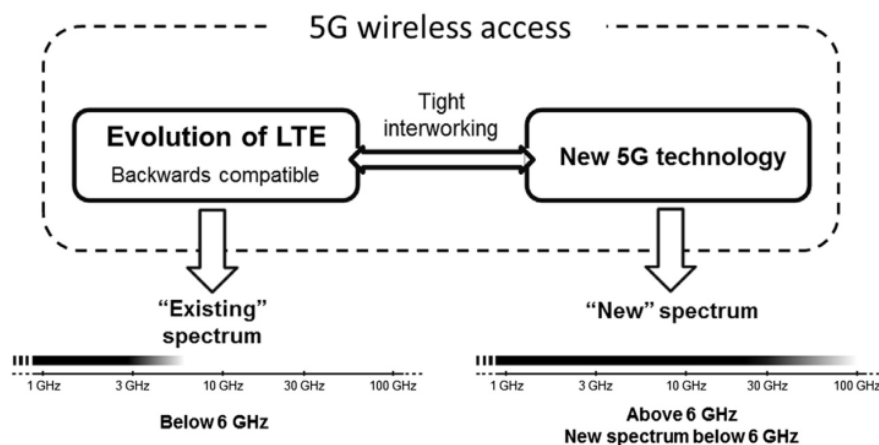


Figure III.10 Solution globale d'accès sans fil 5G consistant en l'évolution du LTE en combinaison avec une nouvelle technologie d'accès radio 5G [72]

En revanche, le concept de 5G est beaucoup plus associé au type d'applications et de cas d'utilisation envisagés qu'à une technologie spécifique. Plus précisément, le terme 5G est très associé aux nouveaux cas d'utilisation envisagés à l'ère de la 5G [72-73].

Néanmoins, il est clair que de nombreuses applications et cas d'utilisation envisagés pour l'ère 5G peuvent être bien soutenus par l'évolution du LTE. Ainsi, il existe un point de vue relativement bien accepté selon lequel l'évolution du LTE devrait en fait être considérée comme faisant partie de la solution globale d'accès sans fil 5G, voir la figure III.10. L'avantage de pouvoir fournir une partie substantielle des applications et des cas d'utilisation 5G grâce à l'évolution du LTE est que ces applications et cas d'utilisation peuvent ensuite être fournis dans le spectre existant tout en prenant en charge les appareils hérités de ce spectre (rétrocompatibilité) [78-82].

Cependant, parallèlement à l'évolution du LTE, il y aura également le développement d'une nouvelle technologie d'accès radio 5G non contrainte par la rétrocompatibilité. Cette

technologie ciblera au moins initialement un nouveau spectre à la fois au-dessus et au-dessous de 6 GHz. Dans une perspective à plus long terme, la nouvelle technologie d'accès radio 5G pourrait également migrer vers le spectre actuellement utilisé par d'autres technologies, y compris le LTE [87].

La possibilité d'un interfonctionnement étroit entre l'évolution du LTE et la nouvelle technologie d'accès radio 5G sera dans de nombreux cas critique pour l'introduction de la nouvelle technologie d'accès radio. A titre d'exemple, la nouvelle technologie d'accès radio 5G peut être déployée dans une couche très dense fonctionnant sur des fréquences plus élevées. Une telle couche peut prendre en charge des volumes de trafic très importants et un débit de données utilisateur final très élevé. Cependant, il sera intrinsèquement moins fiable car les dispositifs peuvent facilement tomber hors de la couverture d'une telle couche. En offrant la possibilité d'une connectivité simultanée à une macro-couche basée sur LTE fonctionnant sur des fréquences plus basses, la fiabilité de la connectivité globale peut être considérablement améliorée [83].

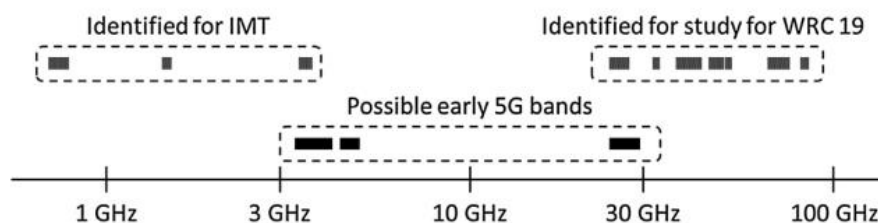


Figure III.11 Spectre identifié par la CMR 15 et spectre pris en compte pour les premiers déploiements 5G [72]

III.9 Bandes de fréquence pour les déploiements initiaux 5G

Il n'est pas encore décidé exactement quelles bandes de fréquences seront utilisées pour la nouvelle technologie d'accès radio 5G.

la CMR-15 a identifié un ensemble de bandes de fréquences inférieures à 6 GHz comme nouvelles bandes de fréquences pour les IMT, voir la figure III.11. La CMR-15 a également identifié un ensemble de bandes de fréquences au-dessus de 10 GHz à étudier en tant que nouveau spectre IMT potentiel pour la CMR-19 [83].

Ces bandes sont clairement des candidates pour la nouvelle technologie d'accès radio 5G. Cependant, le déploiement initial de la nouvelle technologie d'accès radio 5G peut également avoir lieu dans d'autres bandes en fonction des décisions des régulateurs régionaux / nationaux. À ce jour, deux gammes de fréquences sont principalement discutées dans le contexte du

déploiement précoce de la nouvelle technologie d'accès radio 5G, voir Figure III.11. Elles sont [80]:

- Fréquences dans la gamme 3,3e4,2 GHz et 4,4e4,99 GHz;
- Fréquences dans la gamme 24,25e29,5 GHz.

Il convient de noter que ces gammes de fréquences ne coïncident qu'en partie avec les bandes de spectre identifiées à la CMR'15 ou à l'étude pour la CMR'19.

III.10 Spécifications techniques 5G

La nouvelle technologie d'accès radio soit développée afin de répondre à un besoin de nouvelles capacités, le développement du 3GPP 5G doit également prendre en compte le calendrier de l'UIT-R pour les IMT-2020. Dans un premier temps, un élément d'étude dans le 3GPP développera les exigences pour la nouvelle technologie d'accès radio 5G et un élément d'étude parallèle développera les aspects techniques. Cela se déroule en parallèle avec la phase des exigences dans l'UIT-R, comme le montre la figure III.12.

Pour s'aligner sur le calendrier de l'UIT-R (Figure III.3), le 3GPP doit disposer d'une description technologique de haut niveau de la nouvelle technologie d'accès radio 5G disponible au second semestre 2018 pour soumission à l'UIT-R en tant que candidat à l'IMT- 2020. Les spécifications techniques détaillées doivent ensuite être prêtes à la fin de 2019 pour permettre leur inclusion dans les spécifications IMT-2020 qui seront publiées par l'UIT-R à l'automne 2020 [79-81].

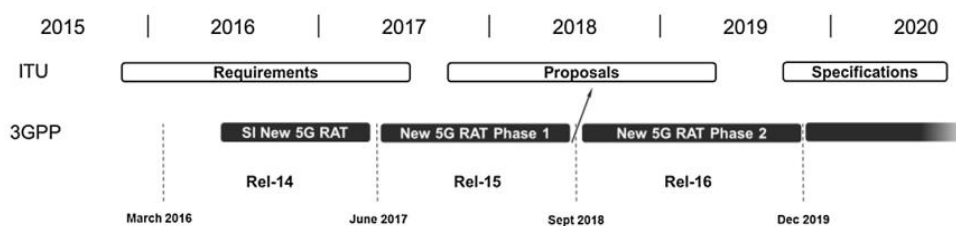


Figure III.12 Calendrier de l'UIT-R et approche par étapes 3GPP de la 5G [72]

Cependant, le développement 3GPP d'une nouvelle technologie d'accès radio 5G n'est pas uniquement motivé par le plan temporel de l'UIT-R. En fait, il est devenu de plus en plus évident que, dans certains pays / régions, on souhaite que la nouvelle technologie 5G soit disponible encore plus tôt que ce que prévoit le calendrier de l'UIT-R. Plus précisément, certains pays et régions ont exprimé un fort désir de disposer d'une nouvelle technologie 5G en exploitation commerciale en 2020. Pour laisser suffisamment de temps pour le développement réel du produit, cela nécessite que des spécifications techniques détaillées soient disponibles dès 2018.

Pour satisfaire ces demandes, le 3GPP a décidé d'une approche par étapes de la spécification 5G, comme indiqué dans la figure III.12.

- La première phase avec des fonctionnalités limitées mais satisfaisant le désir de spécifications techniques disponibles en 2018 permettant ainsi une exploitation commerciale en 2020.
- Une deuxième phase répondant à toutes les exigences IMT-2020 et disponible à temps pour la spécification UIT-R en 2020.

Bien qu'il y ait eu des discussions approfondies sur l'approche 3GPP en deux phases, il faut comprendre que le développement de la nouvelle technologie d'accès radio 5G ne se terminera pas avec la phase 2. De la même manière que toute technologie 3GPP, il y aura une séquence des versions, chacune ajoutant des fonctionnalités supplémentaires à la technologie [84-86].

On peut remarquer que les travaux techniques 3GPP commenceront avant même que les exigences de l'UIT-R pour les IMT-2020 aient été finalisées. Cependant, dès le début des activités techniques du 3GPP, on comprend relativement bien où aboutiront ces exigences. De plus, le 3GPP ne s'appuie pas uniquement sur l'UIT-R pour développer les exigences de la nouvelle technologie d'accès radio 5G. Au contraire, le 3GPP développe ses propres exigences 5G sur la base des contributions de tous les membres du 3GPP, y compris les opérateurs, les fournisseurs d'appareils et de réseaux, et d'autres organisations, par exemple NGMN [83].

Afin de garantir que la technologie d'accès radio 5G satisfera à toutes les exigences des IMT-2020, les exigences 3GPP doivent inclure, mais peuvent être un sur-ensemble, des exigences de l'UIT-R. Une autre façon d'exprimer cela est de dire qu'une exigence importante pour que la nouvelle technologie 5G soit développée par 3GPP est qu'elle doit répondre à toutes les exigences des IMT-2020 telles que définies par l'UIT-R [87].

III.11 Conclusion

Le haut débit mobile est et continuera d'être une partie importante de la future communication cellulaire, mais les futurs réseaux sans fil concernent également dans une large mesure une gamme de cas d'utilisation beaucoup plus large. En substance, la 5G doit être considérée comme une plate-forme permettant une connectivité sans fil à tous les types de services, existants et futurs, des services non encore connus, et prenant ainsi les réseaux sans fil au-delà du haut débit mobile. La connectivité sera fournie pratiquement n'importe où, n'importe quand à n'importe

qui et n'importe quoi. Le terme société en réseau est parfois utilisé pour désigner un tel scénario où la connectivité va au-delà des smartphones mobiles, ayant un impact profond sur la société.

La communication massive de type machine, illustrée par les réseaux de capteurs dans l'agriculture, la surveillance du trafic et la gestion à distance des équipements utilitaires dans les bâtiments, est un type d'applications à large bande non mobiles. Ces applications exigent principalement une très faible consommation d'énergie des appareils, tandis que les débits de données et les quantités de données par appareil sont modestes. Beaucoup de ces applications peuvent déjà être prises en charge par l'évolution LTE.

**CHAPITRE IV: Cooperative Protocol
Software Defined Networking
(CP-SDN)**

CHAPITRE IV: Cooperative Protocol Software Defined Networking (CP-SDN)

IV.1 Introduction

Les réseaux mobiles d'aujourd'hui sont confrontés à des défis importants en termes de gestion du volume toujours croissant de trafic de données mobiles. Pour répondre à cette demande, la capacité du réseau doit être augmentée malgré les coûts de construction, de maintenance et de mise à niveau de l'accès radio réseaux. D'autre part, les opérateurs mobiles s'orientent de plus en plus vers le concept des petites cellules (par exemple les femtocellules) pour faire face à la pénurie de la capacité, notamment dans les zones urbaines denses ainsi pour assurer une bonne couverture radio dans les zones à faible niveau de signal.

Cela se traduira par une augmentation croissante des réseaux mobiles et des réseaux Wi-Fi, de petites cellules cellulaires et stations de base traditionnelles, et mène à de nouveaux défis en termes d'optimisation des ressources et de l'accès des utilisateurs aux réseaux [90].

En d'autres termes, les réseaux 4G / LTE épurent l'architecture du backhaul mobile en deux parties distinctes à savoir :

- a. Un plan de données de paquets uniquement, composé d'une station de base (eNodeB), serveur de passerelles (S-GW) et une passerelle de réseau de données par paquets (P-GW)
- b. Un plan de gestion de mobilité (MME), de la politique et des règles de tarification (PCRF) ainsi que de la base locale des abonnés (HSS).

Bien que cette répartition ait montré une meilleure efficacité de gestion, la variété des applications futures ainsi que leurs différentes contraintes soulèvent un autre défi que le réseau doit satisfaire. Additivement, la gestion des milliers de sites cellulaires et une infrastructure étendue du réseau demeure une tâche ardue et nécessite une nouvelle réflexion afin d'implémenter des techniques qui permettent de faire face à cette croissance.

Bien que les réseaux mobiles d'aujourd'hui tiennent en partie de ces considérations, les défis sont plus néfastes et les contraintes des applications spécifiques exigent l'amélioration de la gestion et du contrôle du réseau. Aussi, il la croissance de la surcharge du réseau, la lourdeur de la signalisation et le problème de convergence ne peuvent être résolus par l'architecture actuelle de réseau via un contrôle centralisé [88, 90].

Après leur introduction initiale, chaque technologie d'accès radio cellulaire est passée par une séquence d'étapes évolutives ajoutant de nouvelles fonctionnalités qui fournissent des performances améliorées et de nouvelles capacités à la technologie. Des exemples de ces évolutions incluent l'évolution du GSM vers EDGE, l'évolution du WCDMA vers le HSPA et les différentes étapes de l'évolution du LTE. En général, ces étapes évolutives ont été rétro compatibles, ce qui implique qu'un appareil hérité peut toujours accéder au réseau sur une fréquence porteuse prenant en charge les nouvelles fonctionnalités, bien qu'il puisse évidemment ne pas pouvoir profiter pleinement des fonctionnalités en tant que telles.

Pour le nouveau 5G RAT, la possibilité de faire évoluer la technologie au-delà de sa version initiale sera encore plus importante [86]:

- Comme décrit dans le chapitre précédent, la 5G est conçue pour prendre en charge un large éventail de cas d'utilisation différents, dont beaucoup sont encore inconnus. Ainsi, la solution d'accès radio devra être capable d'évoluer et de s'adapter pour englober de nouvelles exigences et de nouvelles caractéristiques de service.
- Comme décrit également dans le chapitre précédent, il y aura une approche par étapes de la spécification 3GPP du nouveau RAT 5G, la phase initiale ayant une portée relativement limitée et une évolution ultérieure garantissant la pleine conformité avec toutes les exigences 5G identifiées.

Il n'est pas nécessaire que le nouveau RAT 5G soit rétro compatible avec les générations précédentes. Cependant, à l'instar des générations précédentes, l'évolution future de la technologie devrait être une rétrocompatibilité avec sa version initiale. Afin de minimiser les contraintes sur cette évolution future, le concept de compatibilité ascendante a été introduit comme une exigence supplémentaire pour la conception du nouveau 5G RAT. Dans ce contexte, la compatibilité ascendante signifie simplement que la conception de la technologie d'accès radioélectrique devrait être telle que les contraintes sur l'évolution future de la technologie, en raison de l'exigence de rétrocompatibilité conservée jusqu'à sa sortie initiale, soient aussi limitées que possible [86-87].

En raison de l'incertitude évidente des caractéristiques et des exigences des applications et des cas d'utilisation nouveaux, encore inconnus, ainsi que de l'incertitude des orientations technologiques futures, la compatibilité ascendante est intrinsèquement difficile à réaliser. Cependant, comme décrit dans les sections suivantes, il existe certains principes qui, s'ils sont suivis, amélioreront au moins la compatibilité ascendante [88].

IV.2 Concept du Plan de données programmable

Avant l'avènement de la 5G, les réseaux mobiles disposait des plans de données et des fonctions réseaux essentiellement basés sur des logiciels propriétaires et qui sont étroitement liés au matériel qui les supporte. Ce qui engendrait un problème de souplesse et de flexibilité dans la gestion du plan de données.

Le concept du plan de données programmable signifie à la possibilité de déployer des équipements matériels facilement modifiables en vue de permettre d'intervenir dynamiquement sur les flux de données. Ceci a pour objectif d'accélérer le déploiement de nouveaux services et d'intégrer de nouvelles technologies réseaux. Ceci-dit, les réseaux actifs (ou active networks) demeurent parmi les premières tendances de cette approche de déploiement des réseaux disposant d'un plan de données programmable. En effet, la mise en réseau actif (ou active networking) est un concept qui est apparu dans le milieu des années 1990 et dont le but principal était de pallier aux problèmes de la lenteur de l'intégration de nouveaux services réseaux et à la rigidité dans le processus de standardisation et de normalisation [89-91].

IV.3 Séparation entre le plan de contrôle et le plan de données

Durant la décennie passée, les opérateurs télécoms avaient toujours à chercher des solutions et des approches afin de mieux contrôler leur trafic de données (traffic engineering). Ainsi, avec le bouleversement d'Internet à grande échelle et la croissance drastique du volume des données, les opérateurs pressentaient un besoin urgent d'intégrer de nouvelles solutions de traffic engineering qui soient plus fiables, efficaces et adaptées à cette évolution, afin de remplacer les approches et les stratégies basées sur des protocoles de routage conventionnels qui demeuraient plus complexes et moins flexibles. Cette complexité des solutions classiques était principalement due au fait que les routeurs IP intégraient des solutions liant étroitement le plan de contrôle et le plan de données. Ceci rendait la configuration, et la maintenance en cas de faille extrêmement compliquées.

Afin de prendre en charge cette problématique, plusieurs recherches ont été menées afin de discerner le plan de contrôle du plan de données. Ces efforts ont permis notamment de développer deux principales innovations [92]:

- Proposer une interface ouverte entre le plan de contrôle et le plan de données, tel le projet ForCES qui définit un framework et un protocole pour standardiser les échanges d'informations entre le plan de contrôle et le plan de données des routeurs IP et des équipements similaires.

- Fournir contrôle logique centralisé, tel est le cas des architectures RCP qui implémentent une solution de routage centralisée. Ainsi, le RCP permet de mettre en œuvre une carte de la topologie physique, d'exécuter des algorithmes sur cette carte, puis de sélectionner les routes BGP préférées pour chaque routeur dans un système autonome.

Il est à noter qu'à l'inverse des projets sur la programmable du plan de données, les projets susmentionnés ont prouvé leur efficacité dans le domaine des réseaux mobile actuels [89].

Un exemple de cette nouvelle tendance est illustré par la Figure IV.1 ci-dessus: [90, 108]

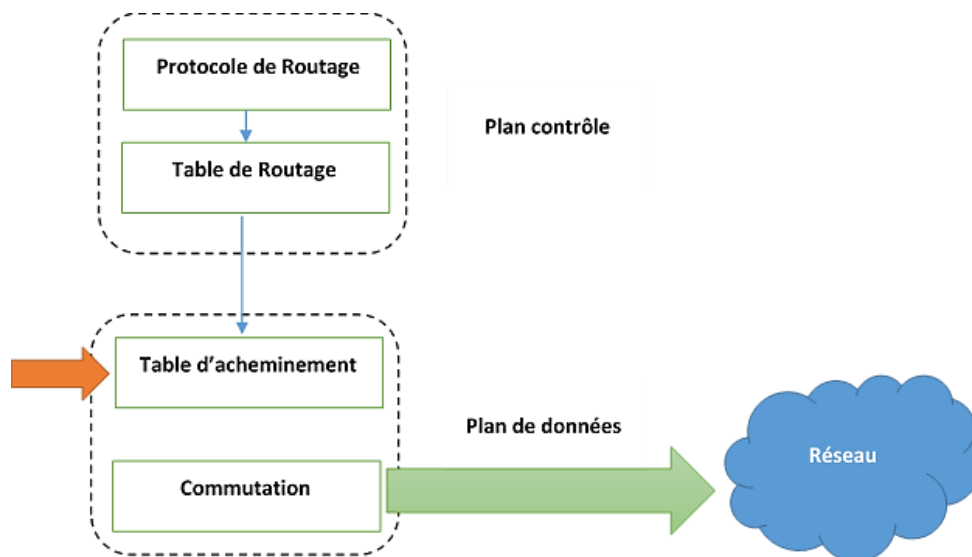


Figure IV.1: Séparation entre le plan de contrôle et le plan de données

L'objectif principal de la technologie SDN (Software Defined Network) réside dans la programmation logicielle des fonctionnalités réseau et leur séparation du plan de gestion basé sur le matériel (transfert de paquets). SDN dans sa nouvelle version conduit à un standard ouvert avec une optimisation des ressources en implémentant le concept de de la virtualisation des fonctionnalités réseaux. Ce nouveau concept peut être le principal problème de déploiement critique que vivent les réseaux mobiles depuis le passage de la technologie analogique 1G à la technologie numérique 2G. Même la perturbation qui avait eu lors du déploiement du LTE demeure moins critique que le déploiement du SDN. Celles-ci sont les principales raisons qui retardent la naissance des solutions SDN et leur déploiement pendant un temps supplémentaire.

La 5G pourrait profiter des fonctionnalités et des avantages de la technologie SDN en combinant d'autres technologies de compactage telles que les ondes millimétriques, le DAS (système d'antenne

distribuée) pour atteindre une capacité de 1000 x, un débit de 100 x et des connexions actives 100x plus que les réseaux LTE existants [91, 5].

Software-Defined Networking (SDN), en tant que technologie émergente, dissocie la logique de transfert des données de la logique de gestion du réseau. Le SDN fait abstraction de toutes les fonctions de gestion dans le contrôleur centralisé, tout en sanctionnant la programmabilité pour le réseau [6, 93].

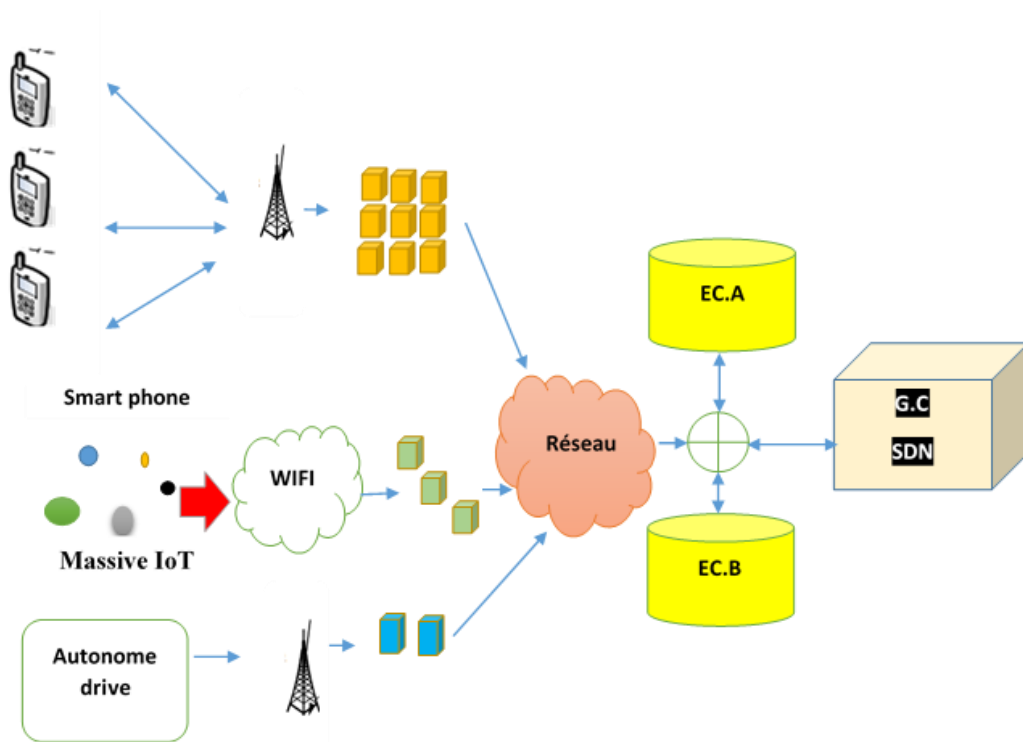


Figure IV.2: Architecture réseau orientée 5G basée sur SDN

Au cours de la dernière décennie, les chercheurs ont montré un intérêt particulier pour les réseaux cellulaires basés sur SDN et leur impact positif sur l'industrie mobile et la sécurité [7].

Le SDN permet de réaliser le découpage du plan de contrôle et de données proposé par DOCOMO (fig 1). En effet, dans sa nature filaire native, SDN se concentre sur le contrôle de découplage et le plan de données du réseau des éléments de transmission, tels que des commutateurs. La communication entre ces entités expéditrices et l'entité de contrôle (c'est-à-dire, le contrôleur) est effectuée par le protocole OpenFlow. En particulier, l'interface dite Southbound permet une gestion des éléments de réseau sous-jacents, alors que les interfaces dites Northbound permettent aux applications pour interagir avec le contrôleur. En conséquence, le plan de données est composé de commutateurs activés par OpenFlow, tandis que le plan de contrôle est effectué par une répartition physiques et logiques des contrôleurs SDN distribués.

Les réseaux mobiles de nouvelle génération peuvent profiter des fonctionnalités et des capacités de cette nouvelle tendance du SDN. Cependant le problème critique demeure l'intégration du SDN dans l'infrastructure réseau existante [92].

IV.4 la virtualisation

Tous les appareils peuvent être virtualisés, à l'exception de ceux qui gèrent la réception de signaux terrestres et sans fil, tels que les signaux électromagnétiques ou la pression atmosphérique. Par exemple, une antenne ne peut pas être remplacé par un logiciel. Cependant, le signal reçu par cette antenne ou ce thermomètre peut être traité par une machine virtuelle. Un capteur captant un signal peut sélectionner une machine virtuelle de traitement appropriée afin d'obtenir un résultat adapté à la demande. Une seule antenne peut, par exemple, recevoir des signaux d'un terminal Wi-Fi ainsi que des signaux d'un terminal 4G. Sur la base du type de signal, une machine virtuelle initiale détermine quelle technologie est utilisée et envoie le signal à la machine virtuelle nécessaire à son traitement. Ceci est connu sous le nom de SDR (Software-Defined Radio), qui est de plus en plus largement utilisé, et nous permet de délocaliser l'opération de traitement vers un centre de données [84].

Les machines réseau que nous connaissons peuvent toujours être virtualisées, complètement ou au moins partiellement. La virtualisation partielle peut correspondre à la partie traitement, la partie contrôle de la partie gestion. Ainsi, aujourd'hui, nous pouvons découpler une machine physique qui, dans le passé, était unique, en plusieurs machines différentes - l'une physique (par exemple un émetteur-récepteur diffusant le long d'un câble métallique) et les autres virtuelles. L'un des avantages de ce découplage est que nous pouvons déporter les pièces virtuelles sur d'autres machines physiques pour exécution. Cela signifie que nous pouvons adapter la puissance des ressources aux résultats que nous souhaitons obtenir. Les opérations provenant de différentes machines physiques peuvent être multiplexées sur la même machine logicielle s'exécutant sur un seul serveur physique. Cette solution nous permet d'économiser sur le coût global du système, ainsi que sur l'énergie dépensée, en regroupant la puissance nécessaire à l'aide d'une seule machine beaucoup plus puissante et plus économique.

Aujourd'hui, toutes les machines héritées du monde des réseaux ont déjà été virtualisées ou sont en cours de virtualisation - Nodes-B pour traiter les signaux des réseaux mobiles 3G, 4G et 5G, HLR et VLR, routeurs, commutateurs, différents types de routeurs / commutateurs tels que ceux de MPLS, pare-feu, serveurs d'authentification ou de gestion d'identité, etc. De plus, ces machines virtuelles peuvent être partitionnées pour s'exécuter sur plusieurs machines physiques en parallèle.

On peut apprécier l'importance du Cloud et des data centers associés car ils sont placés là où la puissance de traitement est disponible à un coût relativement faible, tout comme l'espace mémoire nécessaire pour stocker les machines virtuelles et toute une gamme d'informations relatives aux réseaux, clients et algorithmes de traitement. Au cours des dernières années, avec la virtualisation des serveurs, la tendance a été de se concentrer sur d'énormes centres de données, mais avec l'aide de la distribution, la taille des centres de données diminue. Cette taille varie de plus en plus et certains deviennent de plus en plus petits, devenant des centres de données skin ou femto - data centers, ou encore des datacentersFog et MEC (Mobile EdgeComputing) [84].

Une autre application intéressante de la virtualisation se développe. Il s'agit de jumeaux numériques. Le matériel est associé à une machine virtuelle exécutée dans un centre de données situé à proximité ou loin du matériel. La machine virtuelle exécute exactement ce que fait le matériel. Évidemment, le matériel doit alimenter la machine virtuelle en cas de changement de paramètres. La machine virtuelle doit produire les mêmes résultats que le matériel. Si les résultats ne sont pas similaires, cela montre un dysfonctionnement du matériel, et ce dysfonctionnement peut être étudié en temps réel sur la machine virtuelle. Cette solution permet de repérer les dysfonctionnements en temps réel et, dans la plupart des cas, de les corriger.

Des exemples de jumeaux numériques sont utilisés ou développés tout comme un jumeau de moteur d'avion qui est exécuté dans un centre de données. De même, bientôt, les véhicules auront un jumeau, nous permettant de détecter des dysfonctionnements ou de comprendre un accident. Les fabricants développent des jumeaux numériques pour les objets, mais dans ce cas, la puissance du jumeau numérique peut être beaucoup plus grande et il peut effectuer des actions que l'objet n'est pas assez puissant pour effectuer.

Les scientifiques rêvent de jumeaux numériques humains qui pourraient continuer à fonctionner pendant que l'homme dort [84].

IV.5 Architecture du réseau SDN

SDN est un nouveau paradigme qui définit un concept d'une architecture réseau dont le plan de données est géré à distance par une entité logique centrale. Plus concrètement, une architecture réseau suit le paradigme SDN si elle vérifie ces quatre points fondamentaux [92-93]:

- Le plan de contrôle est complètement découplé du plan de données. Cette séparation est concrétisée au travers de la définition d'une interface de programmation (Southbound API) ouverte, comme est illustré par la figure 1.
- Toute l'intelligence du réseau est externalisée dans un point logiquement centralisé appelé contrôleur SDN. Ce dernier offre une connaissance globale de l'infrastructure physique et des abstractions pour la configuration du réseau.
- Le contrôleur SDN est un composant programmable. Ce dernier peut être vu comme un système d'exploitation réseaux (NOS, Network Operating System) qui expose une API (Northbound API) pour spécifier des applications de contrôle.
- La transmission des paquets ne se fait plus suivant la destination, mais par flux, sachant qu'un flux est défini par un ensemble de champs d'en-têtes. Cela permet notamment d'unifier les différents types d'équipements réseaux qu'on retrouve dans une infrastructure physique tels que les commutateurs et les routeurs.

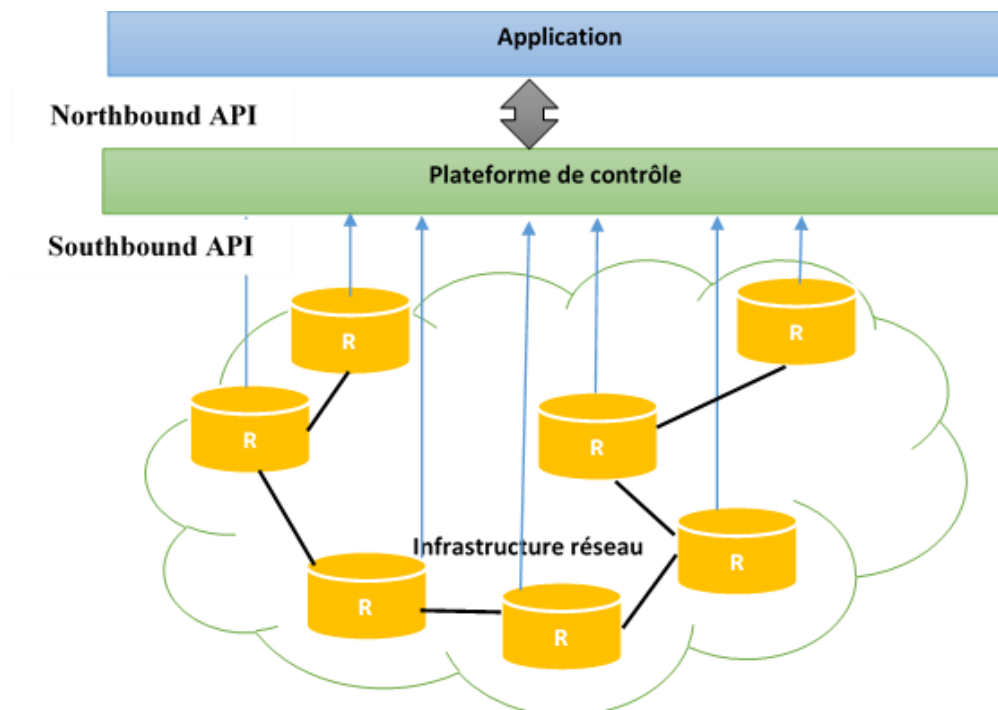


Figure IV.3: Architecture SDN

IV.6 Les protocoles dans le réseau 5G

La virtualisation des fonctions réseau (NFV) se concentre sur l'abstraction des fonctionnalités réseau matérielles. Ceci-dit, les fonctions réseau implémentées traditionnellement sur du matériel dédié ne l'est plus. En adoptant les fonctionnalités NFV, les fonctions réseau seront virtualisées sur des serveurs à usage général et qui peuvent être déjà déployés [40]. SDN / NFV

est une technologie émergente qui vise à déployer des réseaux flexibles, plus efficaces et rentables avec un niveau de sécurité élevé [8, 95].

De plus, la philosophie SDN divise le réseau en deux plans principaux, un plan de gestion et un plan utilisateur [9]. Le plan de gestion est considéré comme le cerveau du réseau avec un contrôleur centralisé qui exécute un progiciel et qui est chargé de contrôler le plan utilisateur. Ce dernier se compose de périphériques réseau à bas prix en tant que commutateurs courants. Le contrôleur exécute le protocole Open Flow (OF) afin de configurer les tables de routage et de surveiller les statistiques de paquets du plan utilisateur. De l'autre côté, NFV propose aux opérateurs la virtualisation des opérations et des fonctionnalités du réseau en implémentant des serveurs standard au lieu des Appliances fermés, non-standards et très coûteux [89]. Par conséquent, le modèle de conception SDN doit maintenir une infrastructure réseau transparente pour pour le niveau des applications [91].

L'architecture SDN est une nouvelle approche de conception du réseau visant à réduire la nature complexe et statique des architectures traditionnelles du réseau qui sont distribuées. En se basant sur le SDN, les administrateurs du réseau peuvent donc programmer le comportement du trafic et du réseau de manière centralisée, sans nécessiter un accès et une configuration indépendantes de chacun des périphériques matériels du réseau. Le plan de contrôle étant séparé de l'infrastructure physique sous-jacente, il abrite toutes les fonctions destinées au contrôle du réseau. La migration des fonctions de contrôle vers un plan de contrôle programmable, permet aux administrateurs de modifier son comportement réseau en temps réel, et de l'adapter à l'évolution rapide des conditions du réseau en exécutant les applications appropriées du contrôleur [90-92].

L'architecture SDN a été intégrée à plusieurs protocoles, architectures et mécanismes de gestion de la mobilité des réseaux 5G. Notre présent travail propose une architecture de gestion et de partage de charge au sein des réseaux ultra-dense 5G en utilisant le SDN. L'architecture proposée vise essentiellement à réduire le délai de la relève entre différentes contrôleuses du réseau. Selon notre approche, le contrôleur du réseau intègre deux modules: le module de gestion de la mobilité ainsi que le module de contrôle d'admission. Considérant une configuration hexagonale des cellules, le module associé à la gestion de la mobilité permet d'estimer, pour chaque eNB, les probabilités de transitions au sein du réseau en se basant sur une chaîne de Markov. Ce module intègre aussi le moteur de sélection des cellules lors d'une relève. Le contrôleur du réseau intègre aussi des procédures de contrôle d'admission lors des

relèves. L'architecture proposée permet de réduire la durée des relèves ainsi que la probabilité d'échec de celles-ci en comparaison à l'architecture traditionnelle du réseau LTE [92-93].

Dans la littérature, diverses solutions d'allocation et de gestion des ressources ont été proposées pour contribuer aux réseaux 5G et 6G. L'intégration de réseau virtuel (VNE) est une telle stratégie qui rencontre la connaissance du plan de gestion pour la 5G / 6G. Les cartes d'atmosphère radio connues sous le nom de REM sont principalement considérées comme l'un des pionniers des systèmes de caractéristiques psychologiques. Cependant, la plupart de ces dispositifs sont fermés aux GPP et GTP, et leurs plans de gestion de la qualité remplissent certaines conditions particulières. Le besoin futur des réseaux 5G nécessite le développement de nouveaux modèles qui satisfont non seulement le découplage entre le plan de gestion et le plan utilisateur, mais devraient prendre en charge les points chauds avec des fonctionnalités de haute capacité et de couverture [92]. Dans notre cas, nous avons développé un protocole qui évalue le temps d'exécution du transfert.

De ce fait, nous nous sommes concentrés sur le protocole open flow pour atteindre la contrainte S5 / S8 tout en conservant les principales règles standard du SDN. Le SDN est actuellement connu comme étant une technologie à la mode dans le domaine des réseaux. Dans de tels réseaux, le contrôleur fonctionne comme un moniteur de réseau et définit les règles de transmission des flux de données. Les commutateurs effectuent le transfert et la suppression des paquets selon les règles définies par le contrôleur. Ainsi, le contrôleur devrait être en mesure de mettre en œuvre une stratégie de contrôle centralisé pour chaque flux de données d'échange en utilisant la technique de rapport de paquet d'en-tête [94].

Le principal avantage de notre nouvelle approche réside dans la fonction de partage de charge visant à répartir la fonctionnalité de traitement en cas de surcharge sur un nœud ou sur plus nœuds du réseau, et ce pour chaque service. Cela augmente la flexibilité de livraison et garantit les exigences de QoS, au lieu d'avoir des fonctionnalités de plan U / C AD HOC pour chaque analyse de rentabilisation. De plus, cette fonctionnalité assurera une grande évolutivité et conduira à plus d'efficacité en termes de signalisation et de latence, en évitant les traitements inutiles.

IV.7 SDN pour les réseaux 5G

Le contrôleur SDN implémente de multiples applications telles que la gestion de la mobilité, la création et l'affectation de pseudowire, l'attribution des ressources radio et bien d'autres, tout en interfaisant avec d'autres éléments programmables dans le pile de protocoles; exemples

de MAC programmables et PHY sont dans [3, 4]. Contrairement aux versions précédentes des réseaux cellulaires à savoir le 2G et la 3G, le réseau 4G / LTE a été conçu de manière à implémenter ce concept à travers son architecture actuelle, en séparant les fonctionnalités contrôlées par la partie cœur de celles assurées par la partie backhaul.

En dépit de cette nouvelle tendance, introduire un plan de contrôle SDN soulèvera plusieurs défis, à savoir la prise en charge à l'échelle des abonnés, la prise de décision en temps réel, et la mesure et le contrôle avec précision du trafic traversant le réseau.

Plusieurs travaux de recherches se sont focalisés afin de proposer des solutions aux questions précédentes. La majorité d'entre eux ont porté sur la contrainte du temps de réponse qui demeure un facteur important à prendre en charge par les réseaux mobiles et qui est relativement courte et maîtrisable dans le cas des réseaux à infrastructure fixe. Ceci est principalement dû la nature des médias sans fil et mobile dont la topologie est aléatoire et le facteur temps de réponse n'est pas facile à maîtriser [92-95].

Contrairement aux limites de l'architecture du réseau LTE actuel dues à la centralisation de ses fonctions (monitoring, contrôle d'accès, filtrage et transfert de données.etc), il est proposé une nouvelle architecture de gestion de la mobilité implémentant les concepts du SDN, du NFV et du Cloud Computing. Cette architecture vise à répartir les composants P-DWs du réseau LTE traditionnel en les rapprochant des usagers, donc de sa périphérie. Elle vise aussi à séparer les plans de données et de signalisation du réseau et à offrir un plan de signalisation virtuel et centralisé.

Les déplacements des MNs sont gérés au sein de cette architecture en adoptant les concepts de la mobilité partiellement distribuée DMM. A cet effet, les P-GWs du réseau LTE désormais distribués et proches de la périphérie du réseau (P-EGW, PDN Edge Gateway) visent à aplatir le réseau et répartissant ses points d'ancrage de mobilité à sa périphérie. L'ensemble des P-EGWs du réseau forment le plan de données constitués de commutateurs SDN, tandis que le plan de contrôle piloté par un contrôleur SDN gère les procédures de signalisation et d'allocation d'adresses IP [3, 93]. Les fonctions classiques du réseau LTE (MME, HSS, PCRF) sont centralisées et implémentées au niveau du plan contrôle sous forme de fonctionnalités virtualisées du réseau grâce au Cloud Computing. L'évaluation des performances de l'architecture proposée montre qu'elle apporte plus de flexibilité, accroît son évolutivité et réduit les coûts du réseau en la comparant à l'architecture LTE du réseau 4G traditionnel.

L'objectif principal de la technologie SDN est le découplage du plan de contrôle logiciel du plan de données matériel (par exemple, les règles de transmission de paquets et commutateurs). SDN apporte avec lui sans précédent facilité d'innovation, ouverture, ressource optimale utilisation, prise en charge de la virtualisation, etc., mais c'est peut-être l'idée la plus disruptive, les réseaux mobiles ont vu depuis leur transition de 1G à 2G, c'est-à-dire de l'analogique au numérique systèmes. Même LTE n'a pas été livré avec le même degré de perturbation [1].

La perturbation requise peut éventuellement pousser le Déploiements SDN et, par conséquent, le développement de Des solutions basées sur le SDN, pour un futur. La 5G peut juste en voir solutions ponctuelles avec SDN à certains endroits [1] et le focus resterait largement sur la densification, la technologie des ondes millimétriques, et DAS (Distributed Antenna Systems) pour atteindre 1000x capacité, 100x débit de données et 100x connexions actives à partir du réseau LTE déjà déployé. Un point important à souligner est que toutes les principales approches et tendances commerciales définies pour la 5G ne dépendent pas strictement du SDN. Néanmoins, il est important de mentionner que la 5G NR (nouvelle radio) du 3GPP vise essentiellement à de rapprocher des réseaux mobiles SDN en raison de la séparation du plan de contrôle (CP) de celui du plan utilisateur dans NGC (nouveau Génération Core), la modularisation des fonctions CP et définition des interfaces entre le CP et le plan utilisateur [2].

Les réseaux mobiles 5G devraient répondre aux exigences croissantes des utilisateurs et des applications en termes de bande passante et de QoS [95]. La virtualisation des fonctions réseau connues sous le nom de NFV (Network Function Virtualization) fait partie du nouveau monde informatique et fait évoluer la stratégie de mise en réseau. Le SDN et le NFV peuvent fonctionner ensemble et conduisent à déployer un futur réseau sophistiqué [96].

Malgré la croissance de plusieurs réseaux mobiles en 2020, différents défis doivent être pris en compte comme: une grande évolutivité avec la mise en œuvre de l'IoT, des contraintes énergétiques pour les appareils et les stations mobiles, l'optimisation des délais et de la bande passante, l'optimisation de l'allocation des ressources, la réduction des coûts de déploiement... etc[97]. Voir la figure suivante:

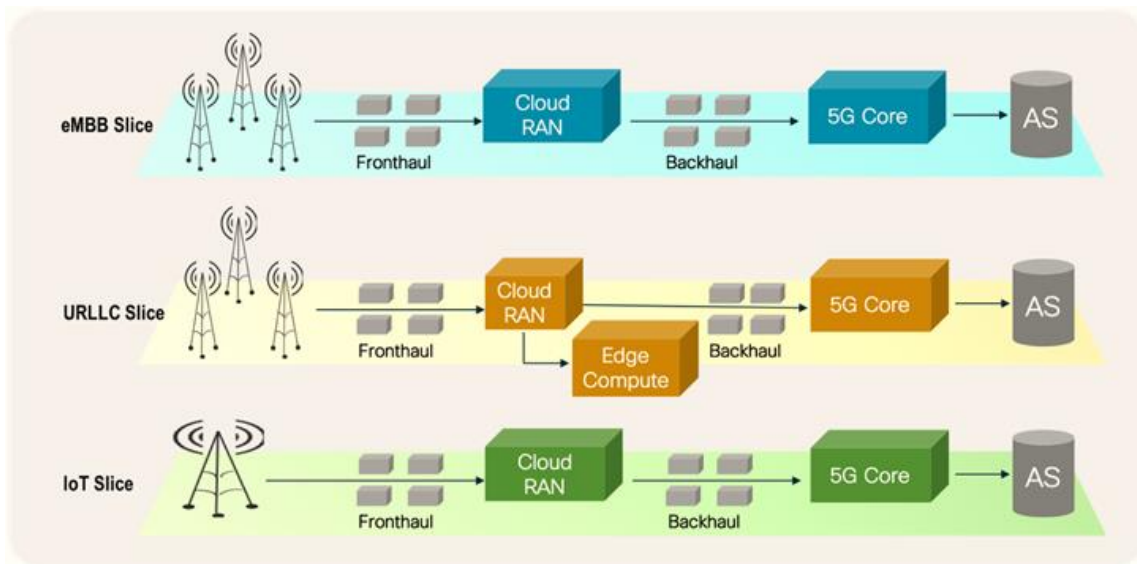


Figure IV.4: NFV SLICE dans le réseau 5G

Dans le but d'offrir des services fiables personnalisés tout en limitant les coûts d'installation et d'exploitation au sein des réseaux 5G, la technique de subdivision logique du réseau (network slicing) a été récemment proposée au sein des réseaux sans fils en tant que principal catalyseur de la convergence des services du réseau et des services personnalisés à la demande. En partitionnant un réseau physique en plusieurs partitions logiques (slices) dans le but d'offrir des services personnalisés, les ressources de l'infrastructure du réseau peuvent être allouées de façon dynamique et efficace aux différentes partitions du réseau logique en fonction des requis en matière de qualité de service. Dans la littérature, la gestion de la mobilité et l'allocation virtualisée des ressources n'ont pas été suffisamment étudiées pour les réseaux 5G basés sur le partitionnement virtuel du réseau.

Bien que plusieurs types de réseaux mobiles dominant dans les années 2020. Il existe également de nombreux défis, tels que: atténuer la consommation d'énergie des appareils et des stations de base, une meilleure allocation des ressources, des débits de données plus élevés, garantir des temps d'aller-retour plus courts, réduire tous les coûts, développer et renforcer les politiques de gestion de la mobilité, l'élasticité, l'agilité et l'évolutivité [97].

A l'heure actuelle, le SDN est une technologie innovante dans le domaine du réseautage qui consiste à définir les fonctionnalités du réseau dans des logiciels. Cela permet une efficacité sur la configuration du réseau et son allocation de ressources. Par la séparation entre le plan de contrôle et le plan de données, le SDN garantit une transparence entre l'infrastructure réseau et les applications en cours d'exécution. Ainsi, chaque contrôleur gère divers équipements du réseau en tant que commutateurs et s'attend à un contrôle plus flexible et intelligent des données

échangées sur le réseau [98]. Contrairement au réseau à motif trivial qui éprouve une difficulté dans l'allocation des ressources et son agencement, SDN est un candidat favori pour de tels réseaux non gérés en découplant la gestion et le volet utilisateur [99]. Pour ce faire, SDN implémente OpenFlow en tant que protocole de communication, qui est normalisé par ONF (Open networking Foundation) [100].

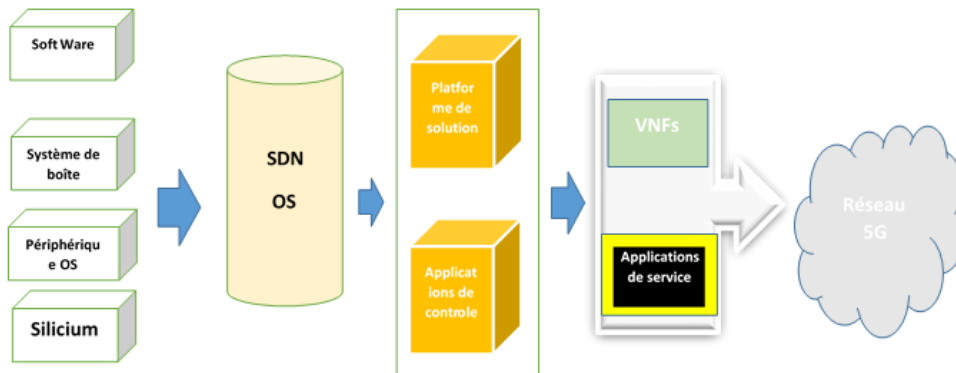


Figure IV.5: ONF pipeline dans le réseau 5G

En SDN, la découverte de la topologie est considérée comme le chef-d'œuvre des contrôleurs SDN et elle permet de contrôler diverses applications comme: le routage des données, la virtualisation du réseau, la migration en direct, l'optimisation des ressources... etc. La topologie du réseau n'est pas uniquement destinée à déterminer la transmission des données, mais aussi pour gérer les ressources du réseau. [7] [101]. Au sein du réseau SDN, le plan de données est responsable de la transmission des données entre les appareils connectés et les contrôleurs. Les commutateurs exécutant le protocole Open Flow forment le plan d'information, tandis que les contrôleurs sont distribués et connectés entre eux pour former le plan de contrôle [102]. SDN peut avoir un impact positif en termes de flexibilité et de programmabilité [103].

Ainsi, le SDN est un moyen d'introduire la virtualisation au sein des réseaux IP classiques [104], offrant une nouvelle vision et rassemblant de nouvelles fonctionnalités en termes de connaissance et de déploiement. En outre, les réseaux mobiles peuvent à leur tour bénéficier des avantages du SDN, conduisant à améliorer le contrôle et la gestion du réseau [105]. Au niveau de la partie frontale du réseau, la technologie SDN actuelle ne définit pas une vision claire en raison des caractéristiques particulières de cette partie en consommation électrique et en coût des éléments qui se répartissent sur une zone géographique définie [106]. La figure 1 illustre le schéma de données dans une architecture SDN classique.

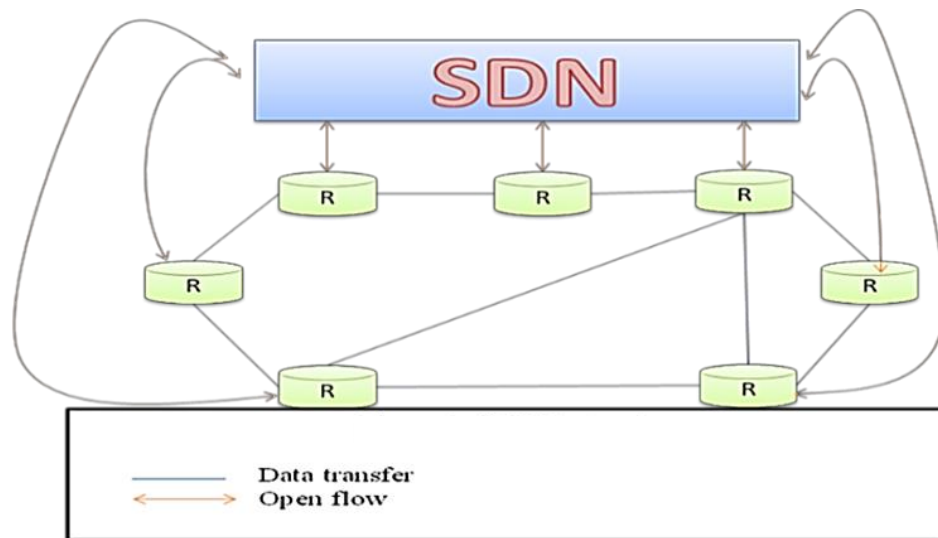


Figure IV.6: Schéma de données dans SDN

Comme le montre la figure ci-dessus, le réseau est divisé en deux plans principaux, les appareils connectés constituent le plan de données et sont responsables de l'acheminement du trafic réseau. Pour ce faire, les commutateurs activés pour le flux ouvert doivent suivre les règles de commutation et les stratégies qu'ils reçoivent du contrôleur SDN qui forme le plan de contrôle.

IV.8 Le principe de la Commutation dans SDN

Le SDN permet une plus grande flexibilité dans l'opération de routage qu'un réseau mobile traditionnel. Contrairement aux réseaux cellulaires existants où le trafic passe par les équipements intermédiaires en utilisant le même chemin de routage, la nouvelle stratégie SDN offre un routage flexible, où seul le trafic nécessaire qui passe à travers ces derniers, réduisant ainsi leur complexité. Ainsi, cette nouvelle stratégie peut permettre une topologie de réseau dynamique avec un chemin de routage flexible qui répond au changement de comportement du réseau et aux besoins des utilisateurs [107]. A cet effet, les paquets de données sont transmis par des commutateurs selon une règle de correspondance existante. Sinon, le commutateur concerné envoie un message d'entrée de paquet au contrôleur qui détermine une règle de transfert pour le présent paquet. Ensuite, le contrôleur envoie un message « Flow-mod » aux commutateurs concernés par la nouvelle route afin de mettre à jour leurs tables de routage.

En effet, diverses études et recherches récentes se sont concentrées sur le processus MFT pipeline. Dans [27], les auteurs ont proposé un algorithme qui divise un grand tableau de flux en un certain nombre de petits flux. Un commutateur SDN mettant en œuvre une telle méthode est illustrée par la Figure IV.2. Il transfère toutes les données provenant des terminaux mobiles et des appareils m-IOT mettant en œuvre les règles respectives, permet la connectivité entre les

périphériques de périphérie et autorise le trafic de transport entre le réseau central et les autres clouds périphériques [108].

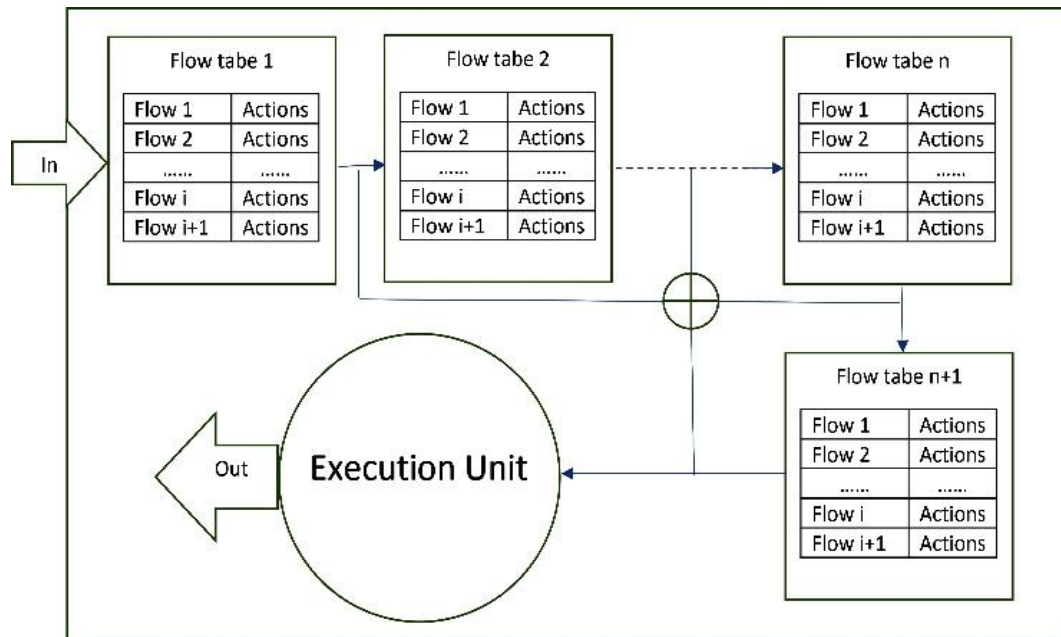


Figure IV.7: Protocole MFT

D'autres études de recherche dans [108] et [89] se sont concentrées sur la mise en œuvre des techniques d'apprentissage pour améliorer les performances de contrôle tout en sélectionnant les liaisons optimisées dans le système de communication par satellite.

IV.9 CP-SDN (Cooperative protocol - SDN)

Cette section décrit notre algorithme proposé, mettant en œuvre un nouveau schéma pour améliorer la flexibilité de contrôle des réseaux SDN existants.

Le CP-SDN est considéré comme une extension de la technologie SDN existante. Le CP-SDN vise à optimiser le délai et à améliorer la flexibilité de l'opération de contrôle lorsque le réseau subit une saturation. Cela peut se produire lorsque le réseau est très dense et prend en charge une énorme quantité de données de trafic. Comme prévu, dans la technologie 5G, le réseau peut contenir des millions d'appareils fixes, mobiles ainsi que des appareils à contraintes tels que ceux issus des systèmes IoT.

L'idée consiste à utiliser deux contrôleurs SDN au lieu d'un seul, comme le montre la Figure IV 3. Dans le cas normal, les deux contrôleurs sont responsables de la définition et de la diffusion des règles de commutation vers les commutateurs qui leurs appartiennent. Dans le cas contraire, lorsque le réseau subit une saturation, le contrôleur saturé transmet les paquets de données superflus à son contrôleur voisin CP-SDN afin d'assurer un équilibre de charge en termes de contrôle.

Le deuxième contrôleur sera responsable de définir des règles pour assurer la transmission des données restantes appartenant au premier contrôleur. Cela vise à soulager le contrôleur saturé, à éviter la perte de paquets et à optimiser le processus de transmission des données. CP-SDN, est un protocole proactif qui permet aux contrôleurs d'échanger périodiquement leurs règles de commutation pour mettre à jour l'opération de contrôle.

IV.10 Le contrôleur dans le CP-SDN

Dans SDN, le contrôleur est considéré comme le cœur du système, en rassemblant les exigences de trafic et l'état des périphériques réseau. Sur la base de ces informations, il définit les règles de contrôle vers le plan de données afin de fournir un réseau optimisé et efficace pour la transmission des services de données [108]. En cas de saturation due à l'énorme quantité de données échangées, le contrôleur peut prendre plus de temps pour effectuer l'opération de contrôle et ainsi, le délai de transmission peut augmenter. Cela représente l'un des principaux problèmes rencontrés par un réseau SDN. Ainsi, les services en temps réel seront affectés et la qualité de service du réseau sera dégradée.

Le CP-SDN, en tant que schéma proposé, intervient lorsque le réseau rencontre un problème de saturation. Comme le montre la Figure IV.8, le CP-SDN consiste à assurer la liaison entre deux ou plusieurs contrôleurs afin de décharger le point saturé.

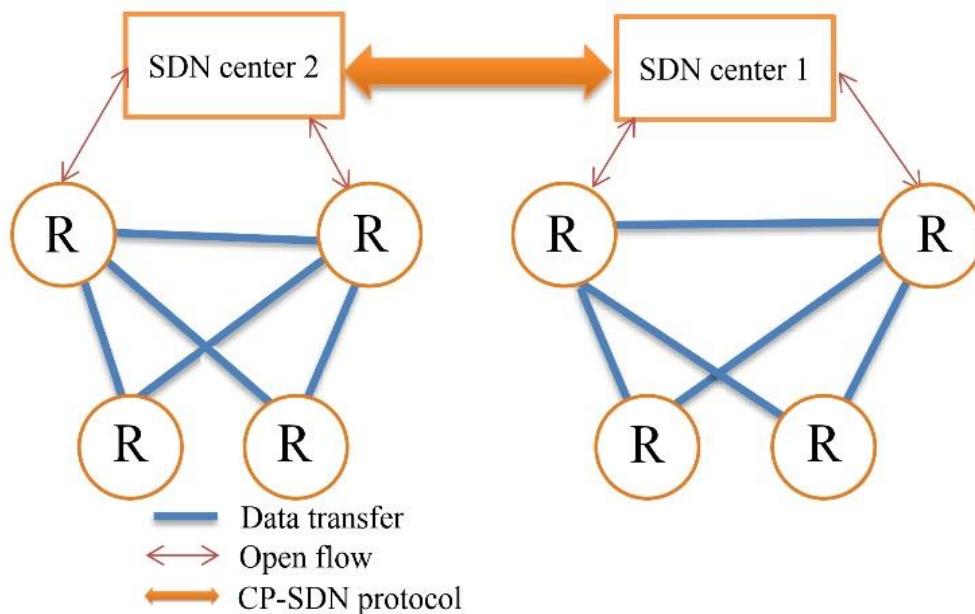


Figure IV.8: Architecture CP-SDN

Le protocole CP-SDN fonctionne entre les deux centres SDN (en orange), en permettant aux contrôleurs d'échanger les informations de contrôle et de mettre à jour leurs règles de transferts des données. Ainsi, les deux centres auront les informations globales sur les plans de données qui y sont connectés.

IV.11 Commutation CP-SDN

Le contrôleur SDN est mis à jour pour suivre chaque état de connexion TCP établi entre les commutateurs appartenant à son plan de données [109]. La commutation dans CP-SDN est effectuée à deux niveaux distincts. Le premier niveau se situe entre les commutateurs SDN, tandis que le second niveau est entre les contrôleurs SDN. Le CP-SDN implémente un algorithme basé sur deux tables (i, j). La première table contient les données de traitement du pipeline MFT pour le premier niveau (entre les commutateurs) et la seconde table contient le même type de données mais pour le deuxième niveau.

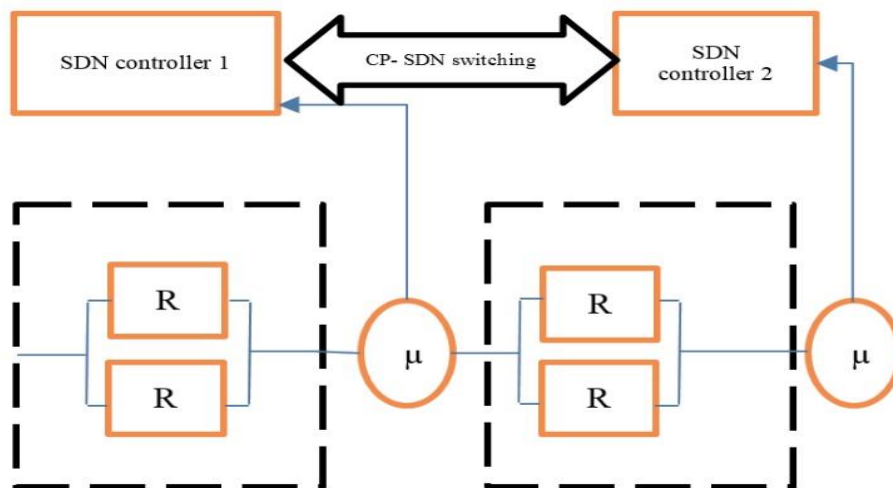


Figure IV.9: Commutation CP-SDN

Comme illustré par la Figure IV.9, les contrôleurs SDN sont mis à jour par les mêmes bases de données de contrôle permettant à chaque contrôleur de prendre les décisions concernant les règles de trafic des paquets de données échangés dans les plans de données leur appartenant. De plus, en cas de surcharge d'une partie du réseau, les contrôleurs devraient se soulager et décider du chemin optimisé pour acheminer les paquets de données de la source à la destination. Le schéma illustré par la Figure IV.5 montre le fonctionnement du CP-SDN,

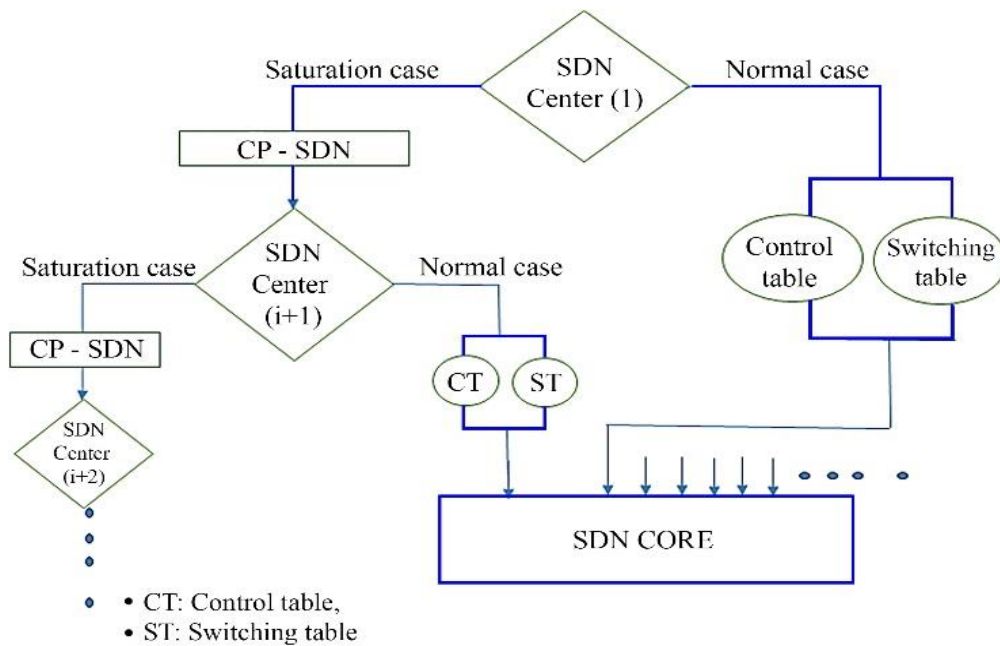


Figure IV.10: Schéma opérationnel du CP-SDN

Ainsi, en cas de trafic à contrainte tel qu'un service temps réel, ne sera pas mis en file d'attente pour cause de saturation, mais pris en charge par le contrôleur soulagé et traité rapidement. De cette manière, nous garantissons une optimisation du réseau et assurons un certain niveau de qualité de service réseau pour le trafic critique.

IV.12 résultats obtenus par l'implémentation du CP-SDN

On considère une cellule suburbaine couvrant $A = 2\text{km}^2$ et ayant en moyenne une densité $\beta_1 = 1000\text{eMBB}$ utilisateurs (Enhanced Mobile Broadband), avec seulement $p_A = 0.5, 0.6$ et 0.7 actifs à la fois, et une moyenne d'un $\beta_2 = 1000$ mIoT actifs (massive IoT) dans chaque tranche de service respectif. Le découpage doit être déployé sur tous les domaines du réseau, de manière à ce qu'une instance de tranche de réseau se compose d'instances de sous-réseau de la tranche du réseau correspondant à différents domaines [110]. Les débits de données sont maintenus à 50 Mbps pour eMBB et 100 kbps pour mIoT suivant les normes [109]. On prend $\mu = 1024$ pkt / ms avec une longueur $L = 2$ ko.

eMBB :Enhanced Mobile Broadband

mIoT : Massive Internet Of Think's

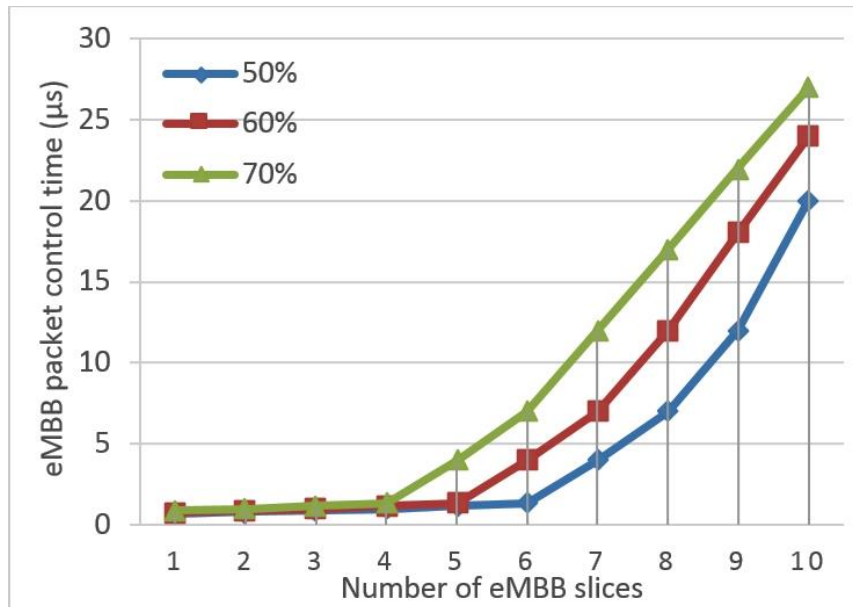


Figure IV.11: Performances du délai eMBB pour différents nombres de tranches.

La figure IV.11 montre le temps de contrôle de paquet eMBB dans une seule cellule en faisant varier le nombre de tranches eMBB (n) selon trois probabilités $PA = 0.5, 0.6$ et 0.7 .

D'après les résultats récapitulés par la Figure IV.11, on constate que pour un nombre de tranches de 1 à 4, le temps de contrôle des paquets est presque identique, $< 1 \mu s$. Toutefois, à partir d'un nombre de tranches égal à 4, le cas $p = 0.7$ montre un comportement différent qui indique un début de saturation, où il montre une augmentation continue, pour atteindre « $27 \mu s$ » pour un nombre de tranches égal à 10, ce temps de contrôle du temps nécessaire peut conduire à une latence du réseau. Le même comportement est montré dans le cas de $p = 0,6$ et $P = 0,5$, où une augmentation est notée à partir du nombre de tranches $n = 6$ et $n = 5$, respectivement, pour atteindre des délais de « $24 \mu s$ » et « $20 \mu s$ », pour un nombre de tranches égal à 10.

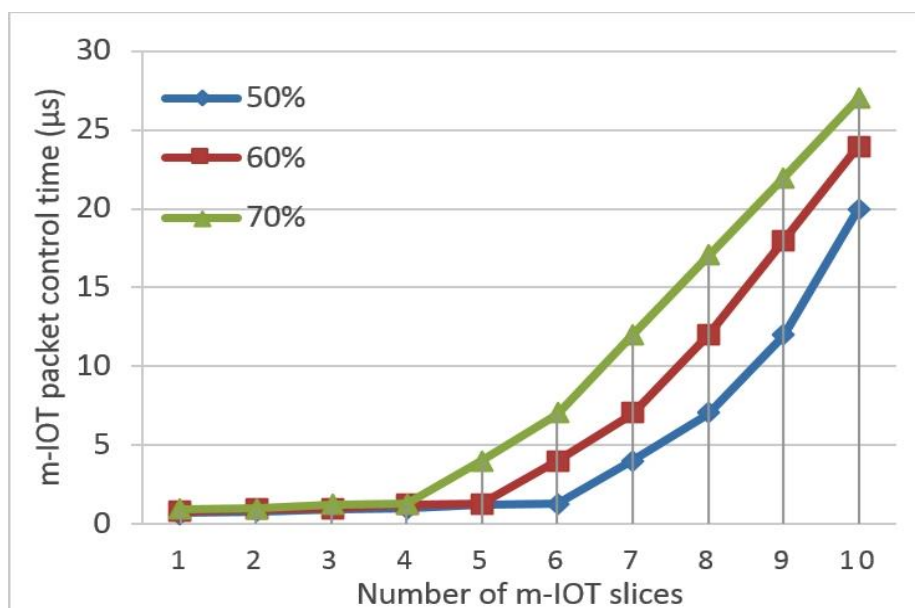


Figure IV.12: Performance du délai m-IOT pour différents nombres de tranches

La Figure IV.12 illustre le temps de contrôle des paquets m-IOT dans une seule cellule en faisant varier le nombre de tranches m-IOT (n) selon trois probabilités $PA = 0.5, 0.6$ et 0.7 . De même que pour dans le cas eMbb précédent, on peut constater que pour le nombre de tranches de 1 à 4, presque le même le temps est nécessaire ($<1\mu s$). Au-delà du nombre de tranches $n = 4$, le cas $p = 0,7$ montre un comportement différent en observant un début de saturation, où il montre une augmentation, pour atteindre les « $27 \mu s$ » pour un nombre de tranches $n = 10$. Ce temps de contrôle produit peut affecter la latence du réseau. Le même diagramme est montré dans le cas de $p = 0.6$ et $P = 0.5$, où une croissance est constatée à partir du nombre de tranches $n = 6$ et $n = 5$, respectivement, pour atteindre les « $24 \mu s$ » et « $20 \mu s$ », pour le nombre de tranches $n = 10$.

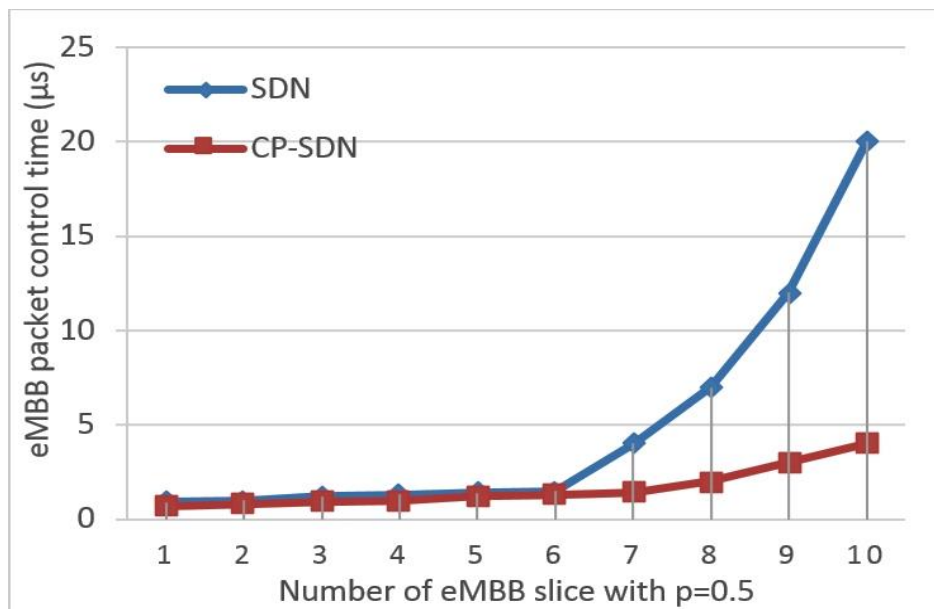


Figure IV.13: Performances du délai eMBB pour différents nombres de tranches utilisant le SDN et le CP-SDN à $P = 0,5$.

La Figure IV.14 représente une comparaison des performances en termes de délai de contrôle dans le cas « eMBB » pour différents nombres de tranches entre le SDN et la nouvelle architecture logicielle proposée CP-SDN, avec une probabilité de 0.5.

Les résultats de simulation illustrent que le SDN et le CP-SDN démontrent les mêmes performances pour un nombre de tranches $n \leq 6$, où le temps de contrôle écoulé est égal à « $1\mu s$ ». Le CP-SDN montre une nette amélioration par rapport au SDN, pour des valeurs de 6 à 10, où le retard induit dans le cas du SDN est 5 fois supérieur au CP-SDN. Cette amélioration est le résultat de l'utilisation d'un deuxième contrôleur, permettant d'implémenter un mécanisme de partage de charge de contrôle dans le cadre de l'opération de contrôle.

La différence de comportement, constatée à partir de $n = 6$, début de la saturation, est due à la collaboration avec une deuxième station. L'utilisation d'une deuxième station ne suffit pas toujours, où le CP-SDN montre une saturation à partir de $n = 8$, ce qui nécessite une troisième station collaborative.

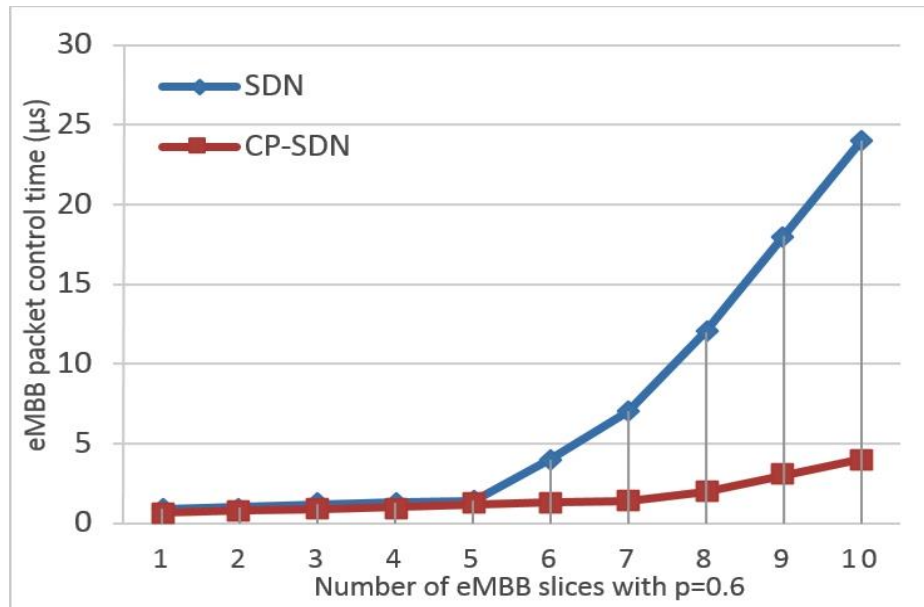


Figure IV.14: Performances du délai eMBB pour différents nombres de tranches utilisant le SDN et le CP-SDN à $P = 0.6$.

La Figure IV.14 illustre une comparaison entre la variation des performances de retard eMBB pour différents nombres de tranches lors de l'utilisation du SDN et du CP-SDN.

Les résultats de la simulation indiquent que le SDN et le CP-SDN expriment le même comportement pour un nombre de tranches $n \leq 5$. Où le temps épuisé dans l'opération de contrôle est égal à $1 \mu s$. Le CP-SDN montre une nette amélioration par rapport au SDN, pour des valeurs de 5 à 10, où le retard produit dans le cas du SDN est 6 fois supérieur au CP-SDN. Cette efficacité dans le cas du CP-SDN est le résultat de l'utilisation d'une deuxième station, pour diviser la commande.

La différence de comportement, constatée à partir de $n = 5$ qui indique le début d'un état de saturation, est due à l'alliance avec une deuxième station. De même que pour le cas $P=0,5$, on constate que l'utilisation d'une deuxième station n'est pas suffisante, où le CP-SDN montre une saturation de $n = 8$, qui nécessite une troisième station qui doit prendre le relais.

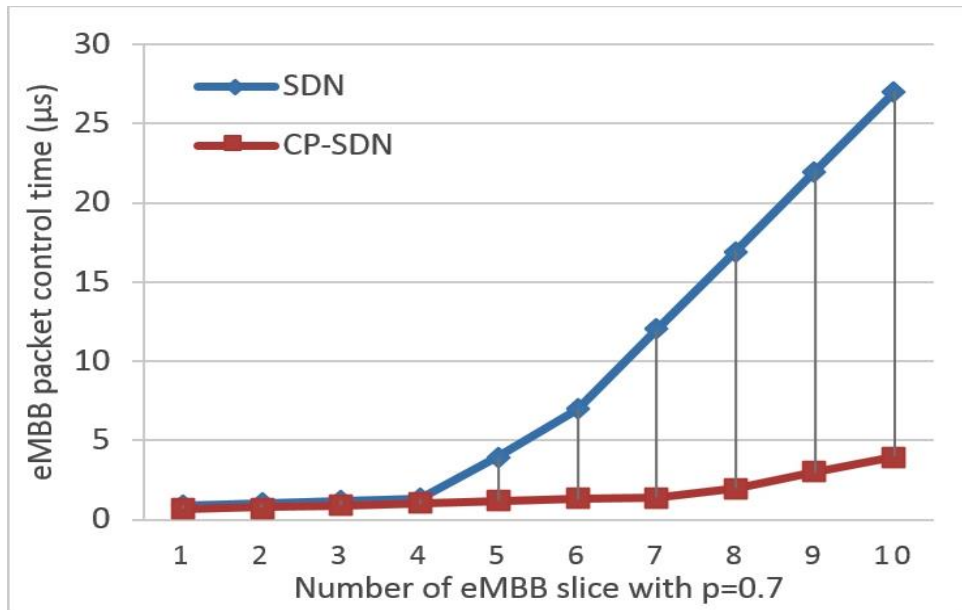


Figure IV.15: Performances du délai eMBB pour différents nombres de tranches utilisant le SDN et le CP-SDN à P = 0.7.

Dans la Figure IV.15, les mêmes résultats sont obtenus comme illustré par les figures IV.12 et IV.13 avec seulement un léger changement dans le temps du début de la saturation du réseau qui commence quand $n = 4$. Le deuxième état de saturation reste $n = 8$, de même que pour $p = 0.5$ et $p = 0.6$.

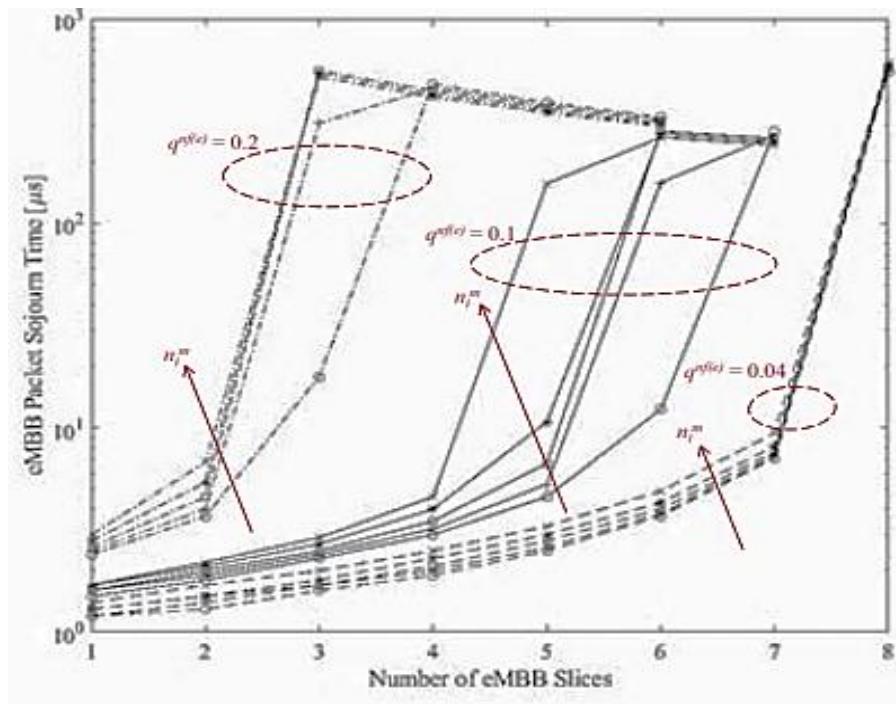


Figure IV.16: Performances du délai eMBB pour différents nombres de Slices [108].

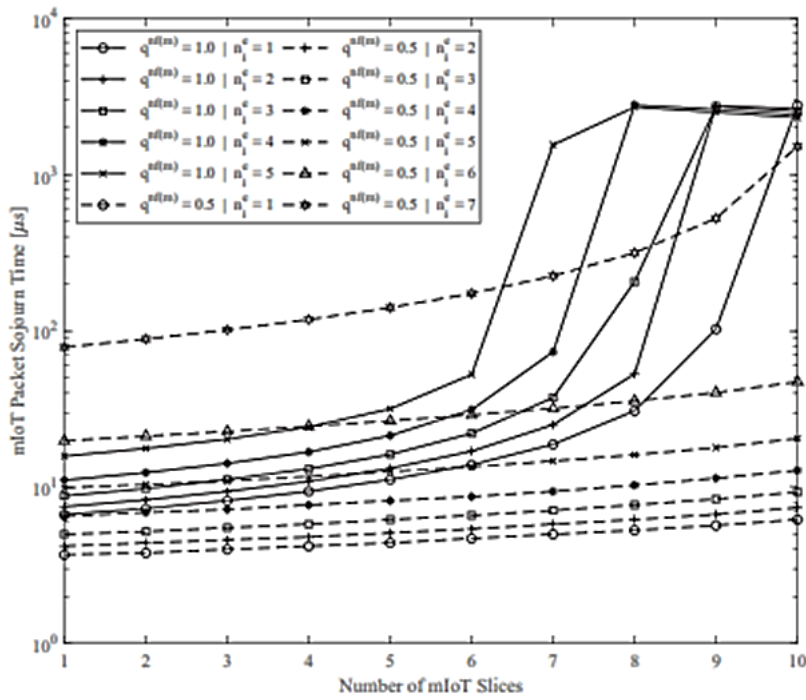


Figure IV.17: Performances du délai mIoT pour différents nombres de Slices [108].

Les deux figures IV.15 et IV.17 sont des travaux menés pour différentes valeurs mais on peut s'en articuler comme références car les mesures sont acceptables même les résultats sont parfaits. Les deux figures montrent qu'avec l'utilisation de niveau protocole CP-SDN on peut réduire le temps de contrôle à 70% dans les cas de saturations.

Dans ce qui suit, le tableau 1 résume les performances du CP-SDN par rapport au SDN de base.

Tableau IV.1: Performance du CP-SDN vs SDN

Temps de contrôle des paquets (µs)	Densité de probabilité du réseau					
	0.5		0.6		0.7	
	eMB B	mIO T	eM BB	mIO T	eMB B	mIOT
SDN notre travail	20	19	24	22.5	27	26
Travail d'authentification SDN [110] [108]	15	10.5	18	13.8	23.5	16.4
CP-SDN	3.5	3.4	3.6	3.5	4	3.9

Dans le cas du CP-SDN, le temps de contrôle ne dépasse pas les 4 μ S, pour les tranches e-MBB et m-IOT, et ce pour diverses probabilités de la densité du réseau. Cependant pour le cas SDN, le temps de contrôle est plus important et il augmente, surtout lorsque le réseau devient dense et subit une congestion. Ceci illustre le résultat du CP-SDN pour les réseaux denses et son efficacité pour le trafic en temps réel, par rapport au SDN de base. Cette amélioration de la qualité est directement liée à l'implémentation du nouveau mécanisme de mise en œuvre du CP-SDN qui soulage les contrôleurs par leurs voisins.

Le principal inconvénient du CP-SDN que l'on peut observer se résume dans l'augmentation de l'énergie nécessaire à la transmission. Dans le cas d'une coopération entre deux ou plusieurs contrôleurs, on peut percevoir plus de consommation d'énergie dans la station coopérative. Ainsi, plus d'énergie consommée signifie une charge plus coûteuse de la consommation d'énergie.

Comme le montrent les différentes simulations effectuées au cours de nos travaux actuels, le CP-SDN agit mieux que le SDN, en particulier en cas de saturation. Cela se produit lorsque le réseau semble dense et prend en charge une énorme quantité de données échangées entre divers segments et prenant en charge plusieurs services. La mise en œuvre du CP-SDN conduit à une optimisation en termes de délai de traitement des paquets et donc à une amélioration de la QoS pour le réseau 5G.

IV.13 Conclusion

La technologie SDN impliquée dans les réseaux 5G a un rôle de premier plan en offrant plus de flexibilité et d'efficacité en termes de gestion du réseau et de trafic de données, sachant que les réseaux 5G sont très évolutifs et connectent des milliards d'appareils fixes et mobiles avec des exigences et des caractéristiques différentes. Le flux de trafic passant par le réseau 5G a différents besoins de débit et de priorité qui devraient être pris en charge par les éléments du réseau. Ceci est réalisé en divisant le réseau en deux plans: le plan de contrôle et le plan de données. Le premier plan concerne les fonctionnalités du core du réseau, tandis que le deuxième est directement lié aux fonctionnalités des usagers.

Durant ce chapitre, nous avons démontré à travers toutes les simulations effectuées que notre nouveau schéma du réseau baptisé « CP-SDN », donne plus d'efficacité et d'optimisation au réseau SDN existant, en soulageant les centres qui subissent une saturation en raison de l'énorme trafic de données pris en charge.

Les résultats de la simulation montrent évidemment que le CP-SDN offre un meilleur résultat pour les réseaux 5G en termes d'optimisation du délai de traitement et peut ainsi assurer un niveau de QoS élevé, en particulier pour les services contraints.

Les résultats obtenus font du CP-SDN un candidat fort pour les futurs réseaux 5G denses et mobiles.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Les études d'analyse de réseau 5G sont basées sur des nouvelles techniques et des techniques existant déjà. Il s'agit d'augmenter la vitesse et le débit de connexion entre les objets et les serveurs. Le nombre important des objets connectés en même temps possède une situation de saturation au niveau de quelques points du réseau. Pour résoudre ce problème on a proposé cette nouvelle technique basée sur la coopération entre les serveurs afin d'éviter le problème de saturation. Dans cette thèse, nous avons étudié et proposé un nouveau protocole s'appelé CP-SDN au lieu de SDN classique afin de résoudre le problème de la saturation dans ce type de réseau.

La planification des deux variantes nominale et saturation pour le réseau 5G dans les futurs proche va permettre de prédéterminer l'état du réseau et la situation de chaque point de contrôle.

Les résultats obtenus sont satisfaisants et ont permis d'améliorer la qualité de service, le débit de connexion et surtout le temps de contrôle. Alors l'utilisation de ce nouveau protocole permet de réduire le temps de traitement car le CP-SDN réduit les temps de l'opération de contrôle au niveau des serveurs ainsi que celle de l'étape de switching.

Nos observations et nos conclusions sont résumées ci-après :

- Le réseau 5G contient des objets fixes et des objets mobiles. Ces derniers possèdent une masse d'information importante qui peut créer un état de saturation sur un point de réseau;
- L'augmentation de connexion et les smart objects (même les IOT) avec les différentes branches connectées dans un réseau global, utilise le même protocole de contrôle SDN. Toutes les connexions et les informations sont contrôlées par des serveurs SDN. Ces derniers sont reliés avec un serveur central;
- L'utilisation de CP-SDN permet de résoudre le problème de saturation s'il existe. Elle est utilisée uniquement pour le cas de saturation. Dans les cas normaux, le réseau utilise le SDN classique;
- Les avantages du CP-SDN sont :
 - Minimiser le temps de contrôle;
 - Améliorer le traitement des tableaux de switching;
 - Augmenter le débit;
 - Absorber les points inutiles;
 - Créer une phase de coopération entre les points de réseaux ;
 - Minimiser le temps de switching dans le réseau.
- La technique CP-SDN permet d'optimiser l'opération de contrôle dans le réseau et d'aboutir à des résultats satisfaisants.

À la suite de ce travail, et comme perspectives, plusieurs approches d'études peuvent être proposées :

Pour les futurs travaux de recherche, il est impératif de tenir compte de l'étude de la stabilité dans le réseau d'interconnexion entre les points coopérés, et il serait intéressant d'aborder une étude sur la réalisation de deux interconnexions dans le réseau 5G ainsi que le cas de plusieurs interconnexions (coopérations multiples).

Une nouvelle perspective de recherche concerne l'étude de l'impact de la perte de temps inutile en cas de transfert des informations entre les points coopérés, alors les études à venir doivent prendre en charge cette problématique afin de résoudre ce problème ou de minimiser l'impact de cette perte.

Bibliographies

Bibliographie

- [1] J. Baranda, C. Chiasserini, and all, “Automated deployment and scaling of automotive safety services in 5G-Transformer”, IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN) 2019, pp1-2, DOI: 10.1109/NFV-SDN47374.2019.9039990
- [2] J. Aires, P. Duarte, and all, “Phased-vCDN Orchestration for flexible and efficient usage of 5G edge infrastructures”, IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN) 2019, pp1-6, DOI: 10.1109/nfv-sdn47374.2019.9040097
- [3] A. Barakabitze, A. Ahmad, and all, “5G Network Slicing using SDN and NFV: A Survey of Taxonomy, Architectures and Future Challenges”, Computer Networks, November 2019, pp1-47, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.106984>
- [4] H. Ko, I. Jang, and all, “SDN-based Distributed Mobility Management for 5G”, IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 2017, pp1-2, DOI: 10.1109/ICCE.2017.7889250
- [5] Z. Zaidi, V. Friderikos, and all, “Will SDN be part of 5G?”, IEEE, Communications Surveys & Tutorials, Feb 2018, pp1-40 DOI: 10.1109/COMST.2018.2836315
- [6] T. Hu, P. Yi, Y. Hu, and all, “SAIDE: Efficient application interference detection and elimination in SDN”, Computer Networks, 183-107619, October 2020, pp5-16, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107619>
- [7] M. Hyder and M. Ismail, “INMTD: Intent-based Moving Target Defense Framework using Software Defined Networks,” Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol.10 | N°.1, pp. 5142-5147, Feb 2020. DOI: <https://doi.org/10.48084/etasr.3266>.
- [8] I. Abdulqadder, S. Zhou, and all, “Multi-layered Intrusion Detection and Prevention in the SDN/NFV Enabled Cloud of 5G Networks using AI-based Defense Mechanisms”, Computer Networks 2020, pp1-48, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107364>
- [9] M. Khairi, S. Ariffin, and all, “A review of anomaly detection techniques and distributed denial of service (DDoS) on software defined network (SDN)”, Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol. 8, No. 2, pp. 2724-2730, 2018 DOI: <https://doi.org/10.48084/etasr.1840>
- [10] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, and Z. Han, “Resource Allocation in Wireless Networks with RF Energy Harvesting and Transfer,” IEEE Network, vol. 29, no. 6, pp. 68–75, November- December 2015.
- [11] C. Chuah, D. Tse, J. Kahn and R. Valenzuela, “Capacity Scaling in MIMO Wireless Systems under Correlated Fading”, IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 48(3), pp. 637-650, March 2002.
- [12] N. Jindal, S. Vishwanath and A. Goldsmith, “On the duality between multiple access and broadcast channels”, Annual Allerton Conference, 2001.

- [13] L. R. Varshney, "Transporting Information and Energy Simultaneously," IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), pp. 1612–1616, July 2008.
- [14] David Tse, "Fundamentals of Wireless Communication", University of California, 2004.
- [15] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications," IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 18, no. 2, pp. 1413–1452, Second Quarter 2016.
- [16] B. L. Cannon, J. F. Hoburg, D. D. Stancil, and S. C. Goldstein "Magnetic Resonant Coupling As a Potential Means for Wireless Power Transfer to Multiple Small Receivers," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 7, pp. 1819–1825, July 2009.
- [17] D. T. Hoang, D. Niyato, P. Wang and D. I. Kim, "Opportunistic Channel Access and RF Energy Harvesting in Cognitive Radio Networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 32, no. 11, pp. 2039–2052, November 2014.
- [18] Krikidis, S. Timotheou, S. Nikolaou, G. Zheng, D. W. K. Ng, and R. Schober, "Simultaneous Wireless Information and Power Transfer in Modern Communication Systems," IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 11, pp. 104–110, November 2014.
- [19] R. Zhang and C. K. Ho, "MIMO Broadcasting for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 12, no. 5, pp. 1989–2001, May 2013.
- [20] P. Grover and A. Sahai, "Shannon meets Tesla: Wireless information and power transfer," IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), June 2010, pp. 2363–2367.
- [21] M. Fouladgar and O. Simeone, "On the Transfer of Information and Energy in Multi-User Systems," IEEE Communications Letters, vol. 16, no. 11, pp. 1733–1736, November 2012.
- [22] L. Mohjazi, I. Ahmed, S. Muhaidat, M. Dianati, and M. Al-Qutayri, "Downlink Beamforming for SWIPT Multi-User MISO Underlay Cognitive Radio Networks," IEEE Communications Letters, 2016.
- [23] H. Ju and R. Zhang, "Throughput Maximization in Wireless Powered Communication Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 13, no. 1, pp. 418–428, January 2014.
- [24] H. Ju and R. Zhang, "Optimal Resource Allocation in Full-Duplex Wireless-Powered Communication Network," IEEE Transactions on Communications, vol. 62, no. 10, pp. 3528–3540, October 2014.
- [25] X. Kang, C. K. Ho, and S. Sun, "Full-Duplex Wireless-Powered Communication Network With Energy Causality," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 14, no. 10, pp. 5539–5551, October 2015.

- [26] H. Lee, C. Song, S-H. Choi, and I. Lee, “Outage Probability Analysis and Power Splitter Designs for SWIPT Relaying Systems with Direct Link,” *IEEE Communications Letters*, 2016.
- [27] Sabharwal, P. Schniter, D. Guo, D. W. Bliss, S. Rangarajan, and R. Wichman, “In-Band Full-Duplex Wireless: Challenges and Opportunities,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 9, pp. 1637–1652, September 2014.
- [28] H. Ju, K. Chang, and M-S. Lee, “In-Band Full-Duplex Wireless Powered Communication Networks,” *17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, pp. 23–27, December 2014.
- [29] L. Liu, R. Zhang, and K-C. Chua, “Multi-Antenna Wireless Powered Communication With Energy Beamforming,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 12, pp. 4349– 4361, December 2014.
- [30] G. Yang, C. K. Ho, R. Zhang, and Y. L. Guan, “Throughput Optimization for Massive MIMO Systems Powered by Wireless Energy Transfer,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 8, pp. 1640–1650, August 2015.
- [31] D. Hwang, D. I. Kim, and T-J. Lee, “Throughput Maximization for Multiuser MIMO Wireless Powered Communication Networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 7, pp. 5743–5748, July 2016.
- [32] D. Mishra, S. De, S. Jana, S. Basagni, K. Chowdhury, and W. Heinzelman, “Smart RF Energy Harvesting Communications: Challenges and Opportunities,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 4, pp. 70–78, April 2015.
- [33] Y. L. Che, L. Duan, and R. Zhang, “Spatial Throughput Maximization of Wireless Powered Communication Networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 8, pp. 1534–1548, August 2015.
- [34] William Stallings, *Wireless Communications and Networks, Second Edition*, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2005. ISBN 0-13-191835-4.
- [35] Abbas Jamalipour, Ying Bi, “*Wireless Powered Communication Networks from Security, Challenges to IoT Applications*”, Cambridge University Press, 2019.
- [36] B. Ciubotaru, G.M. Muntean, *Advanced Network Programming. Principles and Techniques*, Springer-Verlag London, 2013. ISBN 978-1-4471-5292-7.
- [37] K. Sharma, N. Dhir, “A study of wireless networks: WLANs, WPANs, WMANs, and WWANs with comparison”, *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, vol. 5 (6), pp. 7810-7813, 2014.
- [38] K. Pothuganti, A. Chitneni, “A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi”, *Advance in Electronic and Electric Engineering*, vol. 4 (6), pp. 655-662, 2014.
- [39] Samir Athmani ; « Protocole de sécurité pour les réseaux de capteurs sans fil ». Thèse de Magistère ; Université de Hadj Lakhdar-Batna ; Juillet 2010.

- [40] Boudjaadar Amina ; « Plateforme basée Agents pour l'aide à la conception et la simulation des réseaux de capteurs sans fil ». Thèse de Magistère ; Université de Skikda ; 2009/2010.2
- [41] S. Cui, A. Goldsmith, and A. Bahai, "Energy-efficiency of mimo and cooper- ativemimo techniques in sensor networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, no. 6, pp. 1089–1098, aug. 2004.
- [42] A. Mainwaring, D. Culler, J. Polastre, R. Szewczyk, and J. Anderson, "Wire- less sensor networks for habitat monitoring," in *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, 2002, pp. 88–97.
- [43] E. Basha and D. Rus, "Design of early warning flood detection systems for developing countries," in *International Conference on Information and Com- munication Technologies and Development*, dec. 2007, pp. 1–10.
- [44] L. Mo, Y. He, Y. Liu, J. Zhao, S.-J. Tang, X.-Y. Li and G. Dai, "Canopy closure estimates with greenorbs: sustainable sensing in the forest," in *Pro- ceedings of the seventh ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, 2009, pp. 99–112.
- [45] IEEE 802.15.4-Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), 2006.
- [46] I.Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 8, pp. 102– 114, aug. 2002.
- [47] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 4th Ed. McGraw-Hill Science, 2000.
- [48] Paulraj, R. Nabar, and D. Gore, *Introduction to Space-Time Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2003.
- [49] Sklar, "Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems: I.characterization," *Communications Magazine*, IEEE, vol. 35, no. 9, pp. 136– 146, sep. 1997.
- [50] E. Telatar, "Capacity of multi-antennagaussianchannels," *European Trans- actions on Telecommunications*, vol. 10, pp. 585–595, 1999.
- [51] Edelman, "Eigenvalues and condition numbers of random matrices," Ph.D. dissertation, Department of Mathematics, MIT, Cambridge, MA, 1989.
- [52] M. Dohler, "Virtual antenna arrays," Ph.D. dissertation, Department of Electrical and Electronic Engineering, King's College London, University of London, 2003.
- [53] L. Zheng and D. Tse, "Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple- antenna channels," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 49, no. 5, pp. 1073– 1096, may. 2003.
- [54] J.-F. Lemieux, M. El-Tanany, and H. Hafez, "Experimental evaluation of space/frequency/polarization diversity in the indoor wireless channel," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 40, no. 3, pp. 569–574, aug. 1991.
- [55] R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y. Li, and R. Yeung, "Network information flow," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46, no. 4, pp. 1204–1216, jul. 2000.

- [56] S. Zhang, S. C. Liew, and P. P. Lam, "Hot topic: physical-layer network coding," in Proceedings of the 12th annual international conference on mobile computing and networking, 2006, pp. 358–365.
- [57] S. Katti, S. Gollakota, and D. Katabi, "Embracing wireless interference: analog network coding," in Proceedings of the 2007 conference on applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications, 2007, pp. 397–408.
- [58] J. Laneman, D. Tse, and G. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, dec. 2004.
- [59] J. Laneman and G. Wornell, "Energy-efficient antenna sharing and relaying for wireless networks," in Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, vol. 1, sep. 2000, pp. 7–12.
- [60] ———, "Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2415–2425, oct. 2003.
- [61] S. Jayaweera, "Energy efficient virtual mimo-based cooperative communications for wireless sensor networks," in Proceedings of 2005 International Conference on Intelligent Sensing and Information Processing, jan.2005, pp. 1–6.
- [62] Coso, S. Savazzi, U. Spagnolini, and C. Ibars, "Virtual mimo channels in cooperative multi-hop wireless sensor networks," in 40th Annual Conference on Information Sciences and Systems, mar. 2006, pp. 75–80.
- [63] D. Woldegebreal and H. Karl, "Network-coding-based cooperative transmission in wireless sensor networks: diversity-multiplexing tradeoff and coverage area extension," in *Wireless Sensor Networks*, ser. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin / Heidelberg, 2008, vol. 4913, pp. 141–155.
- [64] Nosratinia, T. Hunter, and A. Hedayat, "Cooperative communication in wireless networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 10, pp. 74–80, oct. 2004.
- [65] Bletsas, A. Khisti, D. Reed, and A. Lippman, "A simple cooperative diversity method based on network path selection," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 24, no. 3, pp. 659–672, mar. 2006.
- [66] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A. Calderbank, "Space-time block codes from orthogonal designs," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 45, no. 5, pp. 1456–1467, jul. 1999.
- [67] ———, "Space-time block codes from orthogonal designs," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 45, no. 5, pp. 1456–1467, jul. 1999.
- [68] M. Dohler, Y. Li, B. Vucetic, A. Aghvami, M. Arndt, and D. Barthel, "Performance analysis of distributed space-time block-encoded sensor networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 55, no. 6, pp. 1776–1789, nov. 2006.
- [69] S. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, no. 8, pp. 1451–1458, oct. 1998.

- [70] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A. Calderbank, "Space-time block coding for wireless communications: performance results," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, no. 3, pp. 451–460, mar. 1999.
- [71] M.-K. Oh, X. Ma, G. Giannakis, and D.-J. Park, "Cooperative synchronization and channel estimation in wireless sensor networks," in *Conference Record of the Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, vol. 1, nov.2003, pp. 238–242.
- [72] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold, "4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G", Third Edition, Elsevier press, 2016.
- [73] ITU-R, *IMT Vision e Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and beyond*, Recommendation ITU-R M.2083, September 2015.
- [74] IEEE, 802.16.1-2012 - IEEE Standard for WirelessMAN-Advanced Air Interface for Broadband Wireless Access Systems, Published 2012-09-07.
- [75] M. Akdeniz, et al., "Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evaluation," *IEEE J. Sel. Area. Comm.* 32 (6) (June 2014).
- [76] H. Nikopour, H. Baligh, *Sparse Code Multiple Access*, 24th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, London, UK, September 8e11, 2013, pp. 332e336.
- [77] NGMN Alliance, *NGMN 5G White Paper* (17 February 2015).
- [78] *Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society (METIS)*, Deliverable D1.1: Scenarios, requirements and KPIs for 5G mobile and wireless system, Document ICT- 317669-METIS/D1.1, Version 1, April 29, 2013.
- [79] 4G Americas, *4G Americas Recommendation on 5G Requirements and Solutions*, October 2014.
- [80] *IMT-2020 (5G) Promotion Group, 5G Visions and Requirements*, White paper, 2020.
- [81] E. Semaan, F. Harrysson, A. Furuskair, H. Asplund, *Outdoor-to-indoor coverage in high frequency bands*, Globecom 2014 Workshop e Mobile Communications in Higher Frequency Bands, IEEE, 2014.
- [82] 3GPP TS 36.304: *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) procedures in idle mode*.
- [83] F. Boccardi, J. Andrews, H. Elshaer, M. Dohler, S. Parkvall, P. Popovski, S. Singh, *Why to decouple the uplink and downlink in cellular networks and how to do it*, *IEEE Comm. Magazine* (March 2016) 110e117.
- [84] Guy Pujolle, "Software Networks, Virtualization, SDN, 5G and Security", *Volume_1*, Revised and Updated second Edition, Wiley, 2020.
- [85] Trung Q. Duong, Xiaoli Chu, Himal A. Suraweera, "Ultra-dense Networks for 5G and Beyond, Modelling, Analysis, and Applications", Wiley, 2019.

- [86] Martin Sauter, “From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G, an Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband”, Third Edition, Wiley, 2017.
- [87] Mojtaba Vaezi, Zhiguo Ding, H. Vincent Poor, “Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond”, Springer Nature 2019.
- [88] J. Prados-Garzon, O. Adamuz-Hinojosa, and all “Handover Implementation in a 5G SDN-based Mobile Network Architecture”, IEEE International Symposium on Personal, 2016, pp1-6 DOI: 978-1-5090-3254-9/16/\$31.00 ©2016 IEEE.
- [89] M. Condoluci, and T. Mahmoodi, “Softwarization and virtualization in 5G mobile networks: benefits, trends and challenges”, Computer Networks, septembre 2018, pp1-53, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.09.005>.
- [90] J. Prados-Garzon, O. Adamuz-Hinojosa, and all “Handover Implementation in a 5G SDN-based Mobile Network Architecture”, IEEE International Symposium on Personal, 2016, pp1-6 DOI: 978-1-5090-3254-9/16/\$31.00 ©2016 IEEE.
- [91] X. Huang, P. Shi, and all, “Towards Trusted and efficient SDN Topology discovery: A lightweight topology verification scheme”, Computer Networks, 170-107119, Elsevier 2020, pp1-11, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107119>.
- [92] Q. Long, Y. Chen, and all, “Software Defined 5G and 6G Networks: a Survey”, Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature, November 2019, pp1-21, <https://doi.org/10.1007/s11036-019-01397-2>.
- [93] L. Contreras, L. Cominardi, and all, “Software-Defined Mobility Management: Architecture Proposal and Future Directions”, Springer Science+Business Media, pp. 1–11, January 2016, pp1-11, DOI: 10.1007/s11036-015-0663-7.
- [94] H. Wang, H. Xu, and all, “PrePass: Load Balancing with data plane resource constraints using commodity SDN switches”, Computer Networks, 178-107339, 2020, pp1-40, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107339>.
- [95] S. Hu, X. Wang, and M. Shakir, “A MIH and SDN-based Framework for Network Selection in 5G HetNet: Backhaul Requirement Perspectives”, IEEE ICC 2015 - Workshop on Next Generation Backhaul/Fronthaul Networks BackNets 2015, pp37-43, DOI: 10.1109/ICCW.2015.7247072.
- [96] C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, “SDN & NFV in 5G: Advancements and Challenges”, IEEE, 2017, pp1-5, DOI: 10.1109/ICIN.2017.7899398.
- [97] X. Cui, X. Gao, Y. Ma, “An Optimized Controller Placement Algorithm in 5G Based on SDN”, IEEE, 2020, pp816-820, DOI: 10.1109/IWCMC48107.2020.9148091.
- [98] S. Tayyaba, and M. Shah, “5G Cellular Network Integration with SDN: Challenges, Issues and Beyond”, International Conference on Communication, Computing and Digital Systems (C-CODE), 2017, pp48-53, DOI: 10.1109/C-CODE.2017.791890
- [99] M. Kjolleberg, K. Krlevska, and all, “Preventing DDos with SDN in 5G”, IEEE Globecom Workshops, 2019, pp1-7, DOI: 10.1109/GCWkshps45667.2019.9024497

- [100] A. Hussein, I. Elhadj, and all, "SDN VANETs in 5G: An Architecture for Resilient Security Services", IEEE, Fourth International Conference on Software Defined Systems (SDS), 2017, pp67-74 DOI: 10.1109/SDS.2017.7939143
- [101] Y. Qin, L. Zhang, and all, "Interference and topology-aware VM live migrations in software-defined networks", IEEE 21st International Conference on High Performance Computing and Communications (HPCC), Aug.2019, pp1068-1075, DOI: 10.1109/HPCC/SmartCity/DSS.2019.00152
- [102] Z. Wu, Q. Wei, and all, "A dynamic defense using client puzzle for identity-forgery attack on the south-bound of software defined networks", KSII Transactions on Internet & Information Systems, vol.11, February 2017, pp846-864, <https://doi.org/10.3837/tiis.2017.02.012>
- [103] D. Luong, Y. Hu, and all, "Metaheuristic Approaches to the Joint Controller and Gateway Placement in 5G-Satellite SDN Networks", IEEE, 2020, pp1-6, DOI: 10.1109/ICC40277.2020.9149373
- [104] O. Awobuluyi, J. Nightingale, and all, "Video Quality in 5G Networks", IEEE International Conference on Computer and Information Technology, Ubiquitous Computing and Communications, Dependable, Autonomic and Secure Computing, Pervasive Intelligence and Computing, 2015, pp1-6, DOI: 10.1109/CIT/IUCC/DASC/PICOM.2015.250
- [105] C. Bouras, A. Kollia, and E. Maligianni, "The techno-economic models for CR and SDN in 5G", IFIP, mars 2019, pp39-46 DOI: 10.23919/WMNC.2019.8881823
- [106] P. Iovanna, and F. Ubaldi, "SDN solutions for 5G transport networks", Photonics in Switching, Invited Papers IEEE, 2015, pp297-299, DOI: 10.1109/PS.2015.7329032
- [107] J. Zhang, W. Xie, and F. Yang, "An Architecture for 5G Mobile Network Based on SDN and NFV", ICWMMN Proceedings, 2015, pp87-92, DOI: 10.1049/cp.2015.0918
- [108] C. WANG, K. KIM, and H. YOUN, "PopFlow: a novel flow management scheme for SDN switch of multiple flow tables based on flow popularity", Higher Education Press and Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature, 2020, pp1-12, DOI: 10.1007/s11704-019-8417-5
- [109] A. Chilwan, and Y. Jiang, "Modeling and Delay Analysis for SDN-based 5G Edge Clouds", IEEE, 2020, pp1-7, DOI: 10.1109/WCNC45663.2020.9120849
- [110] A. Esmaily, K. Kravetska, and D. Gligoroski, "A Cloud-based SDN/NFV Testbed for End-to-End Network Slicing in 4G/5G", 3rd International Workshop on Advances in Slicing for Softwarized Infrastructures, 2020, pp29-35, DOI: 10.1109/NetSoft48620.2020.9165419

Résumé :

Actuellement, la quantité des informations échangées et manipulées est très importante, et par conséquent, elle nécessite des réseaux fiables et puissants afin de s'assurer la rapidité dans la transmission et l'efficacité dans le traitement. Parmi ses réseaux, on peut citer la 5G. Les réseaux 5G sont déployés pour répondre aux besoins de plusieurs industries sur une infrastructure partagée avec l'utilisation de concepts incluant le découpage communautaire. A noter que la technologie SDN donne plus d'efficacité et de flexibilité aux réseaux mobiles 5G qui devraient prendre en charge une quantité énorme de données liées à divers services limités.

Dans ce travail, nous avons proposé d'utiliser l'approche CP-SDN: Coopérative Protocol-SDN, pour garantir la coopération entre contrôleurs voisins qui vise à soulager les centres encombrés et à rediriger le flux supplémentaire vers les voisins, et de pallier au problème de la saturation du réseau, notamment dans des nœuds qui présentent une forte densité et observent des congestions. Le traitement CP-SDN maintient les bases de données des contrôleurs à jour et sélectionne que le chemin optimisé pour le flux supplémentaire en cas de congestion du réseau.

Nos calculs des performances de retard e-Mbb et m-iOT pour différentes densités de probabilité ont montré que le CP-SDN apporte plus de fiabilité et d'efficacité dans la réduction du délai de transmission et surmonte le schéma SDN existant. Cela lui permet d'être un candidat promoteur pour les réseaux 5G évolués à haute évolutivité.

Nous envisagerons de tester cette approche en incluant l'impact de la stabilité des liaisons physiques entre les différents centres de coopération. A cet effet, nous proposerons d'étudier le cas d'une coopération multiple au lieu d'un loadbalancing simple entre deux contrôleurs.

Mots Clés :5G, SDN,CP-SDN, QoS, IoT, m-IOT, eMBB, MFT.

Abstract:

Currently, the quantity of information exchanged and manipulated is very large, and consequently, it requires reliable and powerful networks in order to ensure speed in transmission and efficiency in processing. Among its networks, we can mention 5G. Networks are deployed to meet the needs of several industries on a shared infrastructure with the use of concepts including community slicing. Note that SDN technology gives more efficiency and flexibility to 5G mobile networks, which should support a huge amount of data, related to various limited services.

In this work, we proposed to use the CP-SDN: Cooperative Protocol-SDN approach, to guarantee cooperation between neighboring controllers, which aims to relieve congested centers and to redirect the additional flow to the neighbors, and to alleviate the problem of network saturation, especially in nodes, which have a high density and observe congestion. CP-SDN processing keeps controller databases up to date and selects only the optimized path for additional flow in the event of network congestion.

Our calculations of e-Mbb and m-iOT delay performance for different probability densities showed that CP-SDN provides more reliability and efficiency in reducing transmission delay and overcomes the existing SDN scheme. This allows it to be a promising candidate for advanced 5G networks with high scalability.

We will consider testing this approach by including the impact of the stability of the physical links between the different cooperation centers. To this end, we will propose to study the case of multiple cooperation instead of simple loadbalancing between two controllers.

Keywords-5G, SDN, CP-SDN, QoS, IoT, m-IOT, eMBB, MFT.

الملخص :

في الوقت الحالي ، تعد كمية المعلومات التي يتم تبادلها ومعالجتها كبيرة جداً ، وبالتالي فهي تتطلب شبكات موثوقة وقوية لضمان سرعة النقل والكفاءة في المعالجة. من بين شبكاتها ، يمكننا أن نذكر 5G. يتم نشر الشبكات لتلبية احتياجات العديد من الصناعات على بنية تحتية مشتركة باستخدام المفاهيم بما في ذلك تشريح المجتمع. لاحظ أن تقنية SDN توفر مزيداً من الكفاءة والمرونة لشبكات الهاتف المحمول 5G ، والتي يجب أن تدعم كمية هائلة من البيانات المتعلقة بخدمات محدودة مختلفة.

في هذا العمل ، اقترحنا استخدام CP-SDN: نهج البروتوكول التعاوني SDN ، لضمان التعاون بين وحدات التحكم المجاورة ، والتي تهدف إلى تخفيف ازدحام المراكز وإعادة توجيه التدفق الإضافي إلى الجيران ، والتخفيف من مشكلة تشعب الشبكة ، خاصة في العقد ذات الكثافة العالية وتلاحظ الازدحام. تحافظ معالجة CP-SDN على تحديث قواعد بيانات وحدة التحكم وتختار فقط المسار الأمثل لتدفق إضافي في حالة ازدحام الشبكة.

أظهرت حساباتنا لأداء تأخير e-Mbb و m-iOT لكثافات احتمالية مختلفة أن CP-SDN يوفر مزيداً من الموثوقية والكفاءة في تقليل تأخير الإرسال ويتغلب على مخطط SDN الحالي. وهذا يتيح لها أن تكون مرشحاً واعداً لشبكات الجيل الخامس المتقدمة ذات قابلية التوسع العالية.

سنأخذ في اختبار هذا النهج من خلال تضمين تأثير استقرار الروابط المادية بين مراكز التعاون المختلفة. تحقيقاً لهذه الغاية ، سنقترح دراسة حالة التعاون المتعدد بدلاً من موازنة الأحمال البسيطة بين جهازي تحكم.

الكلمات المفتاحية: 5G, SDN, CP-SDN, QoS, IoT, m-IOT, eMBB, MFT