

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

Département Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

Présenté par

ANIS GUETTAF

Filière : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Analyse de la qualité de service (QoS) dans les réseaux 5G

Soutenu le 29 /06 /2024 devant le jury composé de :

Pr .Dalila	ACHELI	UMBB	PRÉSIDENTE
Pr. Nouredine	MESSAOUDI	UMBB	EXAMINATEUR
Pr. Malek	BELHABCHIA	UMBB	EXAMINATEUR
Dr. Souad	REFAS	UMBB	PROMOTRICE
Pr. Yassine	MERAIHI	UMBB	CO-ENCADRANT

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Tout d'abord, je remercie chaleureusement Monsieur Yassine MERAIHI, mon directeur de mémoire, pour son encadrement, ses précieux conseils et son soutien tout au long de ce travail. Son expertise et ses encouragements ont été déterminants dans l'aboutissement de cette recherche. Je remercie également Madame Souad Ikram REFAS pour ses remarques constructives et ses suggestions pertinentes qui ont enrichi ce mémoire. Je souhaite exprimer ma reconnaissance à la Faculté des Sciences et de la Technologie, Département d'Électronique et Télécommunications, pour m'avoir fourni les ressources nécessaires et un environnement de travail propice à la recherche. Je tiens également à remercier Madame Dalila ACHELI, présidente de juré, Monsieur Malek BELHABCHIA, examinateur, et Monsieur Noureddine MESSAOUDI, examinateur, pour leurs évaluations et leurs précieux conseils lors de la soutenance. Je tiens à remercier mes collègues et amis, pour leur aide précieuse, leurs discussions stimulantes et leur soutien moral durant cette période de travail intense.

Enfin, j'adresse mes remerciements les plus sincères à ma famille, pour leur amour, leur patience et leur soutien indéfectible. Leur encouragement m'a donné la force de persévérer et d'atteindre mes objectifs.

Résumé

La cinquième génération des réseaux mobiles (5G) représente une avancée significative dans le domaine des communications sans fil, offrant des vitesses de transmission de données ultra-rapides, une faible latence et une connectivité fiable pour une multitude d'applications et de services. Avec l'émergence croissante de l'Internet des objets (IoT), des véhicules autonomes, de la réalité augmentée et d'autres technologies émergentes, la demande pour des réseaux 5G performants et fiables est en constante augmentation.

Cependant, pour exploiter pleinement le potentiel de la 5G, il est crucial de garantir une qualité de service (QoS) optimale, en particulier dans des environnements complexes et dynamiques. Cette thèse se concentre sur l'analyse approfondie de la QoS dans les réseaux 5G en utilisant MATLAB comme outil principal de modélisation et de simulation. La QoS est un indicateur clé de l'expérience utilisateur, englobant des aspects tels que le débit, la latence et la fiabilité des communications. Comprendre et optimiser la QoS dans les réseaux 5G est essentiel pour fournir des performances optimales aux utilisateurs et garantir le succès des applications et des services qui reposent sur cette technologie.

Mots clés : 5G, QoS, MATLAB, communications sans fil, latence, débit, fiabilité

Abstract

The fifth generation of mobile networks (5G) represents a significant advance in wireless communications, offering ultra-fast data transmission speeds, low latency and reliable connectivity for a multitude of applications and services. With the growing emergence of the Internet of Things (IoT), autonomous vehicles, augmented reality and other emerging technologies, the demand for high-performance, reliable 5G networks is constantly growing.

However, to fully exploit the potential of 5G, it is crucial to guarantee optimal quality of service (QoS), especially in complex and dynamic environments. This thesis focuses on the in-depth analysis of QoS in 5G networks using MATLAB as the main modeling and simulation tool. QoS is a key indicator of user experience, encompassing aspects such as throughput, latency and reliability of communications. Understanding and optimizing QoS in 5G networks is essential for delivering optimal performance to users, and ensuring the success of applications and services that rely on this technology.

Keywords : 5G, QoS, MATLAB, wireless communications, latency, throughput, reliability

المخلص

يُمثل الجيل الخامس من شبكات الهاتف المحمول (5G) تقدماً كبيراً في مجال الاتصالات اللاسلكية، حيث يوفر سرعات فائقة للبيانات ووقت استجابة منخفض واتصال موثوق به للعديد من التطبيقات والخدمات. مع الظهور المتزايد لإنترنت الأشياء (IoT) والمركبات ذاتية القيادة والواقع المعزز وغيرها من التقنيات الناشئة، يتزايد الطلب على شبكات الجيل الخامس 5G عالية الأداء والموثوقة باستمرار.

ومع ذلك، وللاستفادة الكاملة من إمكانات شبكات الجيل الخامس، من الضروري ضمان الجودة المثلى للخدمة (QoS)، خاصة في البيئات المعقدة والديناميكية. تركز هذه الأطروحة على التحليل المتعمق لجودة الخدمة في شبكات الجيل الخامس باستخدام برنامج MATLAB كأداة رئيسية للنمذجة والمحاكاة. تُعد جودة الخدمة مؤشراً رئيسياً لتجربة المستخدم، حيث تشمل جوانب مثل الإنتاجية والكمون وموثوقية الاتصالات. يعد فهم جودة الخدمة وتحسينها في شبكات الجيل الخامس أمراً أساسياً لتقديم الأداء الأمثل للمستخدمين وضمان نجاح التطبيقات والخدمات التي تعتمد على هذه التقنية.

الكلمات الدالة : 5G، جودة الخدمة، MATLAB، الاتصالات اللاسلكية، زمن الوصول، الإنتاجية، الموثوقية

Table des matières

Introduction Générale	1
1 Etat de l'art des reseaux cellulaire	2
1.1 Introduction	2
1.2 Evolution des reseaux cellulaires	2
1.2.1 La première génération (1G)	3
1.2.2 Deuxième génération (2G)	3
1.2.2.1 Présentation de l'infrastructure d'un réseau GSM	4
1.2.2.2 Le réseau GPRS (2.5G)	4
1.2.2.3 EDGE Enhanced Data rate for GSM Evolution	5
1.2.3 Troisième génération (3G)	5
1.2.3.1 Technologie HSDPA (3.5G)	6
1.2.3.2 Technologie HSUPA (3.75G)	6
1.2.4 Quatrième génération (4G)	6
1.2.4.1 Réseau LTE	7
1.2.4.2 Le réseau LTE-A	7
1.2.4.3 Limitations de la 4G	7
1.3 Evolution vers La cinquième génération (5G)	8
1.3.1 En quoi la 5g est-elle différente de la 4g et des anciennes générations?	8
1.3.2 Objectif d'un réseau 5G	9
1.3.3 La 5g, comment ça marche?	10
1.3.3.1 Ondes Millimétriques	11
1.3.3.2 Massive MIMO	11
1.3.3.3 Beamforming	12
1.3.3.4 Small Cells (Petites cellules)	12
1.3.4 Catégories d'usage 5G	13
1.3.4.1 Haut débit mobile amélioré (eMBB) :	13
1.3.4.2 Communications ultra-fiables et à faible latence (URLLC) :	13
1.3.4.3 Communications massives de type machine (mMTC) :	14
1.3.4.4 Indicateurs clés de performance (KPI)	15
1.3.5 Quelques domaines d'application de la 5G	16
1.4 Sécurité pour les communication 5G	17
1.5 défis soulevés par la 5G	18
1.5.1 défis soulever par la 5G par rapport a la QOS	18
1.6 Conclusion	19

2	Etudes détaillées de la 5G	20
2.1	Introduction	20
2.2	Architecture d'un réseau 5G	20
2.2.1	Équipement utilisateur	23
2.2.2	cœur de réseau (5GC)	23
2.2.2.1	Caractéristiques et Avantages du 5GC	24
2.2.3	Réseau d'accès radio NG-RAN	25
2.2.4	Mobilité en 5G	25
2.2.4.1	Gestion de la localisation	26
2.2.4.2	Gestion de la relève (Handover)	26
2.3	Modes de déploiement du réseau 5G	27
2.3.1	Options de déploiement	28
2.4	L'interface radio New Radio (NR), Numéologies et les fréquences utilisées pour la 5G	31
2.4.1	Forme d'onde 5G	31
2.4.2	Numéologie	32
2.4.3	Structure de trame 5G	33
2.5	Techniques de transmission	33
2.5.1	D'un point de vue antenne	34
2.5.1.1	Système SISO	34
2.5.1.2	Système SIMO	34
2.5.1.3	Système MISO	35
2.5.1.4	Système MIMO	36
2.5.2	Beamforming	37
2.5.3	D'un point de vue propagation (LOS, NLOS)	37
2.6	Perte de Trajet pour les Réseaux 5G	39
2.6.1	Modèle de Propagation en Ligne de Vue (LOS) pour 3GPP	39
2.6.1.1	Modèles en espace libre (Free-Space Models)	39
2.6.1.2	Modèle de Friis	39
2.6.2	Modèle de Propagation en non Ligne de Vue (NLOS) pour 3GPP	40
2.6.2.1	Canal de Rayleigh	40
2.6.2.2	Canal de Rice	41
2.6.2.3	Distribution de Nakagami	42
2.6.3	Bruit et interférences	43
2.7	Les types de canaux de transmission	44
2.7.0.1	Les canaux physiques	44
2.7.0.2	Canaux de Contrôle	45
2.7.0.3	Canaux Logiques	45
2.7.0.4	Canaux de Transport	46
2.7.0.5	Canaux de Synchronisation	46
2.7.0.6	Canaux de Référence	46
2.8	Techniques d'accès au canal	46
2.8.1	Modulations OFDM et OFDMA	46
2.8.2	Technique d'accès NOMA	47
2.9	Conclusion	49

3	La qualité de service dans la 5G	50
3.1	Introduction de la qualité de service	50
3.2	Qu'est-ce que la qualité de service dans le réseau?	50
3.3	Métriques de la qualité de service	51
3.3.1	Bande passante	52
3.3.2	Délai de bout en bout	52
3.3.3	Gigue (variation du délai)	52
3.3.4	La perte des paquets	52
3.4	Techniques d'optimisation de la QoS dans la 5G	52
3.4.1	Prioritisation et Traffic Shaping	52
3.4.2	Allocation des Ressources et Planification	54
3.4.3	Edge Computing	55
3.5	Conclusion	56
4	Simulations d'Optimisation pour Améliorer la QoS	58
4.1	Introduction	58
4.2	Analyse des Performances	58
4.3	Résultats Numériques	59
4.3.1	Optimisation par Algorithme Génétique (GA)	60
4.3.2	Définition de l'Algorithme Génétique	61
4.3.3	Mise en Œuvre de l'Optimisation	62
4.4	Conclusion	63
	Conclusion Générale	64

Table des figures

1.1	Evolution des réseaux cellulaires [1]	3
1.2	Système 2G [6]	4
1.3	Architecture 3G UMTS [6]	6
1.4	Présentation générale sur le système LTE [13]	7
1.5	Illustration basées sur le Massive MIMO [18]	11
1.6	Illustration sur le Beamforming [18]	12
1.7	Catégories d'usages de la 5G [20]	13
1.8	Domaines d'application 5G [20]	16
2.1	Aperçu du 5G systeme [26]	21
2.2	session PDU et flux QOS : plan utilisateur (UP) [28]	22
2.3	la séparation fonctionnel entre NG-RAN et 5GC [28]	22
2.4	architecture du système 5GC [30]	23
2.5	Architecture globale du réseau NG-RAN [29]	25
2.6	Handover intracellulaire [35]	26
2.7	Handover intercellulaire [35]	27
2.8	Architecture SA pour système 5G [26]	28
2.9	Architecture NSA pour système 5G [26]	28
2.10	Un aperçu des options de déploiement de la NSA et SA [37]	29
2.11	Un aperçu des options de déploiement de la NSA et SA [37]	29
2.12	Option 4 de déploiement NSA 5G [37]	30
2.13	Option 7 de déploiement SA 5G [26]	31
2.14	Alignement temporel pour les différentes numérolgies [38]	32
2.15	Organisation des trames dans la 5G-NR [40]	33
2.16	Longueur des slots pour chaque numérolgie [40]	33
2.17	Système SISO [41]	34
2.18	Système SIMO [41]	35
2.19	Système MISO [41]	35
2.20	Système MIMO [41]	36
2.21	Type de propagation LOS [47]	38
2.22	Type de propagation NLOS [47]	38
2.23	Technique d'accès OFDMA [58]	47
2.24	Différence entre OFDMA et NOMA pour deux utilisateurs [60]	48
2.25	Annulation des interférences successives [62]	48
3.1	Application de la QOS	51

4.1	Débit vs Distance	59
4.2	Latence Moyenne vs Charge du Réseau	60
4.3	Fiabilité de la Connexion vs SNR	61
4.4	genetic Algorithm optimisation [80]	61
4.5	optimisation des paramètres	62

Liste des tableaux

1.1	Comparaisons entre les caractéristiques des générations mobile	9
1.2	Exigences minimales de performance technique de l'IMT 2020 [21]	15
2.1	Comparaison entre MIMO, MISO, SIMO et SISO.	37
2.2	Modulation et codage des canaux pour chaque canal	45

Introduction Générale

La cinquième génération de réseaux mobiles, communément appelée 5G, représente une avancée majeure dans le domaine des communications sans fil. Elle se distingue par des vitesses de transmission de données ultra-rapides, une latence extrêmement faible et une connectivité fiable, répondant ainsi aux besoins croissants d'applications et de services variés tels que l'Internet des objets (IoT), les véhicules autonomes, la réalité augmentée, et bien d'autres technologies émergentes.

Dans le premier chapitre, nous aborderons l'état de l'art des réseaux cellulaires en retraçant l'évolution des générations précédentes, de la 1G à la 4G. Nous mettrons en lumière les principales caractéristiques et innovations de chaque génération, ainsi que leurs limitations, afin de mieux comprendre les avancées apportées par la 5G.

Le deuxième chapitre se concentrera sur les caractéristiques techniques et les innovations introduites par la 5G. Nous discuterons des nouvelles architectures réseau, des technologies d'accès radio, ainsi que des améliorations en termes de débit, de latence, et de capacité.

Le troisième chapitre portera sur la qualité de service (QoS) dans les réseaux 5G. Nous analyserons les différents facteurs influençant la QoS, les mécanismes de gestion de la QoS, et les défis spécifiques posés par les nouvelles applications et services. Une attention particulière sera accordée à la manière dont la 5G répond à ces exigences.

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons les méthodologies et les outils utilisés pour évaluer et améliorer la QoS dans les réseaux 5G, avec un focus particulier sur les simulations réalisées à l'aide de MATLAB. Nous décrirons les scénarios de simulation, les paramètres étudiés, et les résultats obtenus.

Enfin, pour la conclusions et perspectives. Nous résumerons les principaux résultats de notre étude, discuterons des implications pour le déploiement futur des réseaux 5G, et proposerons des directions pour des recherches futures afin de continuer à améliorer la QoS dans ces réseaux.

En somme, cette étude vise à fournir une analyse approfondie de la qualité de service dans les réseaux 5G, en mettant en évidence les défis et les solutions potentielles pour garantir des performances optimales dans un environnement de plus en plus exigeant

Chapitre 1

Etat de l'art des reseaux celulaire

1.1 Introduction

Aujourd'hui, l'utilisation des technologies de communication mobile est devenue très large, les réseaux de télécommunications sont confrontés à une grande hétérogénéité. Jusqu'à maintenant, chacune des générations (1G, 2G, 3G, 4G) de réseaux mobiles a été implémenté pour offrir l'utilisation des applications spécifiques. Le contraire en ce qui concerne la 5G (5th generation), qu'elle devra offrir des divers besoins. En effet, pour ce nouveau réseaux 5G, ils apparaissent de nouveau type d'objets communicants à côté des utilisateurs cellulaires classiques, où ce qu'on appelle maintenant l'Internet des objets (IOT Internet Of Things). La 5G est la cinquième génération. Elle a une multitude de fonctionnalités très avancées pour pouvoir résoudre plusieurs problèmes de notre vie quotidienne moderne. La 5G ne s'intéresse pas seulement aux besoins des opérateurs de téléphonie mobile et des communications grand public, mais elle ouvre aussi de nouvelles perspectives de la future. Elle permet la coexistence d'applications et d'utilisations très diverses, unifiés dans une même technologie pour faciliter l'arriver à une société complètement connectée. Cela permettra à tout le monde d'avoir un accès illimité aux informations et aux conversations virtuelles à tout moment, et en tout lieu pour tout le monde. Et il ne s'agit pas seulement d'appeler les gens, mais cela inclut également la possibilité de se connecter à tous les appareils et la disponibilité n'importe où, n'importe quand. L'idée qui commence à se dessiner derrière la notion de la 5G est qu'elle ne correspondrait pas à une simple augmentation des vitesses, comme c'était le cas pour les générations précédentes (3G et 4G). La 5G cible une grande variété de secteurs, qui n'auraient pas forcément d'autre élément commun que cette technologie, mais qui sont des bases importantes de la société dans les domaines des : médias, l'énergie, la santé, l'éducation, l'industrie ou les transports.

1.2 Evolution des réseaux cellulaires

Avant d'aborder l'état actuel des technologies utilisées aujourd'hui, il est pertinent de retracer l'évolution des réseaux cellulaires. Cette démarche permet de mieux comprendre notre point de départ et de nous situer dans le contexte actuel. La communication mobile a connu une évolution significative au fil des décennies, passant par différentes générations de dispositifs et de réseaux conformes aux normes de télécommunication en constante évolution.

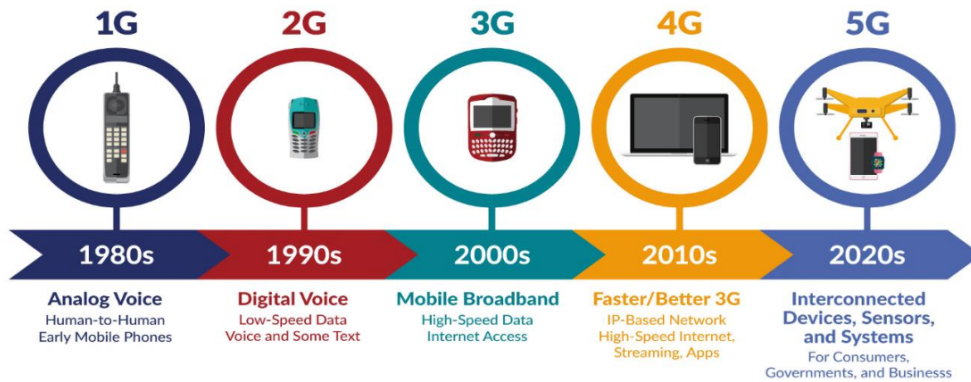


FIGURE 1.1 – Evolution des réseaux cellulaires [1]

1.2.1 La première génération (1G)

La première génération de réseaux cellulaires (1G) est une technologie de téléphonie mobile analogique développée dans les années 1980 [2]. Les systèmes 1G utilisaient des signaux analogiques pour la communication sans fil et ont été remplacés progressivement par des systèmes de deuxième génération (2G) basés sur la technologie numérique. Les principaux systèmes 1G sont les suivants :

- AMPS : lancé aux États-Unis, est un réseau analogique basé sur la technologie FDMA
- c'est la version européenne d'AMPS. Il a été développé pour utiliser la bande de fréquence de 900 MHz et a été largement utilisé au Royaume-Uni, en Europe continentale, à Hong Kong et au Japon. Comme AMPS, TACS utilisait également la technologie FDMA.
- est une version améliorée de TACS développée au Royaume-Uni. Il utilisait un plus grand nombre de canaux de communication.

Les systèmes de première génération (1G) présentaient des limites en termes de capacité, de qualité de voix et de sécurité, et étaient également sujets aux interférences. Par conséquent, ils ont été remplacés par des systèmes de deuxième génération (2G) basés sur la technologie numérique, offrant ainsi une qualité vocale améliorée et une capacité accrue.

1.2.2 Deuxième génération (2G)

Le système mobile 2G a été développé dans les années 1990, utilisant le concept de modulation numérique, et a été lancé grâce à la technologie GSM. La 2G prend également en charge davantage de bandes de fréquences. Avant l'avènement de la 3G, deux générations intermédiaires de la 2G ont été développées : la 2,5 G et la 2,75 G, représentées respectivement par les technologies GPRS et EDGE. Néanmoins, plusieurs opérateurs ont annoncé que la technologie 2G sera désactivée sur leurs réseaux afin qu'ils puissent récupérer ces bandes radio et les réutiliser pour de nouvelles technologies, mais en Algérie, cette étape risquera de prendre beaucoup de temps car sur les 45,846 millions abonnés actifs, 14,385 millions sont des abonnés au réseau GSM soit 31,38% d'abonnés [2] , et cela s'explique majoritairement par l'utilisation de terminaux mobiles qui ne supportent pas les nouvelles technologies et qui doivent être changés Les principales caractéristiques du système 2G sont les suivantes :

- Bande de fréquence : Le standard GSM utilise les bandes de fréquence de 900 MHz et de 1800 MHz en Europe [3].
- Technique d'accès : Les réseaux 2G utilisent la technique d'accès TDMA, qui se base sur une technique de découpage temporel des canaux de communication, afin d'augmenter le volume de

données transmises simultanément [4].

- Débit : Grâce aux réseaux 2G, il est possible de transmettre de la voix ainsi que des données numériques de faible volume, notamment des messages textes (SMS) ou encore des messages multimédias (MMS). La norme GSM permet un débit maximal de 9,6 Kbps.

1.2.2.1 Présentation de l'infrastructure d'un réseau GSM

Le réseau GSM a pour premier rôle de permettre des communications entre abonnés mobiles (GSM) et abonnés du réseau téléphonique commuté (RTC - réseau fixe).

- Le réseau GSM s'interface avec le réseau RTC et comprend des commutateurs.
- Le réseau GSM se distingue par un accès spécifique : la liaison radio.
- Le réseau GSM est composé de trois sous-ensembles :
 - Le sous-système radio « BSS » contenant la station mobile, la station de base et son contrôleur qui assure la transmission radioélectrique et la gestion de la ressource radio (BTS et BSC) ;
 - Le sous-système réseau ou d'acheminement « NSS » : Etablissement des appels et mobilité ;
 - Le sous-système opérationnel ou d'exploitation et de maintenance « OSS » : admission sur réseau [5]

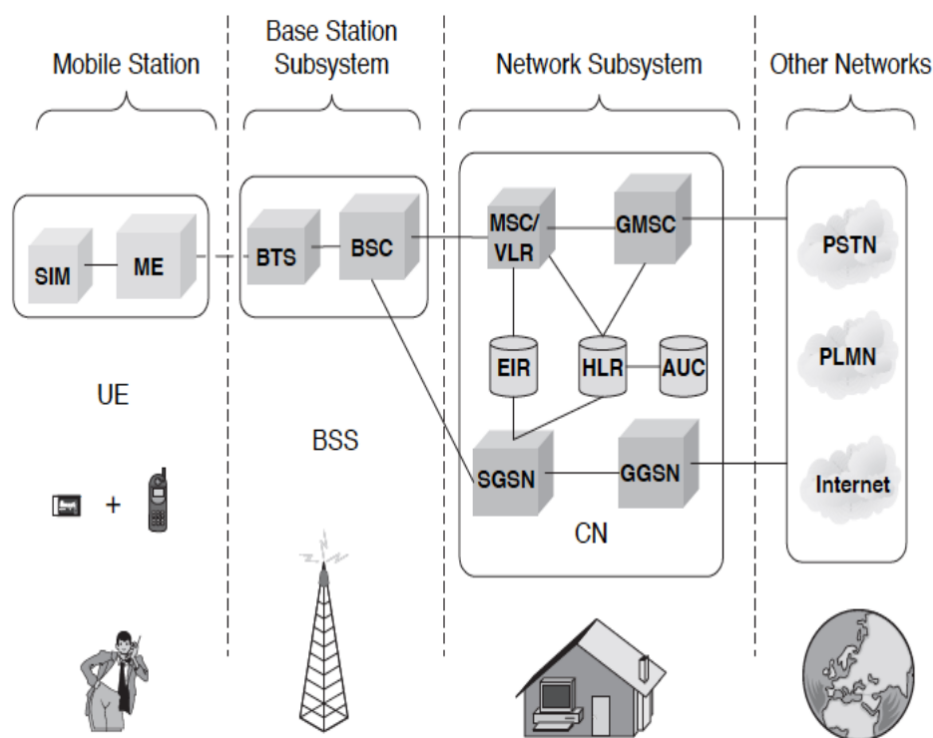


FIGURE 1.2 – Système 2G [6]

1.2.2.2 Le réseau GPRS (2.5G)

Le réseau GPRS vient d'ajouter un certain nombre de « modules » sur le réseau GSM sans changer le réseau existant. Ainsi son but est de conserver l'ensemble des modules de l'architecture GSM, nous verrons par ailleurs que certains modules GSM seront utilisés pour le fonctionnement du réseau GPRS. La mise en place d'un réseau GPRS va permettre à un opérateur de proposer de nouveaux services de

type « Data » à ses clients. Le GPRS est en mode paquets. [7]

1.2.2.3 EDGE Enhanced Data rate for GSM Evolution

Le service GPRS permet de considérer le réseau GSM comme un réseau à transmission de données par paquets, compatible avec les réseaux IP et X.25. Les débits instantanés maximaux peuvent théoriquement atteindre 171.2kbits/s au niveau radio. Pour augmenter encore les débits offerts, une nouvelle modulation est spécifiée au sein du projet Enhanced Data for GSM Evolution, EDGE. En utilisant une modulation 8PSK, il est donc possible de multiplier les débits par trois par rapport au GPRS (qui utilise la même modulation GMSK à deux états que le GSM). La combinaison de l'EDGE et du GPRS, appelée GERAN (GSM/EDGE Radio Access Network), est une proposition "d'accès" au réseau UMTS (Universal Mobile Terrestrial System). La combinaison d'EDGE avec les services circuits classiques du GSM, permet de définir des circuits de données à des débits allant jusqu'à 43.2kbits/s, tout en utilisant un seul canal physique. Combiné au GPRS c'est-à-dire à la fourniture de services de données en mode paquet. EDGE permet là encore d'augmenter sensiblement les débits offerts. [8]

1.2.3 Troisième génération (3G)

La troisième génération de réseaux mobiles (3G) regroupe deux familles de technologies ayant connu un succès commercial : l'UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), issu du GSM et largement déployé autour du globe, et le CDMA2000, issu de l'IS-95 et déployé principalement en Asie et en Amérique du Nord. Les interfaces radio de ces deux familles reposent sur des caractéristiques techniques proches, notamment un schéma d'accès multiples à répartition par les codes (CDMA). La 3G est caractérisée par la volonté des industriels de télécommunications de définir une norme au niveau mondial. Les enjeux étaient d'offrir une itinérance globale aux utilisateurs, mais également de réduire les coûts unitaires des terminaux mobiles et des équipements de réseau grâce aux économies d'échelle. Dans cette perspective, ces entreprises, en particulier celles issues du monde GSM, se sont regroupées au sein du consortium 3GPP. Cette démarche aboutit à l'élaboration de la norme UMTS à la fin des années 1990. Cette première version de la norme est appelée Release 99. Les innovations associées au système UMTS ont principalement trait au réseau d'accès, celui-ci s'interfaçant avec le réseau cœur GPRS. Les objectifs de l'UMTS étaient d'accroître la capacité du système pour le service voix mais surtout d'améliorer le support des services de données [9]. La principale différence avec le GSM réside dans son interface radio, qui est basée sur la technique d'étalement de spectre à séquence directe. L'étalement de spectre implique la transmission d'informations sur un signal occupant un spectre bien plus large que nécessaire. Cette méthode, initialement développée pour des applications militaires afin d'assurer la confidentialité et de résister efficacement aux interférences, a été progressivement adoptée dans les systèmes de téléphonie mobile cellulaire depuis le milieu des années 90. En Algérie, au 31 décembre 2017, le parc d'abonnés 3G a atteint 21,592 millions avec un taux de pénétration au service téléphonique de troisième génération de 51,17% [10].

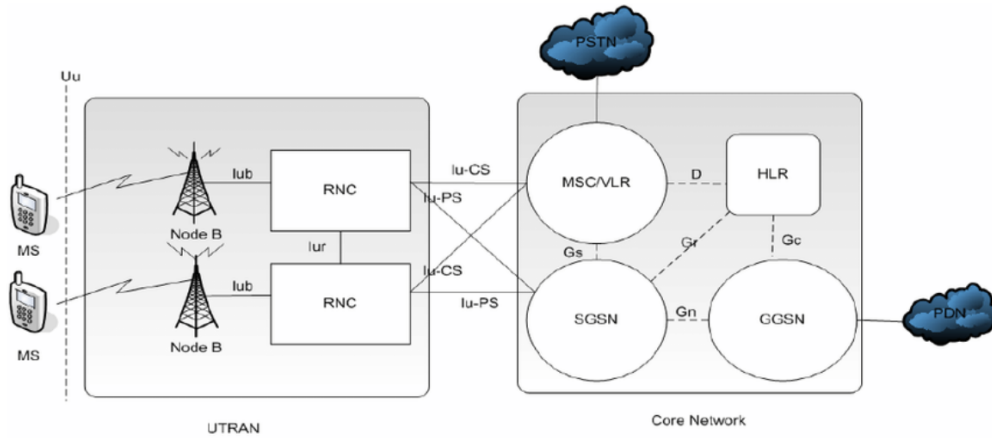


FIGURE 1.3 – Architecture 3G UMTS [6]

1.2.3.1 Technologie HSDPA (3.5G)

La troisième génération (UMTS) impose des investissements énormes pour des débits qui ne sont pas éloignés de ceux du GPRS et se voit rapidement remplacée par la nouvelle génération (3.5G), appelée HSDPA. Cette nouvelle technologie offre des débits pouvant aller au-delà de 10 Mbps sur le lien descendant [11]. Le HSDPA peut être installé et déployé sans changer radicalement l'architecture de l'UMTS. Il permet du coup aux opérateurs de réaliser cette évolution à moindre coût.

1.2.3.2 Technologie HSUPA (3.75G)

La 3.75G est une variante de HSDPA sur la voie montante. HSUPA peut être considéré comme le successeur de HSDPA, il porte un débit montant (Up Link) à 5,8 Mbps théorique, le flux descendant (Down Link) étant de 14 Mbps comme en HSDPA [12]. L'intérêt de cette technologie sera d'offrir la possibilité d'émettre vers d'autres mobiles toutes sortes des documents électroniques (images, vidéos...) favorisant ainsi le développement de l'Internet haut débit mobile.

1.2.4 Quatrième génération (4G)

La 4G est une technologie de réseau sans fil introduite en 2010, développée dans le but d'offrir des performances supérieures à celles des générations précédentes. Elle vise à fournir des services voix et données haut débit, de grande capacité, sécurisés et à moindre coût. Les améliorations clés apportées par la 4G sont les suivantes :

- **Bande de fréquence** : Les réseaux LTE utilisent une bande de fréquence de 800 MHz, 1800 MHz et 2600 MHz, ce qui leur permet d'offrir des vitesses plus élevées et une meilleure couverture.
- **Technique d'accès** : La 4G utilise la technologie OFDMA en liaison descendante et SC-FDMA en liaison montante, qui permet de transmettre des données simultanément à plusieurs utilisateurs et d'optimiser l'utilisation du spectre.
- **Débit** : La 4G est conçue pour offrir des débits plus élevés, avec des objectifs de 100 Mbps en liaison descendante et jusqu'à 75 Mbps en liaison montante.

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

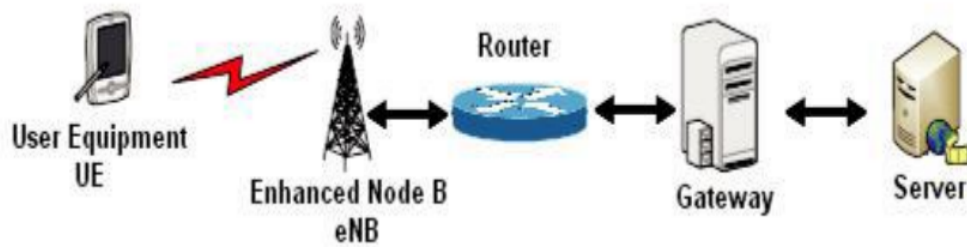


FIGURE 1.4 – Présentation générale sur le système LTE [13]

1.2.4.1 Réseau LTE

Les idées et les projets visant à développer la technologie LTE (Long Term Evolution) sont menés par l'organisme de normalisation 3GPP, qui vise à élaborer des normes techniques pour les futurs téléphones mobiles de quatrième génération. Cette technologie est conçue pour atteindre des vitesses de transfert de données très élevées. En théorie, il peut atteindre des vitesses de liaison montante d'environ 50 Mb/s et de liaison descendante de 100 Mb/s, avec une plus grande couverture, plus d'appels par cellule et une latence plus faible. Le LTE implique des modifications du cœur du réseau et des émetteurs radio. La norme LTE définie par l'alliance 3GPP1 est d'abord considérée comme la norme « 3.9G » de troisième génération (car proche de la 4G), précisée dans le cadre de la technologie 2000, car dans les « versions 8 et 9 » de cette norme elle ne se conforme à toutes les spécifications techniques internationales spécifiées par l'Union des télécommunications (UIT) pour la norme 4G.

1.2.4.2 Le réseau LTE-A

La LTE-A (Long Term Evolution - Advanced) est considéré comme étant la 4.5G ou bien la passerelle entre la LTE (4G) et la 5G. La LTE-A a été introduit par la 3GPP dans la Release 10 (RL10) qui a vu le jour dans les années 2012. LTE Advanced est donc une évolution de la norme LTE avec des compléments fonctionnels qui permettent une introduction progressive des nouvelles fonctions dans les réseaux LTE préexistants [9]. Cette technologie a été créée afin de booster la LTE en termes de débit, temps de latence, capacité, couverture et diminuer l'interférence surtout dans le sens ascendant. La LTE-A est considéré par les connaisseurs du domaine de la télécommunication comme la vrai 4eme génération ; car c'est avec les facteurs introduit dans cette 3GPP RL10 qu'on a pu obtenir de meilleures performances.

1.2.4.3 Limitations de la 4G

Le monde est en train de devenir de plus en plus numérique et connecté, avec l'émergence de nouvelles technologies telles que la réalité mixte, l'imagerie haute résolution, les véhicules autonomes, l'Internet des objets, et bien plus encore . Cela génère une quantité croissante de données, ce qui nécessite la mise en place de nouveaux systèmes de communication dans divers domaines tels que la santé, les transports, le climat, etc. Pour répondre à cette augmentation des données, des progrès significatifs doivent être réalisés dans les systèmes de télécommunications mobiles [14]. La 4G a amélioré plusieurs paramètres tels que le débit et la bande passante par rapport aux anciennes générations de réseaux mobiles. Elle permet une navigation internet rapide et fiable via des smartphones, des tablettes ou des ordinateurs portables. Cependant, la 4G ne peut pas répondre aux exigences de certains scénarios

spéciaux avec une densité de trafic élevée, un grand nombre de connexions et une mobilité élevée. C'est pourquoi l'industrie du téléphone mobile a choisi de développer le réseau de cinquième génération (5G) pour résoudre les problèmes rencontrés par la 4G.

1.3 Evolution vers La cinquième génération (5G)

Les précédentes générations de téléphonie mobile, à savoir la 2G, la 3G et la 4G, ont toutes suivi une évolution progressive, chacune représentant une amélioration et une mise à jour par rapport à la précédente. Cependant, avec l'avènement de la 5G, une rupture technologique majeure s'est produite. La 5G est une nouvelle technologie d'accès radio développée par le 3GPP en 2020, visant à devenir la nouvelle norme en matière d'interface radio. Son objectif est de réduire la latence, d'augmenter les débits de données, de gérer un volume croissant de trafic de données et de fournir une connectivité permanente et diversifiée.

1.3.1 En quoi la 5g est-elle différente de la 4g et des anciennes générations ?

Il n'y a pas de différence fondamentale en termes de codage du signal et de méthode de multiplexage entre l'interface radio 4G et 5G, qui utilise la modulation QAM et le multiplexage OFDMA de la 4G avec des paramètres optimisés. La radio 5G est une 4G améliorée, s'appuyant sur un cœur de réseau révolutionné à terme pour déployer une palette de service étendus et personnalisés [15]. La 5G va utiliser plus de fréquences et des fréquences différentes de la 4G. Elle va tout d'abord permettre de désengorger le réseau 4G, proche de la saturation. Grâce à des débits beaucoup plus élevés, une latence beaucoup plus faible et la possibilité de prendre en charge un plus grand nombre d'appareils, la 5G va permettre de développer des usages totalement différents de la 4G, comme la télémédecine, les véhicules autonomes, ou l'automatisation des usines.

TABLE 1.1 – Comparaisons entre les caractéristiques des générations mobile

Caractéristiques	1G	2G	3G	4G	5G
Débit maximal	171.2 Kbit/s	9.6Kbit/s	1.9 Mbit/s	1 Gbit /s	20 Gbit /s
Vitesse (Km/h)	/	/	/	350	500
Latence (ms)	/	/	150	10	1
Efficacité énergétique du réseau	/	/	/	0,1(Mbit/s/m ²)	10(Mbit/s/m ²)
Bande passante de donnée	2Kbps	14.4-64Kbps	2Mbps	2Mbps à 1Gbps	1Gbps et plus selon le besoin
La bande de fréquence	150Mhz	1.8Ghz	2Ghz	2 à 8 GHz	3 à 300 GHz
Accès multiple	FDMA	TDMA, CDMA	CDMA	CDMA	CDMA,BDMA
Les technologies	Analogique	Numérique	Large bande passante CDMA, technologie IP	IP unifiée, intégration transparente des réseaux LAN/WAN/PAN et WLAN à large bande	IP unifiée, intégration transparente des réseaux LAN/WAN/PAN /WLAN à large bande et technologies avancées basées sur modulation OFDM utilisée en 5G
Service	Téléphonie mobile (voix)	Voix numérique, messagerie courte de capacité supérieure en paquets	Audio, vidéo et données intégrées de haute qualité	Accès dynamique aux informations sur les appareils portables, streaming HD, itinérance mondiale	Accèsdynamique aux informations sur les appareils portables, streaming HD, toute demande des utilisateurs

1.3.2 Objectif d'un réseau 5G

Contrairement aux réseaux mobiles Précédant , la 5G ne sera pas principalement axée sur la téléphonie. Cette particularité en fait son originalité. Le principal objectif d'un réseau 5G est d'améliorer considérablement les performances des réseaux sans fil par rapport à la génération précédente (4G LTE) en termes de vitesse, de latence, de capacité et de fiabilité. Voici quelques objectifs spécifiques :

- **Vitesse accrue** :La 5G vise à offrir des vitesses de téléchargement et de téléversement considérablement plus rapides par rapport aux générations précédentes. En fournissant des débits plus

élevés, elle permettra de répondre à la demande croissante de transmission de données à grande vitesse pour les applications gourmandes en bande passante telles que la diffusion de contenu vidéo haute définition, le streaming en temps réel et les jeux en ligne [16].

- **Latence réduite** : Un autre objectif majeur de la 5G est de réduire la latence, c'est-à-dire le délai entre l'envoi d'une requête et la réception d'une réponse. En diminuant la latence, la 5G améliore l'expérience utilisateur pour les applications qui exigent des temps de réponse rapides, comme les jeux en ligne, la réalité virtuelle et augmentée, ainsi que les communications critiques telles que la télémédecine et les véhicules autonomes.
- **Capacité accrue** : Avec l'explosion de l'Internet des Objets (IoT) et la prolifération des appareils connectés, la 5G vise à augmenter la capacité du réseau pour prendre en charge un nombre massif de périphériques connectés simultanément. Cela permettra de soutenir efficacement les déploiements à grande échelle d'applications IoT dans des domaines tels que les villes intelligentes, l'industrie 4.0 et la surveillance environnementale [16].
- **Amélioration de la Fiabilité et de la Qualité de Service** : La 5G cherche à garantir une connectivité réseau hautement fiable et une qualité de service cohérente pour une variété d'applications et d'utilisateurs. Cela inclut la fourniture de performances réseau garanties pour les applications critiques telles que la santé connectée, les services d'urgence et les communications industrielles [17].
- **Réduction de la Consommation d'Énergie** : En introduisant des techniques d'optimisation énergétique et en améliorant l'efficacité du réseau, la 5G vise à réduire la consommation d'énergie globale des systèmes de communication mobile. Cela permettra de prolonger la durée de vie des batteries des appareils mobiles et de réduire l'empreinte carbone des réseaux de télécommunication.
- **Prise en charge de nouvelles applications** : Enfin, la 5G cherche à ouvrir la voie à de nouvelles applications et cas d'utilisation qui n'étaient pas possibles avec les générations précédentes de technologies mobiles. Cela comprend les applications liées à la réalité augmentée et virtuelle, les services basés sur la localisation, les réseaux de capteurs en temps réel et bien d'autres encore [16].

Ensemble, ces objectifs définissent la vision globale de la 5G en tant que technologie transformative qui révolutionnera les communications mobiles et ouvrira la porte à un large éventail d'innovations et de possibilités dans les années à venir.

1.3.3 La 5g, comment ça marche ?

La 5G, c'est un réseau mobile appelé à prendre le relais de la 4G. Or, pour fonctionner, un réseau a besoin de deux éléments indispensables : des fréquences et des antennes pour émettre le signal. Commençons par les fréquences de la 5G, ce sont elles qui nous permettent d'avoir des communications. Pour le nouveau réseau mobile, trois bandes de fréquences ont été retenues, avec des propriétés différentes :

- La bande des 3,5 GHz. C'est elle qui va supporter le réseau mobile 5G dès sa commercialisation, cet été. Elle représente un bon compromis car elle permet d'avoir des débits élevés tout en assurant une bonne couverture du territoire.
- La bande des 700 MHz. Ce sont des fréquences basses, avec une très bonne portée mais des débits moyens. Actuellement attribuée à la 4G, elle sera dévolue à la 5G dans un second temps.
- La bande des 26 GHz. Ce sont des fréquences hautes, avec une faible portée mais des débits

très élevés. On parle d'ondes millimétriques. La bande des 26 GHz sera également attribuée à la 5G dans un second temps.

Les communications qui passent par les fréquences sont relayées par des antennes. C'est pourquoi les opérateurs vont devoir déployer leur propre réseau mobile 5G. Dans un premier temps, ils vont s'appuyer sur des supports déjà existants, des pylônes équipés en 4G par exemple, pour y installer des antennes 5G. Il s'agit d'antennes spécifiques, appelées Massive MIMO. Équipées de très nombreux connecteurs, elles peuvent toucher un plus grand nombre d'utilisateurs. En outre, plutôt que d'arroser en ondes toute une zone, elles émettent un signal ciblé à chaque utilisateur, grâce au beamforming, et adapté à ses besoins, grâce au network slicing. Mais, ce n'est pas tout. On vient de le dire, à termes, la 5G va s'appuyer sur les ondes millimétriques. Comme elles ont une faible portée, cela nécessite l'installation de Small cells, des antennes miniatures en complément des antennes macro.

1.3.3.1 Ondes Millimétriques

Le nom mm wave désigne toutes les composantes présentes dans le spectre de fréquence entre 24 et 100 GHz, qui n'ont encore jamais pris pour le déploiement des réseaux mobiles pour des raisons de maturité technologique et de qualité de propagation. La croissance constante des débits et des volumes de données échangées exige l'utilisation de bandes de fréquences plus larges, qui nécessitent le développement de technologies avancées telles que la miniaturisation, la réduction des coûts et la compatibilité de la consommation énergétique pour permettre une utilisation efficace et économique. Selon l'utilisation de ces bandes de fréquences pourrait offrir des réserves de spectre importantes

1.3.3.2 Massive MIMO

Les systèmes MIMO font partie intégrante des systèmes sans fil actuels, offrant une efficacité spectrale et énergétique élevée pour répondre à la demande croissante en débit pour un grand nombre d'utilisateurs. Bien que les nouvelles technologies MIMO telles que le MIMO mono-utilisateur (SU-MIMO) et le MIMO multi-utilisateur (MU-MIMO) aient été développées pour répondre à cette demande, elles ne suffisent plus à satisfaire les besoins toujours croissants. Les utilisateurs sans fil ont produit des milliards de données au cours des dernières années, nécessitant une efficacité et une fiabilité accrues dans le traitement de ces données.

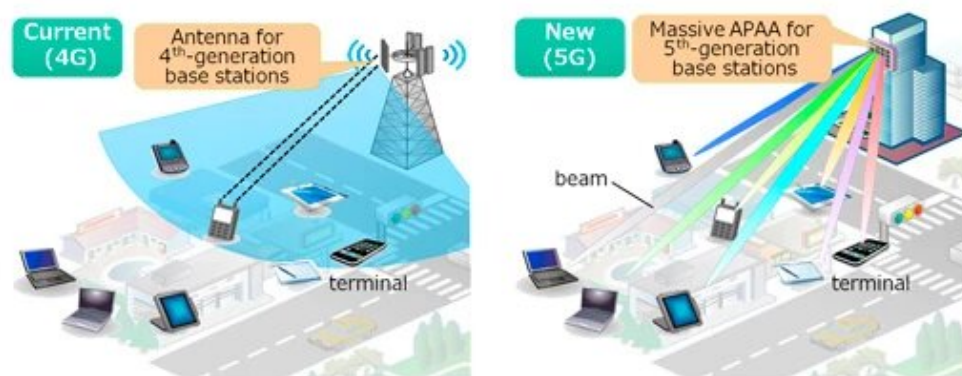


FIGURE 1.5 – Illustration basées sur le Massive MIMO [18]

La technologie Massive MIMO (Figure 1.3) est considérée comme la plus captivante pour la 5G

et au-delà de l'ère de l'accès sans fil. Cette technologie représente une avancée des systèmes MIMO actuels en regroupant des centaines, voire des milliers d'antennes à la station de base pour desservir simultanément de nombreux utilisateurs. L'utilisation d'un grand nombre d'antennes supplémentaires dans le système Massive MIMO permet de concentrer l'énergie dans une région de l'espace plus petite, offrant ainsi une meilleure efficacité spectrale et un débit plus élevé .

1.3.3.3 Beamforming

Dans la figure (Figure 1.4), le beamforming permet à la station de base de trouver une voie adéquate pour livrer des données à l'utilisateur, tout en réduisant les interférences avec les utilisateurs voisins le long de la route. Le beamforming offre de nombreux bénéfices pour les réseaux 5G et plus loin. En fonction de la situation, la technologie de beamforming peut être utilisée de différentes manières dans les réseaux à venir.

Le beamforming permet d'améliorer l'efficacité spectrale des systèmes massifs MIMO, tandis que pour les mm wave, il permet d'augmenter le débit de données..

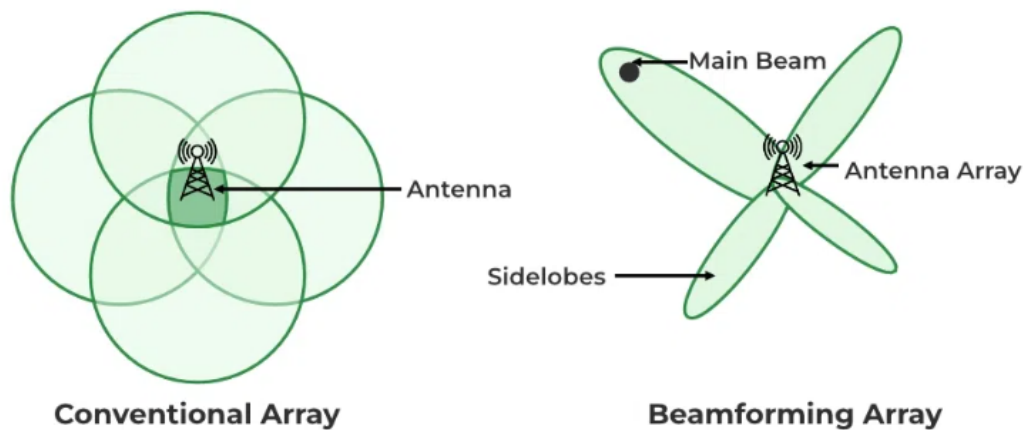


FIGURE 1.6 – Illustration sur le Beamforming [18]

1.3.3.4 Small Cells (Petites cellules)

Les petites cellules sont une technologie prometteuse pour les réseaux 4G et 5G, car elles reposent sur l'installation d'un grand nombre de stations de base couvrant de petites zones géographiques et des espaces intérieurs tels que les gares ou les centres commerciaux. Les petites cellules permettent d'améliorer la couverture et les capacités des réseaux pour faire face à l'augmentation du trafic de données mobiles, grâce à la multiplication des antennes qui permet de diminuer le nombre d'utilisateurs connectés à chaque antenne, offrant ainsi de meilleurs débits et une meilleure qualité de service. En outre, ces réseaux peuvent être configurés dynamiquement en fonction du nombre d'utilisateurs, par exemple en désactivant des cellules sous-utilisées à certains moments de la journée, ce qui permettrait de réaliser des économies d'énergie [19]. En somme, les petites cellules sont une solution de densification du réseau pour compléter l'infrastructure mobile actuelle, qui repose principalement sur des stations plus grandes appelées macro cellules.

1.3.4 Catégories d'usage 5G

Trois domaines d'utilisation pour la 5G sont prévus par l'Union internationale des télécommunications (UIT) : le haut débit mobile amélioré (eMBB), la communication ultra-fiable avec un temps de latence faible (URLLC) et la communication de masse de type machine (mMTC). Les trois cas d'utilisation de la 5G dans les différents domaines d'applications sont résumés dans la figure.

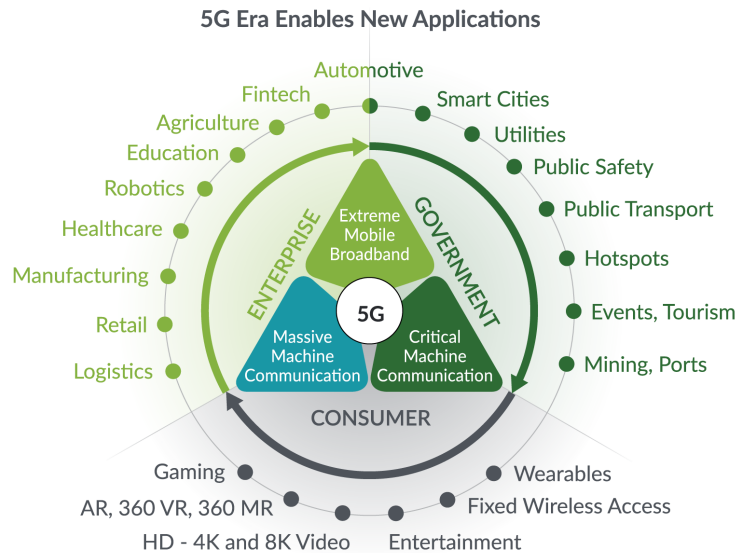


FIGURE 1.7 – Catégories d'usages de la 5G [20]

1.3.4.1 Haut débit mobile amélioré (eMBB) :

Il s'agit d'un peu plus de ce que nous avons aujourd'hui, mais avec des performances améliorées. Ce que nous avons aujourd'hui, mais avec des performances améliorées et une expérience utilisateur de plus en plus transparente. Ce scénario d'utilisation couvre une série de cas, y compris la couverture et les points d'accès. Dans le cas de la couverture étendue, une et une grande mobilité sont souhaitées, avec des débits de données utilisateurs nettement améliorés par rapport à ce qui est offert aujourd'hui. Pour les hotspots, la prise en charge d'une forte densité d'utilisateurs et d'une très capacité de trafic très élevée, mais la mobilité n'est requise qu'à la vitesse des piétons. Ne concerne que les vitesses des piétons. Il convient de noter que le débit de données requis pour l'utilisateur est beaucoup plus élevé que celui de la téléphonie mobile. Est beaucoup plus élevé que celui de la couverture d'une zone étendue [21].

1.3.4.2 Communications ultra-fiables et à faible latence (URLLC) :

Les communications ultra-fiables et à faible latence (URLLC) représentent une technologie clé pour la prochaine génération d'applications critiques. Il s'agit essentiellement d'un niveau de service au sein des réseaux 5G conçu pour les situations où la transmission de données quasi-instantanée et une fiabilité ultra-élevée sont cruciales. Voici un aperçu de ce que propose l'URLLC :

- Ultra-fiable : L'URLLC vise une fiabilité extrêmement élevée, dépassant parfois les 99,999
- Faible latence : La latence fait référence au temps qu'il faut aux données pour voyager entre deux points. L'URLLC cible une latence ultra-faible, d'environ 1 milliseconde ou moins.

Ces caractéristiques rendent l'URLLC parfait pour les applications où même un léger retard ou un problème de données peut avoir des conséquences graves. Par exemple :

- Véhicules autonomes : Les voitures autonomes reposent sur une communication constante et fiable pour des tâches telles que la prévention des collisions et la coordination des feux de signalisation.
- Chirurgie à distance : La chirurgie avec un bras robotique nécessite un contrôle et un retour d'information en quasi-temps, ce que l'URLLC peut fournir.
- Automatisation industrielle : Les machines d'usine doivent souvent communiquer très rapidement et précisément pour fonctionner efficacement.

Dans l'ensemble, l'URLLC est un élément essentiel du puzzle pour garantir le fonctionnement fluide et sûr de nombreuses technologies futures.

1.3.4.3 Communications massives de type machine (mMTC) :

Le concept de massive MTC est une famille d'applications pour lesquelles les modèles de trafic ne sont même pas complètement caractérisés. Cependant, nous savons qu'un déploiement mMTC pourrait consister en un très grand nombre d'appareils avec un volume relativement faible (ou relativement élevé) de données sensibles sans retard. Les appareils doivent être à faible coût et avoir une très longue durée de vie de la batterie. Voici quelques points clés sur le mMTC :

- Nombre élevé d'appareils : Contrairement à l'URLLC qui se concentre sur des applications critiques avec peu d'appareils, le mMTC gère un volume important d'appareils, pouvant aller de millions à milliards.
- Petits paquets de données : Les appareils utilisant le mMTC échangent des informations en envoyant de petits messages fréquents, optimisant l'efficacité énergétique.
- Applications diverses : Le mMTC trouve son application dans de nombreux domaines, notamment la domotique (gestion intelligente des maisons), la surveillance des infrastructures, les compteurs intelligents et la gestion des chaînes logistiques

1.3.4.4 Indicateurs clés de performance (KPI)

KPI	Cas d'utilisation clé	Valeurs
Débit de données de pointe	eMBB	DL : 20 Gbit/s, UL : 10 Gbit/s
Efficacité spectrale maximale	eMBB	DL : 30 bps/Hz, UL : 15 bps/Hz
Débit de données expérimenté par l'utilisateur	eMBB	DL : 100 Mbps, UL : 50 Mbps (urbain dense)
5 % d'efficacité spectrale utilisateur	eMBB	DL : 0,3 bps/Hz, UL : 0,21 bps/Hz (point d'accès intérieur); DL : 0,225 bps/Hz, UL : 0,15 bps/Hz (urbain dense); DL : 0,12 bps/Hz, UL : 0,045 bps/Hz (rural)
Efficacité spectrale moyenne	eMBB	DL : 9 bps/Hz/TRxP, UL : 6,75 bps/Hz/TRxP (intérieur Point chaud); DL : 7,8 bps/Hz/TRxP, UL : 5,4 bps/Hz/TRxP (Dense Urbain); DL : 3,3 bps/Hz/TRxP, UL : 1,6 bps/Hz/TRxP (rural)
Capacité de trafic dans la zone	eMBB	DL : 10 Mbps/m ² (hotspot intérieur)
Latence du plan utilisateur	eMBB, URLLC	4 ms pour eMBB et 1 ms pour URLLC
Latence du plan de contrôle	eMBB, URLLC	20 ms pour eMBB et URLLC
Densité de connexion	mMTC	1 000 000 d'appareils/km ²
Efficacité énergétique	eMBB	Capacité à supporter un taux de sommeil élevé et un sommeil long durée
Fiabilité	URLLC	1 - 10 ⁻⁵ probabilité de réussite de la transmission d'une couche 2 unité de données de protocole de 32 octets en 1 ms dans le canal qualité du bord de couverture
eMBB de mobilité		Jusqu'à 500 km/h
Temps d'interruption de mobilité	eMBB, URLLC	0 ms
Bande passante	eMBB	Au moins 100 MHz; Jusqu'à 1 GHz pour un fonctionnement à des températures supérieures bandes de fréquences (par exemple, au-dessus de 6 GHz)

TABLE 1.2 – Exigences minimales de performance technique de l'IMT 2020 [21]

1.3.5 Quelques domaines d'application de la 5G

La 5G se distingue des réseaux mobiles actuels en raison de sa diversification d'applications, contrairement à leur focalisation principale sur la téléphonie. Plusieurs secteurs bénéficieront ainsi de ses avancées :



FIGURE 1.8 – Domaines d'application 5G [20]

1. Internet des objets (IoT) :

- Villes intelligentes : Gestion intelligente de l'énergie, surveillance de la qualité de l'air, gestion des déchets, éclairage public intelligent.
- Maisons intelligentes : Appareils domestiques connectés, systèmes de sécurité intelligents, gestion de l'énergie à domicile [2].

2. Santé :

- Télémédecine : Consultations à distance avec des médecins, diagnostics en temps réel, suivi des patients à distance.
- Chirurgie assistée par robot : Chirurgie réalisée à distance avec une latence minimale, permettant des interventions précises et rapides.
- Wearables : Dispositifs portables surveillant en temps réel les paramètres de santé des patients.

3. Transports :

- Véhicules autonomes : Communication véhicule à véhicule (V2V) et véhicule à infrastructure (V2I) pour une conduite autonome plus sûre.
- Gestion du trafic : Surveillance et gestion en temps réel du trafic pour réduire les embouteillages et améliorer la sécurité routière.

4. Industrie 4.0 :

- Automatisation des usines : Communication en temps réel entre machines, maintenance prédictive, optimisation des chaînes de production.
- Robots industriels : Coordination précise des robots pour des opérations complexes et sûres [22].

5. Divertissement et médias :

- Streaming vidéo de haute qualité : Vidéo 4K/8K en streaming sans interruption, réalité virtuelle (VR) et réalité augmentée (AR) en temps réel.
- Jeux en ligne : Jeux en cloud gaming avec une latence très faible pour une expérience fluide [2].

6. **Éducation :**

- Apprentissage à distance : Cours en ligne interactifs, classes virtuelles avec AR/VR pour une expérience immersive.
- Simulations et formations : Simulations en temps réel pour des formations pratiques et immersives dans divers domaines (par exemple, médecine, ingénierie).

7. **Sécurité et défense :**

- Surveillance et réponse en temps réel : Surveillance vidéo en haute résolution, drones pour la surveillance et la reconnaissance.
- Communication sécurisée : Réseaux de communication robustes et sécurisés pour les opérations militaires et de sécurité.

Ces applications montrent comment la 5G peut transformer divers secteurs en offrant une connectivité rapide, fiable et à faible latence, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles innovations et améliorations de la productivité et de la qualité de vie.

1.4 Sécurité pour les communication 5G

De nos jours, la tendance vers un environnement informatique omniprésent, a conduit à des réseaux mobiles caractérisés par une demande sans cesse croissante de importante qui a émergé pour résoudre ces problèmes est la 5G mobile et de nombreux efforts ont été déployés pour la développer au cours des dernières années, avec l'objectif de la déployer d'ici 2020 et au-delà. Les communications 5G visent à fournir une bande passante Big Data, une capacité de mise en réseau infinie et une couverture étendue du signal afin de prendre en charge une riche gamme de services personnalisés de haute qualité pour les utilisateurs finaux. Pour atteindre cet objectif, les communications 5G intégreront plusieurs technologies avancées existantes avec de nouvelles techniques innovantes. Cependant, cette intégration entraînera d'énormes défis en matière de sécurité dans les futurs réseaux mobiles 5G [23]. En particulier, on s'attend à ce qu'un large éventail de problèmes de sécurité soient soulevés dans les réseaux mobiles 5G en raison d'un certain nombre de facteurs, notamment :

- l'architecture ouverte basée sur IP du système 5G,
- la diversité des accès sous-jacents. technologies de réseau du système 5G,
- la pléthore d'appareils communicants interconnectés, qui seront également très mobiles et dynamiques,
- l'hétérogénéité des types d'appareils en termes de capacités de calcul, d'alimentation de la batterie et de stockage mémoire,
- le fait que les appareils interconnectés seront généralement exploités par des utilisateurs non professionnels

Par conséquent, les systèmes de communication 5G devront faire face à des menaces plus nombreuses et bien plus fortes que les systèmes de communication mobiles existants.

Cependant, même si les futurs systèmes de communication 5G seront la cible de nombreuses menaces de sécurité connues et inconnues, il n'est pas clair quelles menaces seront les plus graves et quels éléments du réseau seront les plus touchés. être ciblés le plus fréquemment. Étant donné que

ces connaissances sont de la plus haute importance pour fournir des conseils permettant d'assurer la sécurité de la prochaine génération de téléphones mobiles systèmes de communication, l'objectif de ce chapitre est de présenter les problèmes et défis de sécurité potentiels pour les prochains systèmes de communication 5G.

1.5 défis soulevés par la 5G

Les défis soulevés par la 5G incluent :

- **Capacité de fourniture de bande passante** : La 5G doit fournir la bande passante nécessaire aux utilisateurs disposant d'appareils capables de produire des débits de données élevés
- **Amélioration des paramètres de performances du réseau** : les spécifications IMT-2020 permettent d'améliorer jusqu'à huit paramètres de performances du réseau, tels que le débit maximal, le débit constant, la latence, la densité des objets connectés et la vitesse de déploiement.
- **Défis technologiques** : La 5G implique de nombreux défis technologiques, notamment ceux liés aux protocoles radio, aux outils de gestion des réseaux et à l'utilisation du spectre électromagnétique au-dessus de 3 GHz, notamment dans les bandes inférieures à 6 GHz et les ondes millimétriques.
- **Intégration avec d'autres technologies** : La 5G fait partie des technologies habilitantes de la prochaine décennie, aux côtés de l'intelligence artificielle, des capteurs, des processeurs et du stockage. Il est important de comprendre comment ces technologies vont interagir et être intégrées dans divers systèmes.
- **Préoccupations environnementales** : les impacts environnementaux de la 5G sont complexes et incluent la nécessité d'anticiper et de préparer les capacités techniques pour répondre à ses exigences.
- **Défis de sécurité** : la 5G présente des défis de sécurité importants qui nécessitent une collaboration mondiale entre les gouvernements, les entreprises et les parties prenantes.
- **Impact sur les zones rurales** : la 5G offre des opportunités pour le développement rural, mais elle présente également des défis uniques qui doivent être relevés

1.5.1 défis soulevés par la 5G par rapport à la QoS

La qualité de service (QoS) est un aspect crucial des réseaux de télécommunications, et la 5G introduit plusieurs défis spécifiques à ce domaine :

1. **Gestion de la Latence Ultra-faible** La 5G promet des latences de l'ordre de quelques millisecondes, indispensables pour les applications critiques comme les véhicules autonomes, la télémédecine et les jeux en ligne. Assurer une latence ultra-faible de manière constante représente un défi majeur, particulièrement dans des environnements hétérogènes et des zones à forte densité de dispositifs connectés [24].

2. **Fiabilité et Disponibilité** Pour les applications critiques nécessitant une fiabilité élevée (comme les opérations chirurgicales à distance et les infrastructures critiques), la 5G doit garantir une disponibilité et une stabilité exceptionnelles. Les interruptions de service, même brèves, peuvent avoir des conséquences graves, et maintenir un tel niveau de QoS demande des infrastructures robustes et des protocoles de redondance avancés.

3. **Gestion du Spectre et de la Bande Passante** La 5G utilise un large éventail de fréquences, y

compris des bandes de spectre élevées comme les ondes millimétriques, qui offrent une capacité immense mais sont sujettes à des limitations en termes de portée et de pénétration à travers les obstacles. Assurer une QoS élevée nécessite une gestion dynamique du spectre et des mécanismes efficaces d'allocation de la bande passante pour éviter la congestion et maximiser l'efficacité.

4. **Slicing de Réseau** La 5G introduit le concept de slicing de réseau, qui permet de créer des réseaux virtuels dédiés à des services spécifiques avec des exigences QoS distinctes. La gestion efficace de ces slices est complexe, car elle implique de garantir des performances différenciées en fonction des besoins variables tout en partageant les mêmes ressources physiques.

5. **Mobilité et Handover** La gestion de la QoS pour des utilisateurs en mouvement (par exemple, dans des véhicules ou des trains à grande vitesse) est un autre défi. Les procédures de handover entre les cellules 5G doivent être parfaitement synchronisées pour éviter les interruptions de service et les dégradations de performance.

6. **Interférence et Cohabitation** Dans des environnements denses, la coexistence de nombreux dispositifs connectés peut mener à des interférences qui affectent la QoS. Les mécanismes de réduction de l'interférence et de gestion des ressources sont essentiels pour maintenir les niveaux de QoS attendus.

7. **Routage et Priorisation des Paquets** Garantir la QoS nécessite des algorithmes de routage efficaces et des mécanismes de priorisation des paquets pour donner la priorité aux trafics critiques (comme les appels d'urgence) et garantir des performances constantes pour les applications sensibles à la latence.

8. **Problèmes de Sécurité** Les cyberattaques et les failles de sécurité peuvent directement impacter la QoS en dégradant les performances du réseau. La 5G, avec son architecture complexe et ses nombreux points d'accès, doit intégrer des mesures de sécurité robustes pour protéger contre les interruptions de service et garantir une expérience utilisateur cohérente.

La 5G présente des opportunités immenses pour améliorer la QoS dans divers domaines, mais relève également des défis importants. La gestion efficace de la latence, la fiabilité, la bande passante, le slicing de réseau, et la sécurité sont des composantes essentielles pour remplir les promesses de cette technologie. Les opérateurs doivent adopter des stratégies avancées et intégrées pour répondre à ces défis et fournir une expérience utilisateur optimale [25].

1.6 Conclusion

Analyser toutes les technologies disponibles et utilisées dans le monde Aux fins des communications téléphoniques, nous concluons que La technologie 5G se développe selon un modèle très différent des technologies existantes Je l'ai déjà fait dans les télécommunications. En fait, cette notion Les « services de télécommunications » ont été considérablement modifiés grâce à Internet Il s'avère que les réseaux « virtuels » reposent sur l'infrastructure d'opérateurs individuels. Cependant, le plein potentiel de la 5G ne peut être exploité que si et seulement si : Les comportements des opérateurs dominants visant à entraver la concurrence peuvent Réglementé par les lois et règlements. Le passé peut éclairer l'avenir, l'émergence de la 5G se montre Une « guerre des télécommunications » est presque inévitable. Autrement dit, le principal Les opérateurs du secteur des télécommunications chercheront à empêcher d'autres contrôle du réseau à accès direct

Chapitre 2

Etudes détaillées de la 5G

2.1 Introduction

La cinquième génération de réseaux mobiles, connue sous le nom de 5G, représente une avancée technologique significative visant à transformer les communications sans fil. La 5G promet des améliorations substantielles en termes de vitesse de connexion, de latence réduite, de capacité réseau accrue et de fiabilité. Ce chapitre se concentre sur une analyse approfondie des différents aspects techniques et architecturaux de la 5G, en soulignant ses objectifs, ses modes de déploiement, et les innovations qui la différencient des générations précédentes.

Les objectifs principaux de la 5G incluent l'amélioration des débits de données pour offrir une expérience utilisateur optimale, la réduction de la latence pour permettre des applications critiques en temps réel, et l'augmentation de la capacité pour gérer le nombre croissant d'appareils connectés. La 5G introduit également des innovations telles que les ondes millimétriques, le Massive MIMO, et le Beamforming, qui jouent un rôle crucial dans la réalisation de ces objectifs.

Dans ce chapitre, nous explorerons en détail l'architecture du réseau 5G, y compris les composants clés tels que le réseau d'accès radio (RAN) et le réseau central (5GC). Nous examinerons également les différentes bandes de fréquences et numérogies utilisées, ainsi que les défis liés à leur déploiement. Cette analyse permettra de comprendre comment la 5G révolutionne les communications mobiles et ouvre la voie à de nouvelles applications et services.

2.2 Architecture d'un réseau 5G

Un réseau 5G est composé d'un réseau d'accès 5G (AN) et d'un réseau coeur 5G. Le réseau d'accès lui-même est constitué de la nouvelle génération de réseau d'accès radio (NG-RAN), qui utilise la nouvelle interface radio 5G(NR), et/ou un non 3GPP AN connecté au réseau coeur 5G. Les différentes entités de réseau sont connectées par un réseau de transport TCP/IP sousjacent, qui prend en charge les fichiers QOS [26].

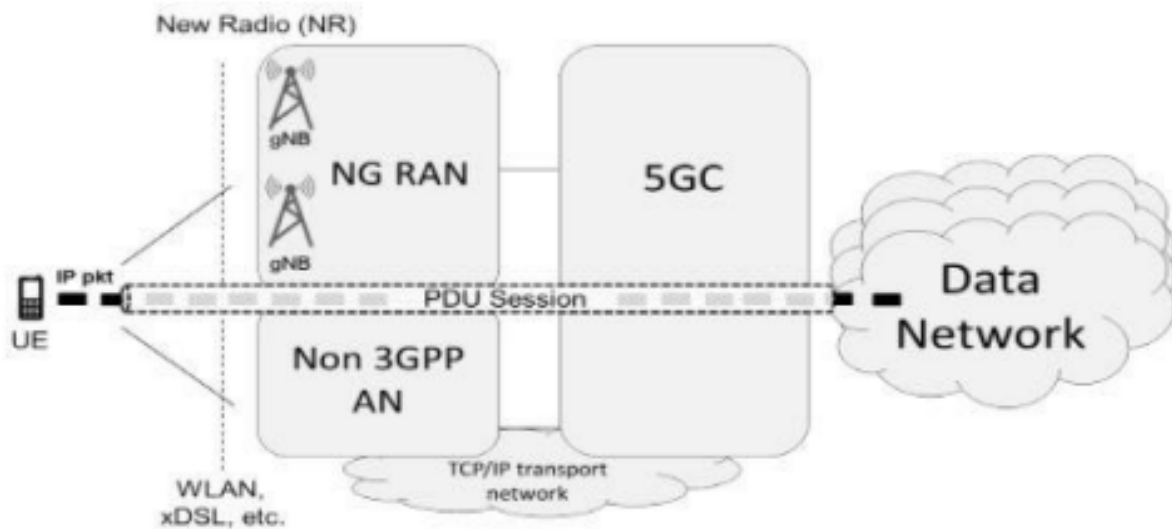


FIGURE 2.1 – Aperçu du 5G systeme [26]

Comme les générations précédentes, un réseau 5G connecte l'équipement utilisateur (UE) à des réseaux de données. Le service de connectivité 5G est nommé Session PDU. Depuis un transport point de vue, une session PDU se fait par une séquence de tunnels NG en 5GC, et d'un ou plusieurs supports radio sur l'interface radio. Cet ensemble de "tuyaux" finalement connecte l'UE à ses fonctions de contrôle et au réseau de données externe pour l'utilisateur échange de trafic. Une tâche majeure du réseau mobile est d'établir et de libérer les tunnels et les porteurs de manière dynamique, afin de suivre les mouvements et les états des utilisateurs (inactif, connecté, etc.) [27].

Une session PDU est très similaire à un porteurs EPS à LTE, sauf pour le modèle QOS et les unités de données des utilisateurs supportées. En effet, une session PDU peut transporter non seulement les paquets IP de l'utilisateur mais aussi l'ETHERNET où les cadres non survenus, permettant ainsi une communication de la couche-2 entre les groupes d'UE. Le modèle 5G est basée sur le nouveau concept de flux de QOS, où un flux est la plus grande granularité de la différenciation QOS [27].

Les différents flux de QOS peuvent appartenir à une seule session PDU.

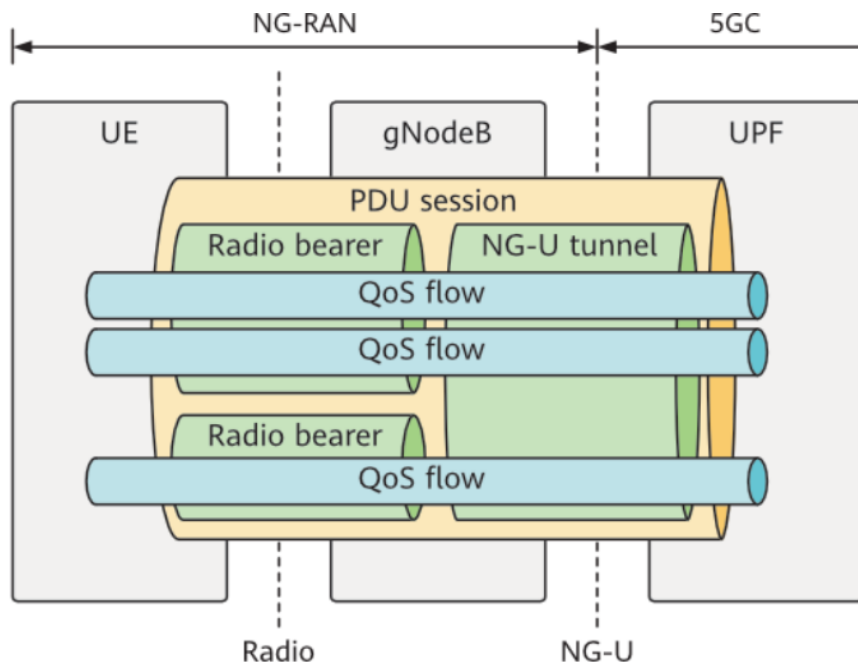


FIGURE 2.2 – session PDU et flux QOS : plan utilisateur (UP) [28]

La Figure 2.3 montre les divisions entre les fonctions 5G exécutées dans le NG-RAN et le 5G cœur, en bordure, le NG-RAN est le responsable de l'établissement, la maintenance et la libération des parties des sessions PDU qui traversent l'interface radio. Il face le problème de l'insuffisance physique (ex : interférences, réduction énergétique etc.), les handover intergNB, et le multiplexage de la session (planification). les fonctions de 5GC gèrent les parties restantes des parties PDU ainsi que tous les autres processus non liés à l'accès radio (gestion de la mobilité, sécurité adresses IP, allocation etc.) [27].

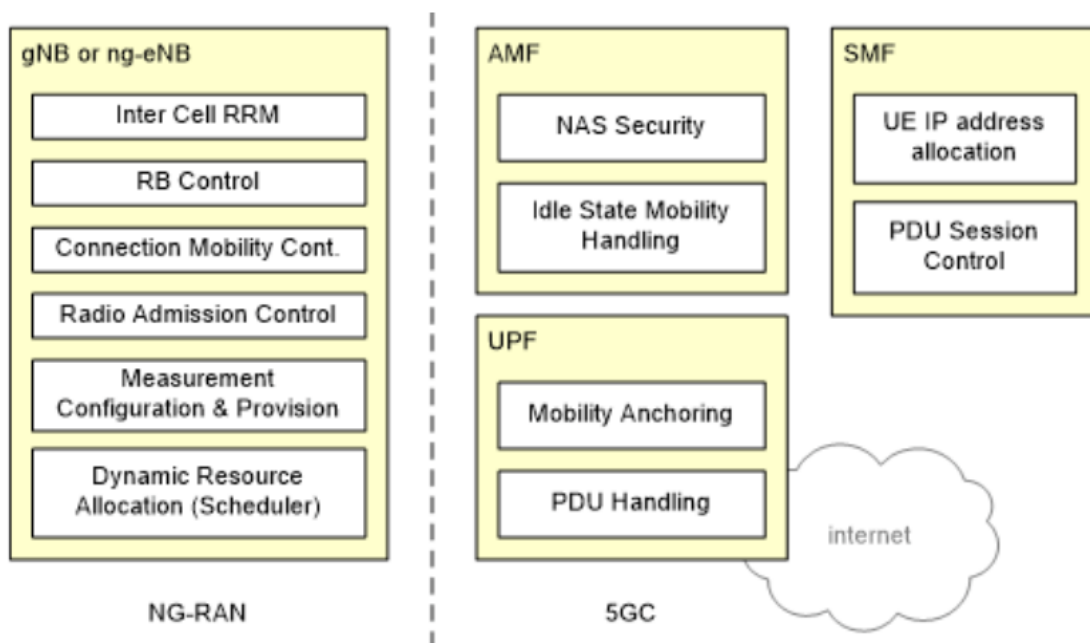


FIGURE 2.3 – la séparation fonctionnel entre NG-RAN et 5GC [28]

2.2.1 Équipement utilisateur

L'équipement utilisateur (UE) est le terme désignant les appareils mobiles compatibles Utiliser la technologie 5G : smartphones, tablettes, ordinateurs portables, etc. L'UE est connecté au réseau d'accès sans fil via la carte SIM. La carte est insérée dans l'appareil pour identifier et authentifier les utilisateurs du réseau mobile. une fois Une fois la connexion établie, l'UE peut utiliser les services fournis par le réseau central, notamment Serveurs et équipements réseau. Ces terminaux gèrent les appels, les messages et les données mobiles.

2.2.2 cœur de réseau (5GC)

La décomposition des fonctions exécutées par les noeuds de réseau des générations précédentes a conduit à une architecture 5G complètement définis en termes de fonctions de réseau exposée sous forme de services. Comme se produit dans le NG-RAN, il y a une séparation entre les plans contrôle et utilisateur. Dans le plan utilisateur il e trouve une ou plusieurs fonctions UP (UPFs), qui effectuent principalement le transfert de paquets entre les différents tunnels de NG-U qui forment la session PDU. Toutes les autres fonctions du réseau appartiennent au plan contrôle. Un autre changement radical par rapport aux générations précédentes est la modélisation d'interface, qui a été passée de " l'orientation-bit point à point " (bit-oriented point-to-point) vers " l'orientation-web basé-service " (web-oriented service-based). En effet, 5GC a une architecture basée sur le service applicable par tout, les procédures sont définies comme des services de sorte qu'il est possible de les réutiliser [29].

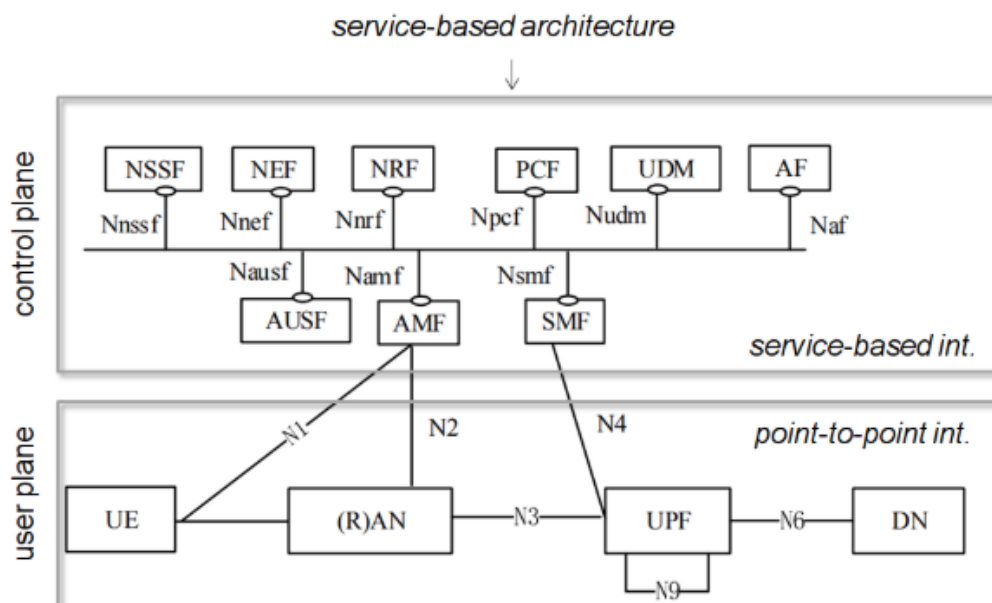


FIGURE 2.4 – architecture du système 5GC [30]

Le 5GC est composé de plusieurs fonctions réseau clés, chacune remplissant des rôles spécifiques dans la gestion et le traitement des communications :

- **AMF** : La role de cette fonction est de prendre en charge la gestion de tous les signaux entrants et sortants de l'UE vers le 5GC. Elle offre aux utilisateurs un accès au réseau et gère leur mobilité en interagissant avec l'UE ainsi que d'autres fonctions réseau telles que le SMF ou l'AUSF. De plus, l'AMF intègre une partie des fonctionnalités du MME de la 4G.

- **SMF** : est une fonction du réseau de communication 5G (5GC) permet de gérer et contrôler les sessions utilisateur. Elle est responsable de la configuration et de la gestion des tunnels NG, de l'attribution des adresses IP via DHCP, de la gestion de la qualité de service (QoS) et de la redirection du trafic en fonction des politiques de sécurité et des besoins des applications [27]. SMF est également responsable de la communication de l'AMF et l'UPF.

- **UPF** : Ce composant gère la transmission de tunnel NG-U et les services de chemin de données associés à l'ancrage pour le transfert, à la qualité de service (QoS) et à l'application des politiques de trafic. Il peut y avoir plusieurs UPF associés à un UE ; ces UPF peuvent être situés dans une seule tranche ou dans plusieurs. L'UPF contient des parties des fonctionnalités SGW et PGW de la 4G [27].

- **AUSF** : Il est un serveur d'authentification qui joue un rôle crucial dans le réseau 5G. Il permet l'enregistrement de l'équipement mobile en utilisant une double authentification effectuée à la fois par l'entité AMF et l'UE, à partir de vecteurs d'authentification fournis par l'AUSF. En d'autres termes, l'AUSF est responsable de l'authentification des utilisateurs et des équipements mobiles et garantit ainsi la sécurité du réseau 5G. Son rôle principal est de garantir que seuls les équipements mobiles autorisés peuvent accéder au réseau.

- **NSSF** : opte pour les différentes instances de tranches de réseau qui servent l'UE, ainsi que le meilleur AMF.

- **UDM** : Il peut être considéré comme un référentiel pour les informations liées à l'UE comme : les informations d'identification, les identificateurs, les détails AMF et les affectations SMF pour la session en cours. L'idée sous-jacente de l'UDM est de créer chaque fois que possible une base de données centrale pour les informations de configuration UE, de sorte que les NF puissent être conçus en tant que services sans état, améliorant l'agilité architecturale. L'UDM contient une partie de la fonctionnalité HSS de la 4G [27].

- **NRF** : Une partie cruciale du cœur de la 5G est le NRF, qui incarne un concept novateur dans le cœur de réseau de nouvelle génération, inexistant dans les générations précédentes. Sa mission principale est de découvrir les fonctions de réseau (NFs) en se basant sur le principe de requête/réponse, s'adaptant ainsi à l'architecture des services de la 5G. Le NRF joue un rôle clé dans l'établissement de la signalisation lors de la première connexion de l'utilisateur au réseau, ainsi que dans le choix de la tranche que l'utilisateur souhaite utiliser.

- **PCF** : Il assume le rôle d'une entité cohérente qui offre des directives politiques (filtrage, facturation, etc.) aux autres fonctions du plan de contrôle, en particulier le SMF.

- **NEF** : Il autorise l'accès aux capacités des réseaux et des événements de réseau/UE à des tiers pour des fonctions d'application, de l'informatique en périphérie et d'autres utilisations. Cette fonction n'est pas disponible dans la technologie 4G.

- **AF** : Cette fonction est une entité similaire à un serveur d'application permettant d'interagir avec d'autres NF du plan de contrôle. Les AF peuvent être exploitées pour différents services d'application et associés à l'opérateur de réseau ou à des tiers de confiance [27].

2.2.2.1 Caractéristiques et Avantages du 5GC

Flexibilité et Scalabilité : L'architecture SBA permet une évolutivité dynamique et une adaptation facile aux changements des besoins réseau. Les fonctions réseau peuvent être déployées de manière distribuée ou centralisée selon les besoins.

— Efficacité et Performance : La séparation du plan de contrôle et du plan utilisateur améliore la performance et réduit la latence. Les fonctions virtualisées permettent une allocation flexible

des ressources.

- Support de Diverses Applications : Le 5GC est conçu pour supporter une large gamme d'applications et de services, y compris l'IoT, les communications critiques (comme les services de santé et de sécurité publique), et les applications à haut débit (comme la réalité augmentée/virtuelle).
- Sécurité Renforcée : Le 5GC intègre des mécanismes de sécurité avancés, notamment pour l'authentification et la protection des données, assurant un haut niveau de sécurité pour les utilisateurs et les services.

2.2.3 Réseau d'accès radio NG-RAN

NG-RAN, illustré à la figure 2.8, est composé d'un ensemble de stations de base 5G appelées gNB. Ces gNB sont liés au 5GC via une série d'interfaces logiques. Parfois, les fonctionnalités d'un gNB peuvent être dispersées, entraînant une architecture modifiée. L'architecture se compose d'une unité centrale (gNB-CU) qui supervise une ou plusieurs unités distribuées (gNB-DU) via l'interface F1. Chaque unité distribuée est reliée à une tête radio distante (RRH), qui sert d'émetteur-récepteur radio physique. L'unité centrale est divisée en deux segments : un pour les fonctions du plan de contrôle (gNB-CU-CP) et un autre pour les fonctions du plan utilisateur (gNB-CU-UP) [29].

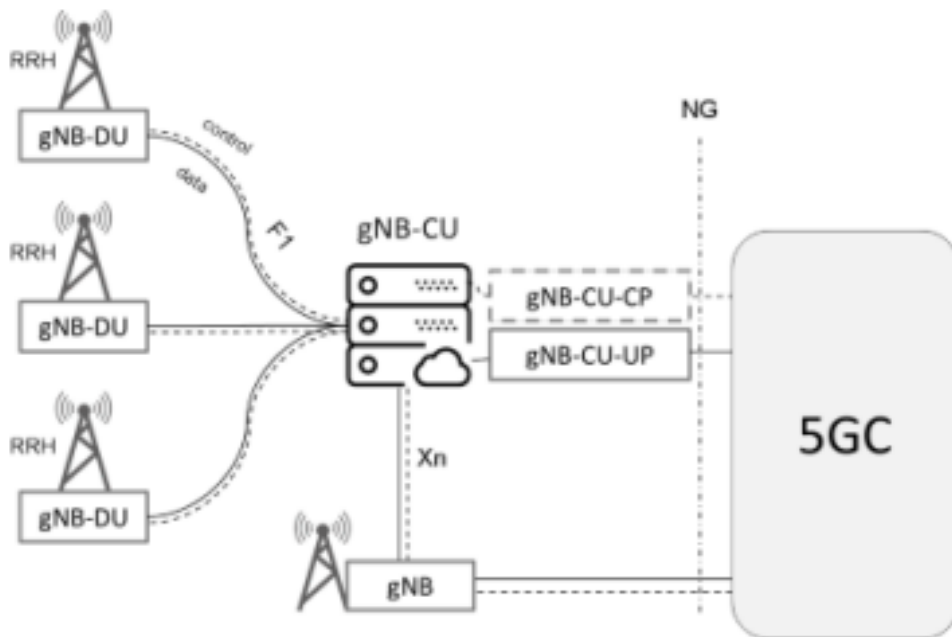


FIGURE 2.5 – Architecture globale du réseau NG-RAN [29]

2.2.4 Mobilité en 5G

La mobilité dans la cellule est définie comme un élément central de la communication cellulaire, généralement c'est l'ensemble des opérations effectuées qui permettent à une station mobile de changer de cellule sans interruption de service. Dans les systèmes 5G, le handover est considéré comme une fonction très importante, qui se réfère au transfert de la distribution de données d'un composant du réseau à un autre [31]. En 5G, le choix du handover (Xn ou N2) se produit par rapport aux propriétés de sécurité d'un gNB donné. Le gNB est constitué d'une unité centrale (CU, Central Unit) avec un ensemble d'unités distribuées (DU, Distributed Unit) [32].

La gestion de la mobilité regroupe deux composantes : la gestion de la localisation (location management) et la gestion de la relève (handover management)

2.2.4.1 Gestion de la localisation

La gestion de la localisation permet au réseau d'accès d'identifier le point d'accès courant du nœud mobile afin de lui acheminer ses données. Elle englobe les opérations d'enregistrement de la localisation (location registration), de mise à jour de localisation (location update), et de livraison de données (data delivery). L'enregistrement de la localisation permet au nœud mobile lors de sa première attache au réseau d'accès, de s'identifier en vue d'accéder aux services disponibles. Au cours de ses déplacements, le nœud mobile procède aux mises à jour périodiques de localisation afin que le réseau puisse retrouver à tout moment sa position courante. L'acheminement des données fait référence à la capacité du réseau à trouver la position courante du nœud afin de lui transmettre ses données [33].

2.2.4.2 Gestion de la relève (Handover)

Le handover est le processus qui permet à un nœud mobile de changer son point d'attachement. Un nœud mobile connecté sur un réseau peut avoir le besoin de se connecter à une autre cellule soit du même réseau, soit d'un nouveau réseau, dans le but d'améliorer sa qualité de service. En général, deux types de handover sont utilisés dans les systèmes cellulaires à savoir intra et inter cellulaire [34].

- - **Handover intracellulaire** : Le handover intracellulaire est le transfert d'utilisateurs vers un autre meilleur canal de fréquence lorsque la qualité du canal utilisé devient trop faible pour supporter la connexion actuelle du mobile, et peut se situer entre les secteurs d'une cellule lorsqu'un utilisateur se déplace d'un secteur à un autre dans la même cellule, comme illustré par la figure.

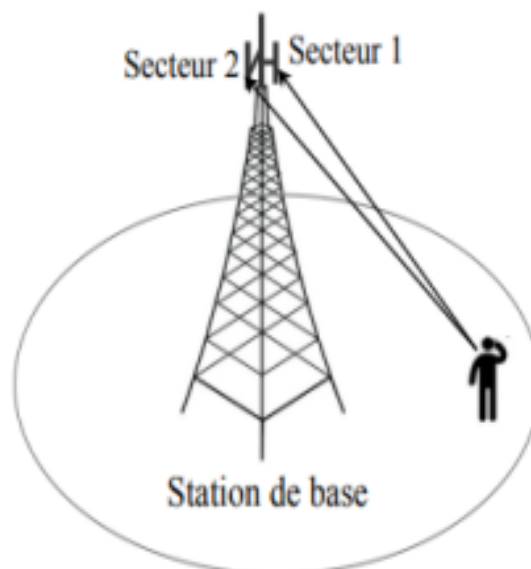


FIGURE 2.6 – Handover intracellulaire [35]

- **Handover intercellulaire** : Le transfert intercellulaire est le déplacement de l'utilisateur de la couverture radio d'une station de base (la station de base servie) à la couverture radio d'une

autre station de base, comme le montre la figure.

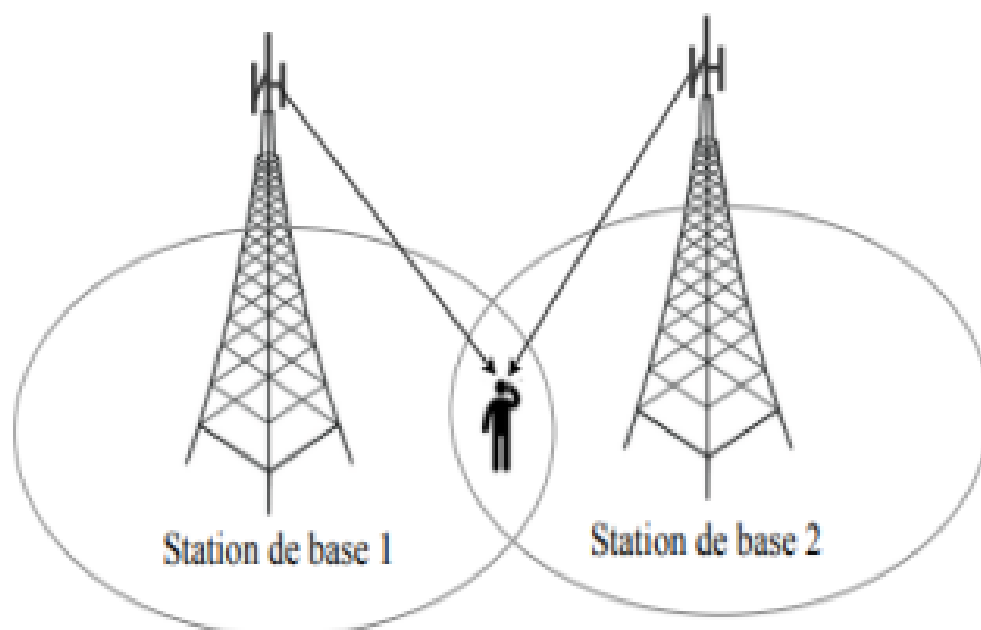


FIGURE 2.7 – Handover intercellulaire [35]

La procédure du Handover comprend trois phases [36] :

- Phase de découverte : il s’agit d’une phase de collecte d’informations sur le mobile et sur les différents réseaux d’accès, telles que la force du signal reçu (RSS : Received Signal Strength), le taux d’erreurs binaires (BER : Bit Error Rate), la distance entre le mobile et la station de base, etc. Les informations récupérées serviront plus tard dans la phase de prise de décision du handover.
- Phase de prise décision : cette phase est décomposée à son tour en deux étapes. – L’étape d’initiation du handover, qui a pour but de déterminer s’il y a nécessité d’effectuer un handover. - L’étape de sélection du réseau d’accès, qui permet de choisir le réseau qui convient le mieux parmi les réseaux d’accès disponibles.
- Phase d’exécution : il s’agit de l’établissement de la connexion avec le nouveau lien. Trois cas sont possibles selon que l’ancien lien est libéré avant (Hard Handover), pendant (Seamless Handover) où après (Soft Handover) l’établissement du nouveau lien.

2.3 Modes de déploiement du réseau 5G

Le déploiement du réseau 5G peut se faire selon plusieurs modes, chacun adapté à des besoins spécifiques et à des contextes différents. Voici quelques-uns des principaux modes de déploiement de la 5G :

- Autonome (SA) : dans ce mode, le réseau 5G fonctionne de manière autonome et ne nécessite pas la prise en charge de la 4G ou d’autres technologies antérieures. Cela permet de tirer pleinement parti des capacités de la 5G et offre des fonctionnalités avancées telles qu’une latence ultra-faible et une connectivité massive. Les déploiements autonomes se produisent généralement dans de

nouvelles installations, où la 5G est déployée dès le départ et ne repose pas sur l'infrastructure existante. L'architecture SA est présentée sur la figure :

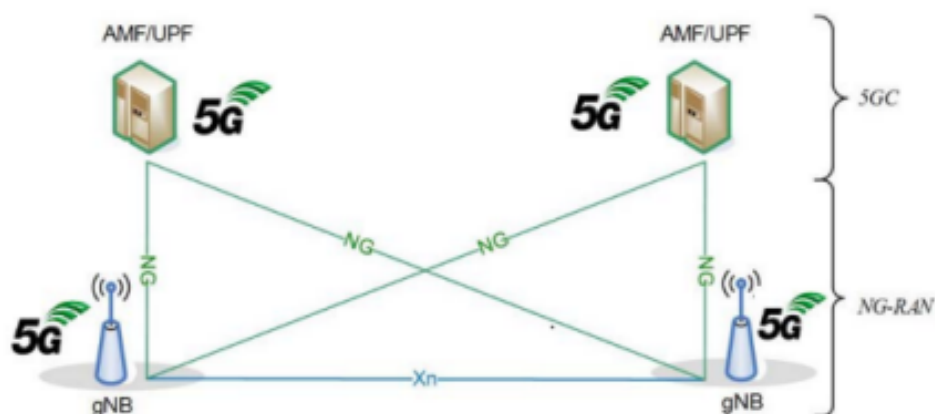


FIGURE 2.8 – Architecture SA pour système 5G [26]

- Non autonome (NSA) : Dans ce modèle, la 5G est déployée comme composant complémentaire d'un réseau existant (généralement 4G LTE). Les appareils 5G utilisent la 4G pour les fonctions de contrôle et de signalisation, tandis que la 5G est utilisée pour les données à haut débit. Le déploiement de la NSA permet une transition en douceur vers la 5G en utilisant l'infrastructure 4G existante, mais il ne tire pas pleinement parti des capacités avancées de la 5G. Dans cette catégorie, la station de base NR (gNB) est connectée à la station de base LTE (eNB) via l'interface X2. La figure (Figure 2.1) illustre l'architecture NSA :

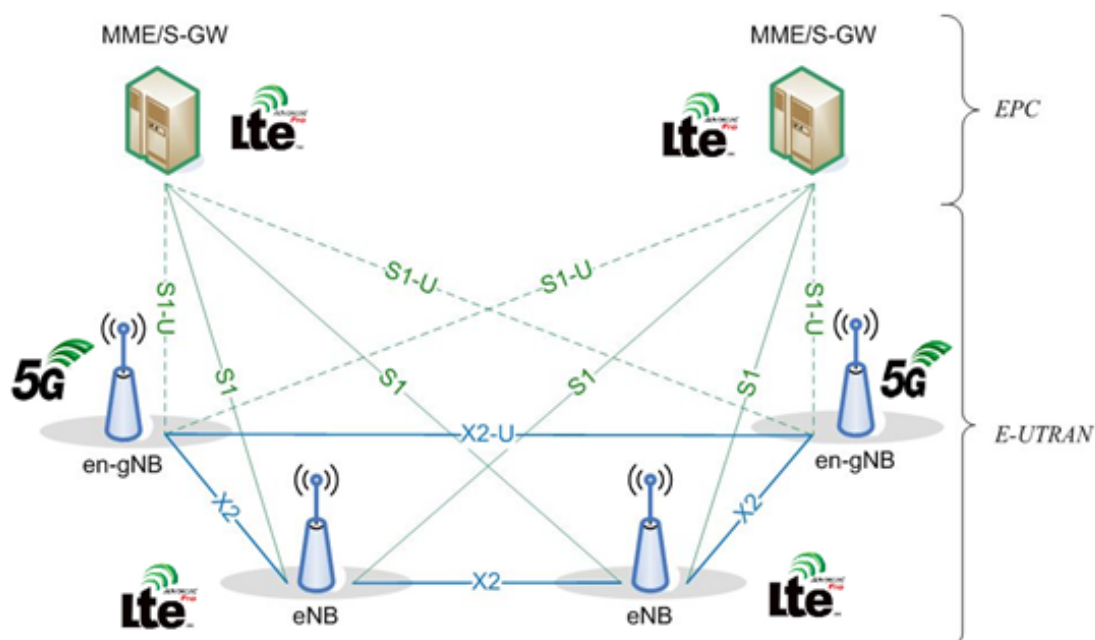


FIGURE 2.9 – Architecture NSA pour système 5G [26]

2.3.1 Options de déploiement

Il existe plusieurs options de configuration et de déploiement dans les catégories SA et NSA.

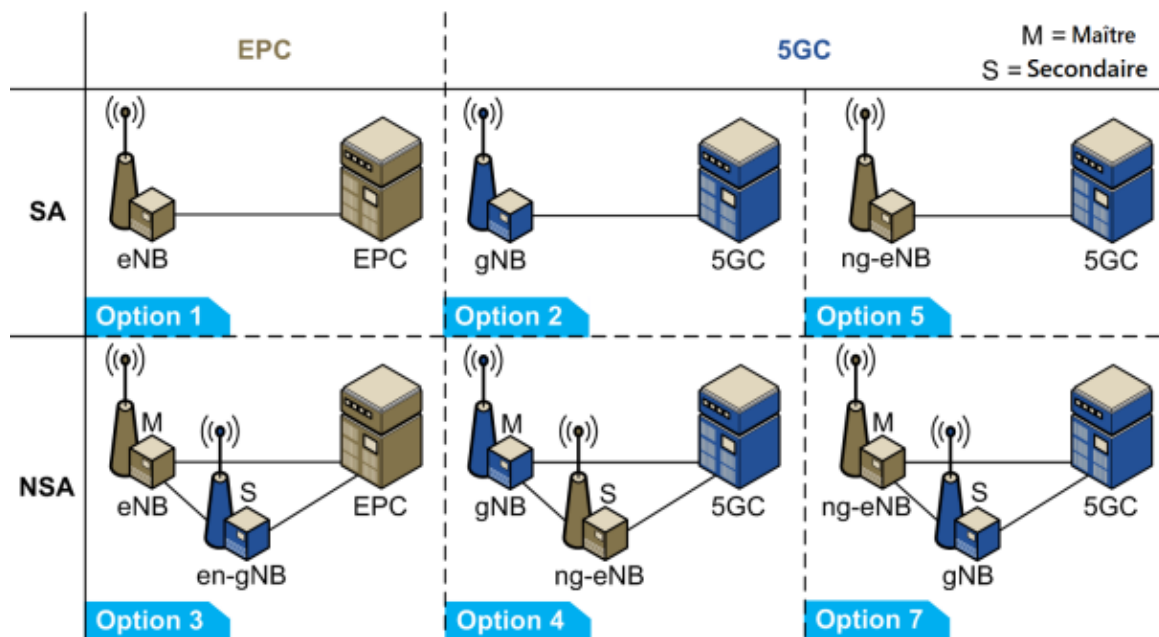


FIGURE 2.10 – Un aperçu des options de déploiement de la NSA et SA [37]

Nous étudierons ces options dans les sections suivantes :

- **Option 1** : Est une option de déploiement autonome qui présente le déploiement actuel de la 4G (LTE+EPC) . En d'autres termes, il s'agit du déploiement traditionnel de la radio LTE connectée à l'EPC et n'a aucun lien avec la 5GC ou la 5G. La plupart des opérateurs dans le monde entier exploitent actuellement leurs réseaux selon ce mode de déploiement.
- **Option 2** : Est en effet une option SA qui nécessite l'utilisation d'un gNB en tant que réseau d'accès radio (NG-RAN) et d'un 5GC comme réseau central. De plus, tous les équipements utilisateurs (UE) doivent être compatibles avec la 5G pour pouvoir bénéficier de toutes les fonctionnalités offertes par cette technologie
- **Option 3** : Cette option est divisée en trois tâches (options) : 3, 3a et 3x, comme il est indiqué dans la figure (Figure 2.4).

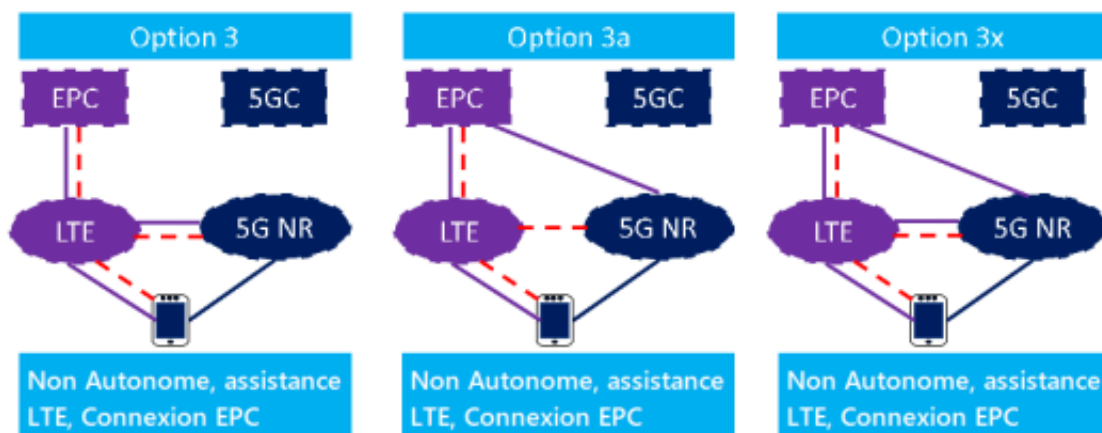


FIGURE 2.11 – Un aperçu des options de déploiement de la NSA et SA [37]

L'option 3 utilise le RAN LTE pour envoyer les données d'utilisateur au 5G, tandis que

l'option 3a envoie les données directement depuis l'EPC au 5G. L'option 3x combine les deux options en acheminant une partie des données du plan utilisateur directement de l'EPC au 5G et une autre partie via le RAN LTE.

- **Option 4** : Peut également être déployé en mode NSA où la technologie Les réseaux d'accès sans fil LTE et 5G sont déployés et contrôlés conjointement via la 5GC.

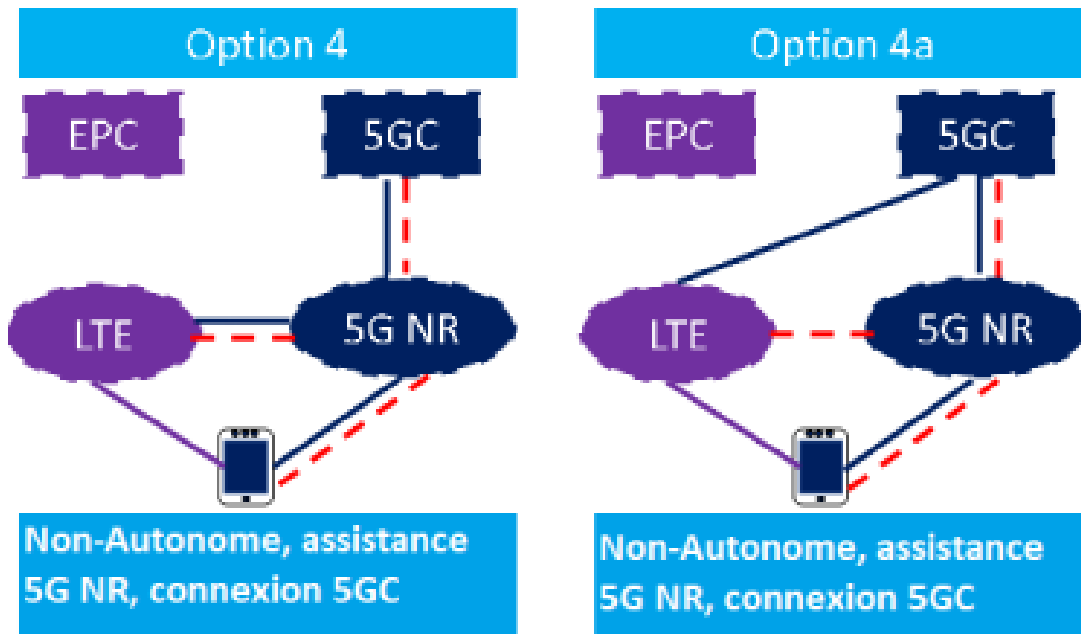


FIGURE 2.12 – Option 4 de déploiement NSA 5G [37]

Dans cette option de déploiement, le routage de la signalisation de contrôle LTE RAN Vers la 5GC avec la 5G. La seule différence entre les options 4 et 4a (Figure 2.5) est Dans l'option 4, la connexion du plan utilisateur LTE est supérieure à la 5G ; Option 4a, le trafic du plan utilisateur est envoyé directement du 5GC au LTE RAN.

- **Option 5** : Déploiement SA où nous disposons d'un réseau d'accès radio LTE distinct Connectez-vous à 5GC . Dans ce cas, LTE doit être un réseau d'accès radio LTE Evolution (eLTE), y compris la nouvelle signalisation 5GC. Cette option semble peu probable d'être adoptée par un opérateur de réseau, car la plupart des avantages de la 5G issues de la migration vers un réseau d'accès 5G.
- **Option 7** : les options 7, 7a et 7x sont des déploiements NSA 5G utilisant Noyau de nouvelle génération (5GC) qui mélange les radios LTE et 5G. Là La différence entre ces options réside dans la manière dont les données des utilisateurs sont transférées vers l'UE.

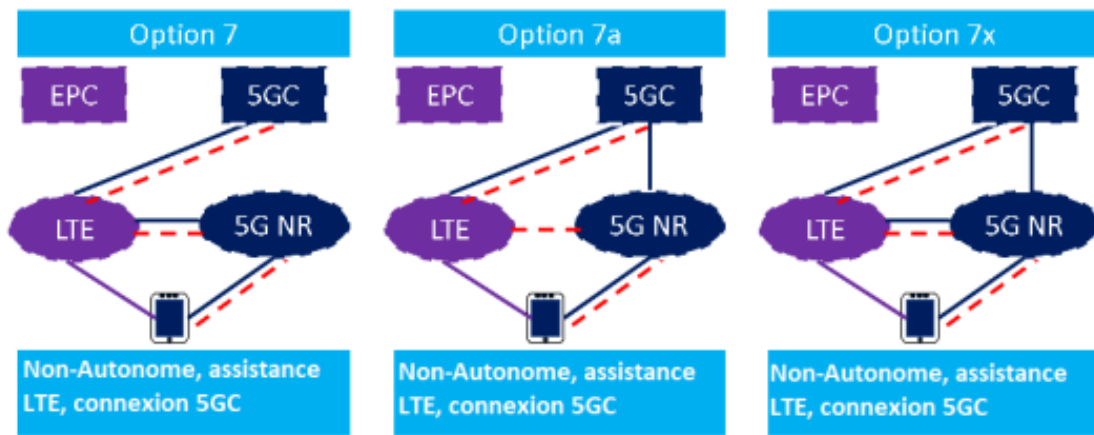


FIGURE 2.13 – Option 7 de déploiement SA 5G [26]

Remarque : L’option de déploiement 6 a été supprimée des options fournies (Figure 2.3) et n’est plus applicable. Ce n’est pas mentionné dans la spécification 3GPP Rel 15, donc les appareils 5G ne le peuvent pas. Cette option de déploiement est prise en charge.

2.4 L’interface radio New Radio (NR), Numéologies et les fréquences utilisées pour la 5G

Répondre aux exigences mentionnées nécessite des changements radicaux dans le modèle du réseau en plus d’innovations perturbatrices. Dans ce contexte, les réseaux 5G peuvent faire appel à un large éventail de nouvelles technologies. Cela permet un saut dans les performances qui éclipsent ses prédécesseurs. Ces innovations toucheront la transmission et la conception de la couche physique en plus d’introduire des bouleversements dans les couches supérieures du réseau. En fait, 5G New Radio (NR) utilisera de nombreuses technologies clés afin d’atteindre de nouveaux niveaux de performance et d’efficacité. Les combinaisons de ces dernières étendront l’importance des communications mobiles et leurs permettront de jouer un rôle central dans un monde de cas d’utilisation changeants. Parmi les innovations potentielles dans la couche physique 5G, on peut citer : [6]

- Communications dans la plage des ondes millimétriques.
- Communications massives MIMO.
- Accès multiple non orthogonal (NOMA).
- Communications sans fil full-duplex
- Agrégation de porteuse et modulations Multi carrier
- Plus grand spectre.
- Communication de liaison latérale.
- Nouvelle forme d’onde et numéologie (OFDM) hétérogène.

2.4.1 Forme d’onde 5G

Le choix de la forme d’onde radio est la décision centrale de la couche physique pour toute technologie d’accès sans fil. Après avoir évalué toutes les propositions de formes d’onde, le 3GPP a décidé d’adopter le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) avec un préfixe cyclique (CP) pour les transmissions DL et UL [38]. Le CP-OFDM peut permettre une faible complexité de

mise en œuvre et un faible coût pour les opérations à large bande et les technologies à entrées multiples et sorties multiples (MIMO). Le NR prend également en charge l'utilisation de l'OFDM à étalement par transformée de Fourier discrète (DFT) (DFTS-OFDM) sur la liaison montante pour améliorer la couverture.

2.4.2 Numérologie

Le terme numérologie fait référence à la configuration des paramètres de forme d'onde, et différentes numérologies sont considérées comme des sous trames basées sur OFDM ayant différents paramètres tels que l'espacement des sous-porteuses, la durée du symbole, la taille du préfixe cyclique (CP). Autrement dit une numérologie est définie par l'espacement des sous-porteuses et l'entête du CP. Plusieurs espacements de sous-porteuses peuvent être calculés en mettant à l'échelle un espacement de base de sous-porteuse par un entier NN . La numérologie utilisée peut être sélectionnée indépendamment de la bande de fréquence, mais il est supposé que cet espacement soit très faible pour des fréquences de porteuse très élevées [39]. En bref, on retrouve dans la NR le principe de numérologie qui repose sur une multiplication de l'espacement des sous porteuses. En effet, en augmentons la largeur d'une sous porteuse par multiplication par un facteur de deux de cette sous-porteuse, on arrive à augmenter la largeur de la bande totale et par conséquent on arrive à augmenter le débit de transmission.

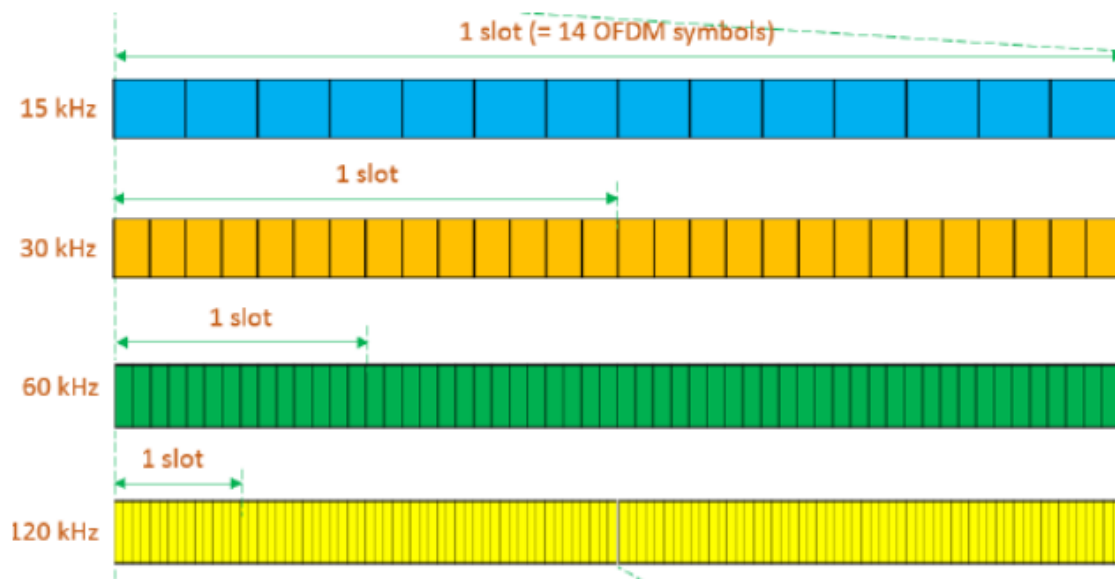


FIGURE 2.14 – Alignement temporel pour les différentes numérologies [38]

La figure 2.10 illustre les symboles OFDM et les emplacements pour différentes numérologies : 15 KHz, 30 KHz, 60 KHz et 120 KHz. Nous observons qu'un nombre entier d'emplacements d'une numérologie (avec un espacement de sous-porteuse plus large) s'inscrit dans un slot d'une autre numérologie (avec un espacement de sous-porteuse plus étroit). Cet alignement temporel des slots est important pour les réseaux TDD afin de permettre des périodes de transmission de liaison montante et de liaison descendante alignées dans le temps.

2.4.3 Structure de trame 5G

Dans le domaine temporel, les transmissions de la couche physique sont organisées en trames radio. Une trame radio a une durée de 10 ms. Chaque trame radio est divisée en 10 sous-trames d'une durée de 1 ms. Chaque sous-trame est ensuite divisée en emplacements

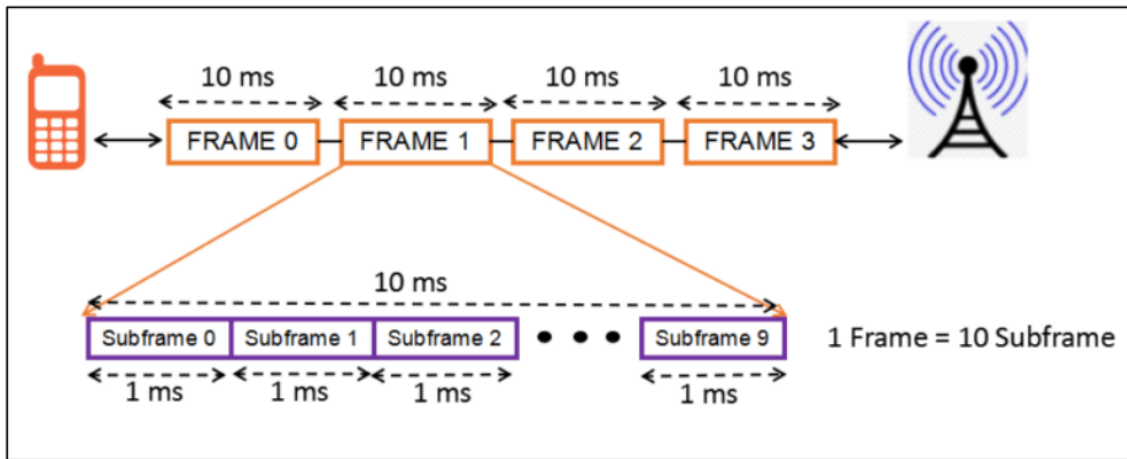


FIGURE 2.15 – Organisation des trames dans la 5G-NR [40]

La longueur de slot varie en fonction de l'espacement des sous-porteuses. La tendance générale est que la longueur de slot diminue à mesure que l'espacement des sous-porteuses s'élargit, figure 1.6. Cette tendance provient de la nature de l'OFDM.

Carrier Spacing	1 ms	No. of Slots per Subframe
	Subframe	
15 KHz	1 slot / 1 ms Slot 0	1
30 KHz	1 slot / 0.5 ms Slot 0 Slot 1	2
60 KHz	1 slot / 0.25 ms Slot 0 Slot 1 Slot 2 Slot 3	4
120 KHz	1 slot / 0.125 ms 0 21 2 ... 8	8
240 KHz	1 slot / 0.0625 ms 0 1 2 3 ... 16	16

FIGURE 2.16 – Longueur des slots pour chaque numérogie [40]

2.5 Techniques de transmission

Des techniques de transmission intéressantes sont utilisées pour assurer le routage correct des données, en divisant les données en deux catégories du point de vue de la propagation et du point de vue de l'antenne.

2.5.1 D'un point de vue antenne

Pour la transmission sur les canaux radio, quatre types d'antennes sont utilisés : SISO, MISO, SIMO et MIMO

2.5.1.1 Système SISO

C'est l'architecture la plus simple qui utilise une seule antenne en émission et une autre en réception. Comme présentée dans la Figure 2.14

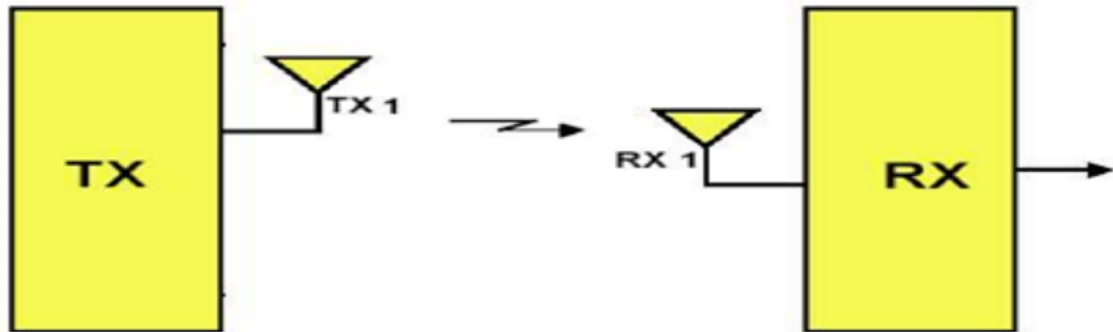


FIGURE 2.17 – Système SISO [41]

L'avantage d'un système SISO est sa simplicité. SISO n'exige aucun traitement en termes des diverses formes de diversité pouvant être utilisées. Toutefois, les performances du canal SISO sont limitées. Les interférences et les évanouissements auront plus d'impact sur le système qu'un système MIMO utilisant une certaine forme de diversité, et la capacité du canal est limitée par la loi de Shannon - le débit dépend de la largeur de bande du canal et du rapport signal sur bruit

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_0 W} \right) \quad (2.1)$$

Où :

P : La puissance du signal utile en Watt ;

N_0 : La densité spectrale de puissance du bruit calculé en W/Hz ;

W : La bande passante donnée en Hz.

En normalisant la capacité par la bande utile W , on obtient :

$$C = \log_2(1 + \rho) \quad (2.2)$$

Avec : ρ est le rapport signal sur bruit.

2.5.1.2 Système SIMO

C'est une technique qui utilise plusieurs antennes en réception pour lutter contre l'évanouissement dû au canal. Comme présentée dans la Figure 2.15 Lorsque plusieurs copies des mêmes données sont reçues sur des canaux à évanouissement indépendants, la quantité d'évanouissement subie par chaque copie des données sera différente. Cela garantit qu'au moins une copie subira moins d'évanouisse-

ment que le reste des copies, ainsi que, les chances de recevoir correctement les données transmises augmentent. En effet, cela améliore la fiabilité de l'ensemble du système et optimisera la vitesse des données [42].

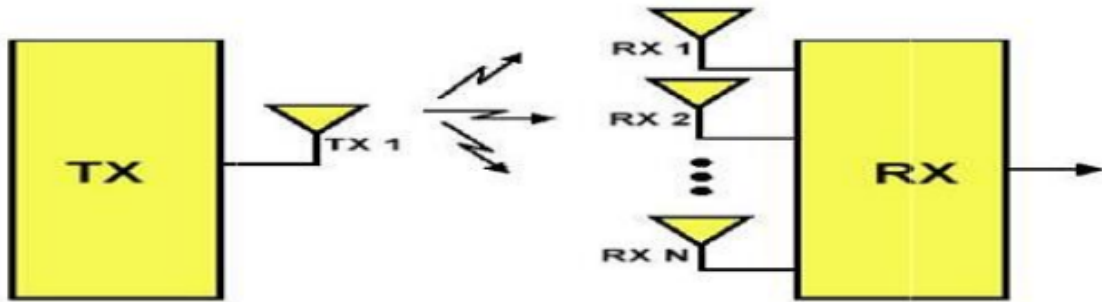


FIGURE 2.18 – Système SIMO [41]

La capacité du canal SIMO est [43] :

$$C = W \log_2 \left(1 + N_r^2 \frac{P}{N_0 W} \right) \quad (2.3)$$

Où : N_r est le nombre d'antenne réceptrice.

En normalisant la capacité par la bande utile W , on obtient :

$$C = \log_2(1 + \rho) \quad (2.4)$$

2.5.1.3 Système MISO

MISO est également appelé diversité de transmission. Dans ce cas, les mêmes données sont transmises de manière redondante à partir des deux antennes émettrices (Figure II.3). Le récepteur est alors capable de recevoir le signal optimal qu'il peut ensuite utiliser pour extraire les données requises.

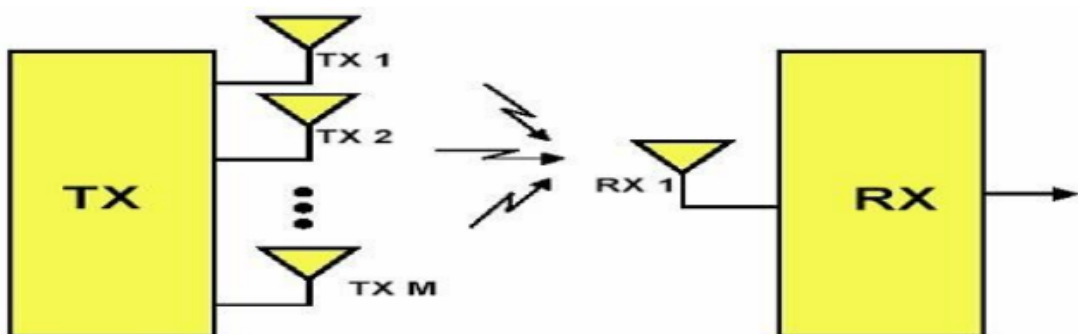


FIGURE 2.19 – Système MISO [41]

L'avantage d'utiliser MISO est que les multiples antennes et le traitement de redondance sont déplacés du récepteur vers l'émetteur. Dans des cas tels que les équipements utilisateur de téléphone cellulaire, cela peut constituer un avantage significatif en termes d'espace pour les antennes et de

réduction du niveau de traitement requis par le récepteur pour le codage de redondance. Ceci a un impact positif sur la taille, le coût et la durée de vie de la batterie car le niveau de traitement plus bas nécessite moins de consommation de la batterie.

La capacité du canal MISO est [43] :

Si la puissance P_i égale sur toutes les antennes, alors on dira que $P = N_t \times P_i$

$$C = W \log_2 \left(1 + N_t \frac{P_i}{N_0 W} \right) = W \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_0 W} \right) \quad (2.5)$$

Avec :

P_i : La puissance émise sur chaque antenne ;

N_t : Le nombre d'antennes.

En normalisant la capacité par la bande utile W , on obtient :

$$C = \log_2(1 + \rho) \quad (2.6)$$

2.5.1.4 Système MIMO

C'est une technique utilisée principalement dans les réseaux sans fil et réseaux mobiles, elle permet le transfert des données avec un débit très élevé et une amélioration de la qualité du rapport signal sur bruit en utilisant des réseaux d'antennes d'émission et de réception . Un canal peut être affecté par les évanouissements, ce qui aura un impact sur le taux d'erreur et le rapport signal sur bruit. Le principe de la diversité est de fournir au récepteur plusieurs versions du même signal. Supposons que ceux-ci soient affectés de différentes manières par le trajet du signal, la probabilité qu'ils soient tous affectés en même temps est considérablement réduite [44].

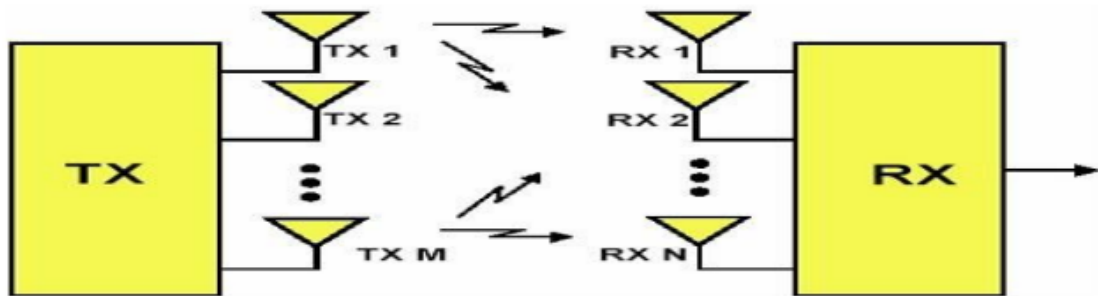


FIGURE 2.20 – Système MIMO [41]

La capacité du canal MIMO s'écrit alors [44] :

$$C = \log_2 \left(\det \left[I_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} H H^* \right] \right) \quad (2.7)$$

Où :

I_{N_r} : La matrice identité ;

ρ : Le rapport signal sur bruit

— Comparaison entre MIMO, MISO, SIMO et SISO.

Technologie	Antenne émettrice	Antenne réceptrice
SISO	TX=1	RX=1
SIMO	TX=1	RX=N
MISO	TX=N	RX=1
MIMO	TX=N	RX=N

TABLE 2.1 – Comparaison entre MIMO, MISO, SIMO et SISO.

2.5.2 Beamforming

Appelé aussi filtrage spatial, l'ensemble des émetteurs sont dirigés par un logiciel permettant de focaliser le faisceau d'onde radio sur une zone donnée et s'annuler ailleurs pour que le signal soit reçu à l'emplacement où il est nécessaire à l'utilisateur. Le changement d'orientation du réseau d'émission se fait par le modeleur de faisceau en contrôlant l'amplitude et la phase du signal, créant ainsi un motif d'interférences constructives et destructives. À la réception, les différents signaux reçus par les capteurs sont combinés afin d'avoir l'information souhaitée. L'objectif est d'améliorer la stabilité et la puissance du signal émis, ainsi que réduire les interférences. Le beamforming peut être utilisé à l'émission ou à la réception afin d'avoir une sélectivité spatiale [45]. L'un des principaux avantages de cette technique est sa capacité à économiser l'énergie en permettant aux antennes relais de transmettre uniquement en cas de besoin, plutôt qu'en continu. Cela a grandement contribué à l'amélioration des communications sans fil.

2.5.3 D'un point de vue propagation (LOS, NLOS)

Dans la communication sans fil, deux types de propagation sont généralement distingués, le LOS (Line Of Sight) et le NLOS (Non Line Of Sight).

- **LOS** : La ligne de vue directe est un type de propagation dans lequel les données sont envoyées et reçues uniquement lorsqu'il n'y a pas d'obstacle entre les stations émettrices et réceptrices. Sur les longues distances (trajets multiples), la transmission en visibilité directe est limitée par les obstacles géographiques et la courbure terrestre [46].

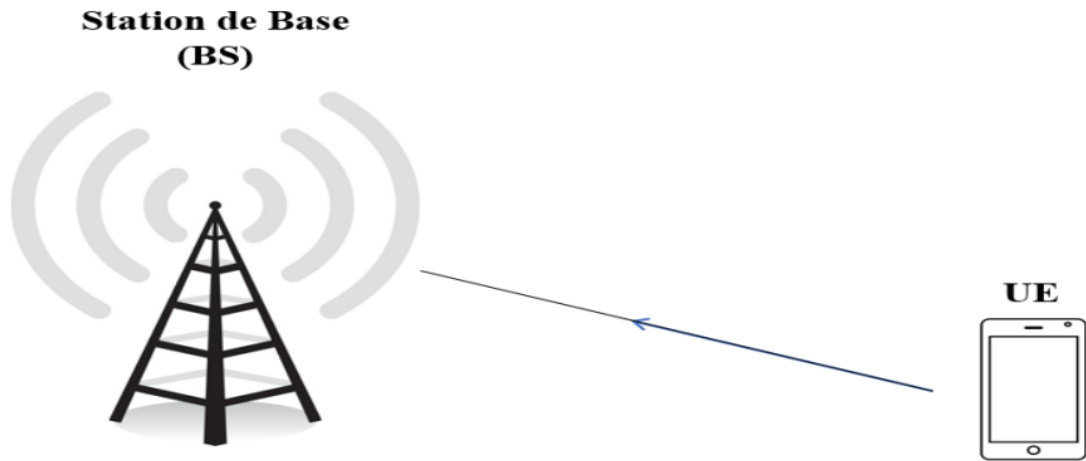


FIGURE 2.21 – Type de propagation LOS [47]

- NLOS : Le terme NLOS (Non Line of Sight) est utilisé généralement lorsque l'émetteur et le récepteur radio ne sont pas dans la ligne de vision directe et qui est traité par l'utilisation de trajets multiples dans la propagation du signal. La non ligne de vue, appelée aussi ligne de vue proche, se réfère au trajet de propagation des ondes radio, qui est partiellement ou totalement bloqué par des obstacles. Parmi ces modifications ou obstructions auxquelles les ondes peuvent être soumises, nous pouvons citer : la diffraction, la diffusion et la réflexion [48].

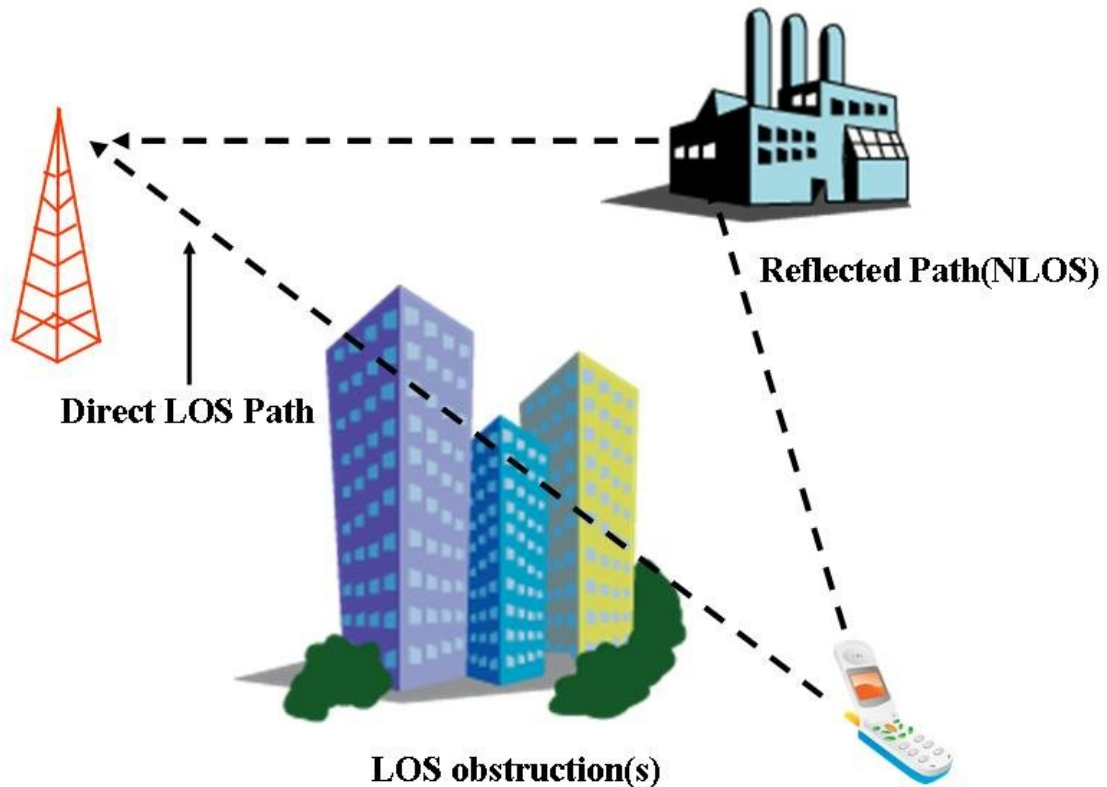


FIGURE 2.22 – Type de propagation NLOS [47]

Configurations NLOS/systemes diffus

Les systèmes de communication NLOS fonctionnent sur la base de la propagation par trajets

multiples. Ce type de liaison se produit dans des environnements intérieurs et est bien plus complexe à prédire que les liaisons LOS, car la communication optique NLOS utilise des signaux réfléchis par des murs, des meubles, des personnes, etc. De plus, il y a une multitude de facteurs qui affectent le CIR, tels que la longueur d'onde, le matériau de surface, le champ de vision (FOV), le blocage et l'ombrage. Les signaux réfléchis entraînent une perte d'énergie sur les surfaces réfléchissantes, ce qui peut avoir un impact sur la qualité de la liaison [49]

2.6 Perte de Trajet pour les Réseaux 5G

Les réseaux 5G utilisent différentes fréquences et technologies, donc plusieurs modèles de perte de trajet sont utilisés. Un modèle couramment utilisé est le modèle de propagation en espace libre (Free Space Path Loss, FSPL) et le modèle de propagation en ligne de vue (Line-of-Sight, LOS) spécifié par le 3GPP.

2.6.1 Modèle de Propagation en Ligne de Vue (LOS) pour 3GPP

$$PL_{LOS} = 32.4 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f)$$

Ou :

PL_{LOS} est la perte de trajet en dB.

d est la distance entre l'émetteur et le récepteur en kilomètres.

f est la fréquence du signal en GHz.

2.6.1.1 Modèles en espace libre (Free-Space Models)

Ce modèle est utilisé pour prédire la propagation des ondes en ligne de vue directe, sans obstacle entre l'émetteur et le récepteur. La perte de propagation est calculée en fonction de la distance et de la fréquence. Formule de perte de trajet en espace libre :

$$L = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right)$$

Où :

L est la perte de chemin en dB

d est la distance entre l'émetteur et le récepteur en mètres

f est la fréquence du signal en Hz

c est la vitesse de la lumière (environ 3×10^8 m/s).

2.6.1.2 Modèle de Friis

Le modèle de Friis est une variante du modèle en espace libre qui inclut l'impact des gains des antennes émettrices et réceptrices.

Formule du Modèle de Friis :

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L$$

Où : P_r est la puissance reçue en dB,
 P_t est la puissance transmise en dB,
 G_t est le gain de l'antenne émettrice en dB,
 G_r est le gain de l'antenne réceptrice en dB,
 L est la perte de chemin en dB (calculée comme dans le modèle en espace libre).

2.6.2 Modèle de Propagation en non Ligne de Vue (NLOS) pour 3GPP

2.6.2.1 Canal de Rayleigh

Un canal Rayleigh est un modèle statistique utilisé pour représenter les variations d'amplitude des signaux radio dans un environnement où il y a une absence de ligne de vue directe LOS entre l'émetteur et le récepteur. Les variations d'amplitude sont dues aux multiples trajets pris par le signal qui sont causés par les réflexions, diffractions et dispersions des objets dans l'environnement

Caractéristiques

- Multipath Propagation : Le signal arrive au récepteur par plusieurs trajets différents, chacun avec un décalage de phase et d'amplitude.
- Fading : Le modèle Rayleigh est utilisé pour décrire le fading (ou évanouissement) du signal, qui est une variation rapide et aléatoire de l'amplitude du signal reçu.
- Distribution de Rayleigh : Les amplitudes des composantes des trajets multiples suivent une distribution de Rayleigh.

L'amplitude R suit une distribution de Rayleigh dont la fonction de densité de probabilité (PDF) est [50]

$$f_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}, \quad r \geq 0 \quad (2.8)$$

où σ est l'écart type des variables gaussiennes sous-jacentes.

Le canal Rayleigh est souvent modélisé en utilisant une variable aléatoire complexe $h(t)$ dont les composantes en phase et en quadrature sont des variables aléatoires gaussiennes indépendantes de moyenne nulle et de variance égale.

L'équation du canal Rayleigh est souvent écrite comme :

$$h(t) = \sum_{n=1}^N a_n e^{j\theta_n} \quad (2.9)$$

N est le nombre de trajets multiples.

a_n est l'amplitude du n -ième trajet.

θ_n est la phase du n -ième trajet,

2.6.2.2 Canal de Rice

Communément appelée distribution Rice, également connue sous le nom de « distribution Nakagami-n » ou « NakagamiRice », est un modèle de propagation utilisé pour décrire les environnements de communication sans fil où il existe une composante directe (ligne de vue) en plus des trajets réfléchis et diffractés. Contrairement au canal de Rayleigh, le canal de Rice prend en compte une composante dominante, souvent appelée chemin direct, qui influence significativement le signal reçu.

Caractéristiques du Canal de Rice :

- Présence de ligne de vue (LoS) : Le canal de Rice est caractérisé par la présence d'un chemin direct entre l'émetteur et le récepteur, en plus des chemins réfléchis. Cette composante directe est responsable de la distribution Rician de l'amplitude du signal reçu.
- Distribution Rician de l'Amplitude : L'amplitude du signal reçu suit une distribution de Rice (ou distribution Rician), qui est une généralisation de la distribution de Rayleigh.
- Facteur de Rice (K) : Le facteur de Rice, K , est le rapport de la puissance de la composante directe à la puissance des composantes diffusées. Il est défini comme : $K = \frac{A^2}{2\sigma^2}$ où A est l'amplitude de la composante directe et σ^2 est la variance des composantes diffusées

Équation du Canal de Rice :

Soit $s(t)$ le signal transmis, $h(t)$ le gain complexe du canal, et $n(t)$ le bruit additif, le signal reçu $r(t)$ est donné par :

$$r(t) = s(t) \cdot h(t) + n(t)$$

où $h(t)$ est le gain complexe du canal de Rice, décomposé en :

$$h(t) = h_{LoS}(t) + h_{NLoS}(t)$$

$h_{LoS}(t)$ représente la composante de ligne de vue (LoS).

$h_{NLoS}(t)$ représente la composante de non ligne de vue (NLoS).

Modélisation de $h_{LoS}(t)$ et $h_{NLoS}(t)$

- Composante de ligne de vue (LoS) :

La composante de ligne de vue est souvent modélisée comme une sinusoïde complexe : $h_{LoS}(t) = Ae^{j\phi}$
Où :

A est l'amplitude de la composante directe.

ϕ est la phase de la composante directe.

- Composante de non ligne de vue (NLoS) :

La composante de non ligne de vue est modélisée comme une somme de composantes gaussiennes complexes indépendantes : $h_{NLoS}(t) = \sum_{i=1}^N a_i e^{j\theta_i}$

Où :

a_i sont des amplitudes de Rayleigh.

θ_i sont des phases uniformément distribuées.

Fonction de densité

Sa fonction de densité de probabilité est définie par [51] :

$$P_\alpha(\alpha) = \frac{2(1+n^2)e^{-n^2}}{\Omega} \exp\left[-\frac{(1+n)^2\alpha^2}{\Omega}\right] I_0\left(2n\alpha\sqrt{\frac{1+n^2}{\Omega}}\right), \alpha \geq 0 \quad (2.10)$$

Avec :

I_0 qui est La fonction de Bessel,

n le paramètre d'évanouissement de Rice

le paramètre de Rice également noté K , il correspond au rapport entre la puissance de la composante du trajet directe x_d (LOS) avec la puissance de la composante des trajets multiples σ^2 (NLOS), et K est défini par :

$$K = n^2 = \frac{2}{2\sigma^2} \quad (2.11)$$

2.6.2.3 Distribution de Nakagami

La distribution m-Nakagami fait partie des distributions qui représentent l'évanouissement dans un canal de communication sans fil. [52] ; C'est une distribution de probabilité qui conçoit généralement des évanouissements à petite échelle (un phénomène qui affecte le signal transmis pendant un petit intervalle de temps) [53]. Le modèle du canal Nakagami ou m-Nakagami dont 'm' est défini comme un facteur d'évanouissement de Nakagami est utilisé pour les évanouissements modélisés par multi-trajets. Il s'agit d'un modèle d'évanouissement général qui peut être adapté aux différents modèles de canaux et qui permet de fournir des résultats plus précis pour décrire le canal lors de l'utilisation des systèmes de communication. La loi de distribution m-Nakagami est une loi de distribution de probabilité qui utilise les deux paramètres m et Ω . Sa fonction de densité de probabilité de l'amplitude α par symbole est définie par [53] :

$$P_\alpha(\alpha) = \frac{2m^m\alpha^{2m-1}}{\Omega^m\Gamma(m)} \exp\left[-\frac{m\alpha^2}{\Omega}\right] \quad (2.12)$$

Dont :

$\Gamma(m)$ est la fonction gamma,

Ω est la valeur quadratique moyenne

m le paramètre d'évanouissement dont sa valeur est comprise entre 12 et $+\infty$, il est défini par :

$$m = \frac{\Omega^2}{E\left[(\alpha^2 - \Omega^2)^2\right]} \quad (2.13)$$

Les modèles de canaux sans fil sont des modèles qui décrivent l'effet de propagation par trajets multiples dont on cite le modèle de Rayleigh, le modèle de Rice et le modèle Nakagami. Ces modèles décrivent les fonctions de distribution de probabilité de la puissance du signal dans le site récepteur. Le modèle de Rayleigh suppose de nombreux chemins aléatoires sans ligne de visée, tandis que le modèle

de Rice suppose en plus un chemin en ligne de visée. Le modèle de Nakagami est un modèle empirique couvrant une large gamme de modèles d'évanouissement par trajet multiple grâce à l'introduction du paramètre 'm'. Il peut donc donner des résultats plus précis pour décrire le canal lorsqu'il est utilisé pour modéliser les systèmes de communication [52].

2.6.3 Bruit et interférences

SNR (RSB) Le rapport signal sur bruit est le rapport entre le signal utile et le bruit de fond indésirable.

$$SNR = P_{(\text{signal})} / P_{(\text{bruit})} \quad (2.14)$$

Généralement, le RSB est exprimé sous forme logarithmique à l'aide de décibels en tant que :

$$SNR(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_{(\text{signal})}}{P_{(\text{bruit})}} \quad (2.15)$$

BER Le taux d'erreur binaire est défini comme le taux auquel les erreurs se produisent dans un système de transmission. BER est le rapport du nombre de bits erronés au nombre total de bits transmis.

$$BER = \frac{\text{Nbr de bits erronés}}{\text{Nbr total de bits transmis}} \quad (2.16)$$

Modèle rapport signal sur bruit plus interférence SINR

Appelé rapport signal sur bruit plus interférence, c'est une grandeur utilisée pour accorder des limites théoriques supérieures dans les systèmes de communication sans fil et mesurer la qualité des connexions sans fil. Le SINR est défini comme la puissance d'un certain signal d'intérêt divisée par la somme de la puissance d'interférence et de la puissance de certains bruits de fond. Si la puissance du terme bruit est nulle, alors le SINR se réduit au rapport signal sur interférence (SIR), si la puissance d'interférence est nulle, le SINR se réduit au rapport signal sur bruit SNR, qui n'est pas très utilisé lors du développement de modèles mathématiques de réseaux sans fil [54].

La complexité de certains types de réseaux sans fil (téléphonie cellulaire ou mobile) a amené à l'utilisation des modèles de géométrie stochastique afin de modéliser le SINR. Il est défini pour un récepteur particulier situé à un certain point x dans l'espace (généralement sur le plan), son SINR est donné par :

$$SINR = \frac{P}{I + N} \quad (2.17)$$

Où :

P : La puissance du signal entrant d'intérêt ;

I : La puissance d'interférence des autres signaux (interférents) dans le réseau ;

N : Un certain terme de bruit, qui peut être une constante ou aléatoire.

Il est souvent exprimé en décibel ou dB. Pour développer un modèle mathématique afin d'estimer le SINR et représenter la propagation du signal entrant et des signaux brouilleurs, une approche de modèle courant consiste à supposer que le modèle de propagation se compose d'une composante aléatoire et d'une composante non aléatoire (ou déterministe). La composante déterministe cherche à capturer comment un signal s'atténue lorsqu'il parcourt un milieu tel que l'air, en introduisant une fonction de perte de trajet ou d'atténuation. La fonction de perte de chemin est donnée [55] :

$$PL = d^{-\alpha} \quad (2.18)$$

Où l'exposant de perte de chemin $\alpha > 2$ et d désigne la distance entre la station de base et un utilisateur typique situé dans le rayon de couverture.

- **Sans beamforming** Le rapport signal sur bruit plus interférence dans le cas où le beamforming n'est pas utilisé est décrit par la puissance du signal P_{MBS} au niveau de la MBS multiplié par le gain du canal h ainsi que la fonction de perte de chemin PL , divisé par la somme de l'ensemble des interférences au niveau de la MBS et SBS et un certain bruit N_0 , il est défini par [56] :

$$SINR = \frac{P_{MBS} \times h \times d^{-\alpha}}{I_{MBS} + I_{SBS} + N_0} \quad (2.19)$$

- **Avec beamforming** La différence en présence du beamforming où le faisceau d'onde est focalisé sur une zone précise est l'ajout du gain du beamforming $G(\theta, \delta)$, il est donc défini par [56] :

$$SINR = \frac{P_{MBS} \times G(\theta, \delta) \times h \times d^{-\alpha}}{I_{MBS} + I_{SBS} + N_0} \quad (2.20)$$

2.7 Les types de canaux de transmission

La technologie 5G, ou cinquième génération des réseaux mobiles, utilise plusieurs types de canaux de transmission pour améliorer les performances et l'efficacité par rapport aux générations précédentes. Ces canaux de transmission sont organisés en différentes catégories en fonction de leurs fonctions et de leurs rôles spécifiques. Voici une description des principaux types de canaux de transmission dans la 5G :

2.7.0.1 Les canaux physiques

Les canaux physiques sont responsables de la transmission des données sur le support radio. Ils comprennent :

- **PDSCH (Physical Downlink Shared Channel)** : Canal partagé pour la transmission de données utilisateur sur le lien descendant.
- **PUSCH (Physical Uplink Shared Channel)** : Canal partagé pour la transmission de données utilisateur sur le lien montant.

- **PBCH (Physical Broadcast Channel)** : Canal utilisé pour la diffusion d'informations essentielles à la connexion initiale.
- **PDCCH (Physical Downlink Control Channel)** : Canal de contrôle qui transporte les informations de contrôle nécessaires pour la configuration des canaux de données.
- **PUCCH (Physical Uplink Control Channel)** : utilisé pour les informations de contrôle de liaison montante, qui comprend : L'accusé de réception HARQ (indiquant si une transmission en liaison descendante a été un succès ou non), la demande de planification (demande de ressources temps-fréquence du réseau pour les transmissions en liaison montante) et les informations sur l'état du canal de la liaison descendante pour l'adaptation de la liaison ; [38]

TABLE 2.2 – Modulation et codage des canaux pour chaque canal

DL / UL	Canal physique	Modulation	Codage des canaux
DL	PDSCH	QPSK, 16 QAM, 64 QAM, 256 QAM	LDPC
DL	PDSCH	QPSK	Codage polaire
DL	PBCH	QPSK	Codage polaire
UL	PRACH	N/A	N/A
UL	PUSCH	QPSK, 16 QAM, 64 QAM, 256 QAM	LDPC
UL	PUCCH	$\pi/2$ -BPSK, BPSK, QPSK	N/A

2.7.0.2 Canaux de Contrôle

Ces canaux sont utilisés pour gérer et contrôler les transmissions de données :

- **DCI (Downlink Control Information)** : Informations de contrôle envoyées sur le PDCCH, contenant des instructions pour la réception des données sur le PDSCH
- **UCI (Uplink Control Information)** : Informations de contrôle envoyées sur le PUCCH ou le PUSCH, comprenant des acquittements, des rapports de qualité de canal (CQI), et des indicateurs de demande de ressources (Scheduling Requests).

2.7.0.3 Canaux Logiques

Les canaux logiques sont une couche au-dessus des canaux physiques et définissent le type d'information transportée :

- **BCCH (Broadcast Control Channel)** : Canal utilisé pour la diffusion de messages de contrôle qui doivent être reçus par toutes les stations de base dans une cellule.
- **PCCH (Paging Control Channel)** : Canal utilisé pour les messages de pagination, informant les appareils d'événements tels que les appels entrants.
- **CCCH (Common Control Channel)** : Canal utilisé pour les messages de contrôle communs, particulièrement utile lors de l'établissement initial d'une connexion.
- **DCCH (Dedicated Control Channel)** : Canal utilisé pour le contrôle dédié, transportant des informations de signalisation spécifiques à une connexion utilisateur particulière.
- **DTCH (Dedicated Traffic Channel)** : Canal dédié au trafic utilisateur, transportant les données de l'utilisateur.

2.7.0.4 Canaux de Transport

Ces canaux définissent comment les données sont transportées sur les canaux physiques et comprennent :

- **DL-SCH (Downlink Shared Channel)** : Canal partagé sur le lien descendant pour la transmission de données utilisateur.
- **UL-SCH (Uplink Shared Channel)** : Canal partagé sur le lien montant pour la transmission de données utilisateur.
- **BCH (Broadcast Channel)** : Canal utilisé pour diffuser les informations système essentielles aux appareils mobiles.

2.7.0.5 Canaux de Synchronisation

Ces canaux aident les appareils mobiles à se synchroniser avec la station de base :

- **PSS (Primary Synchronization Signal)** : Signal de synchronisation primaire, utilisé par les appareils pour la synchronisation initiale en temps et fréquence.
- **SSS (Secondary Synchronization Signal)** : Signal de synchronisation secondaire, utilisé conjointement avec le PSS pour identifier la cellule et compléter la synchronisation.

2.7.0.6 Canaux de Référence

Ces canaux fournissent des informations de référence pour l'estimation de canal et l'optimisation de la transmission :

- **CSI-RS (Channel State Information-Reference Signal)** : Signal de référence utilisé pour l'estimation de l'état du canal.
- **DMRS (Demodulation Reference Signal)** : Signal de référence utilisé pour aider à la démodulation des données.

2.8 Techniques d'accès au canal

Les réseaux cellulaires mettent en œuvre un ensemble différent de technologies d'accès, et Avec l'avènement de la 4G, l'accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence OFDMA domine l'apparence, et afin de répondre aux exigences élevées de la nouvelle génération de nouveaux produits 5G Des technologies telles que NOMA et OMA seront utilisées.

2.8.1 Modulations OFDM et OFDMA

La modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiple) est une modulation multiporteuse orthogonale et une technique qui s'avère être efficace pour lutter contre les évanouissements par trajets multiples dans les canaux sans fil. Son principe est de transmettre un bloc de donnée binaire sur un grand nombre de porteuses en même temps, Pour que les fréquences des porteuses soient les plus proches possibles et ainsi transmettre le maximum d'informations sur une portion de fréquences données [16].

L'OFDM est intéressante car elle offre des solutions relativement faciles à certains problèmes difficiles rencontrés lors de l'utilisation de schémas de modulation à porteuse unique sur des canaux sans fil. Le plus grand avantage de l'utilisation de l'OFDM est que la modulation de sous-porteuses orthogonales très rapprochées divise la largeur de bande disponible en une série de sous-bandes étroites. Mais les spectres des signaux correspondant aux différentes sous-porteuses se chevauchent en fréquence. Le

chevauchement spectral donne une forme d'onde qui utilise la largeur de bande disponible avec une très grande efficacité [57].

Un modulateur OFDM peut être mis en œuvre comme une transformée de Fourier discrète inverse (IDFT) à N points sur un bloc de N symboles d'information, suivie d'un convertisseur numérique-analogique (CNA) sur les échantillons IDFT.

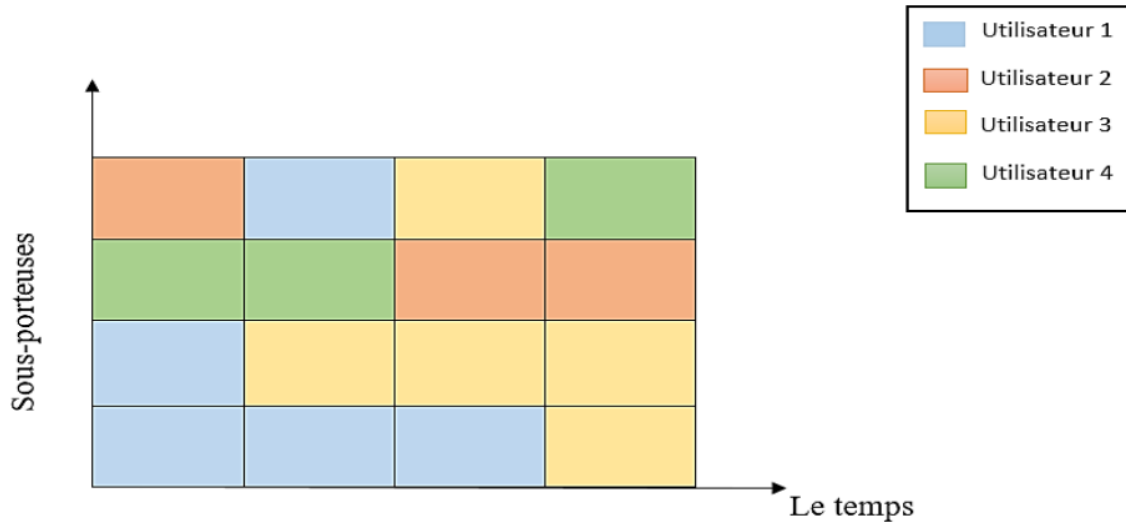


FIGURE 2.23 – Technique d'accès OFDMA [58]

2.8.2 Technique d'accès NOMA

C'est une technique d'accès non orthogonale basée sur le multiplexage en puissance, proposée pour les réseaux 5G afin d'améliorer l'efficacité spectrale et surmonter les contraintes de la technique orthogonale OMA. Elle permet à plusieurs utilisateurs d'utiliser la même sous porteuse aux mêmes ressources (fréquences, temps ou code). Des codes différents sont attribués à chaque utilisateur afin de distinguer entre eux : SCMA (Sparse Code Multiple Access) combinaison du CDMA (Code Division Multiple Access) [59].

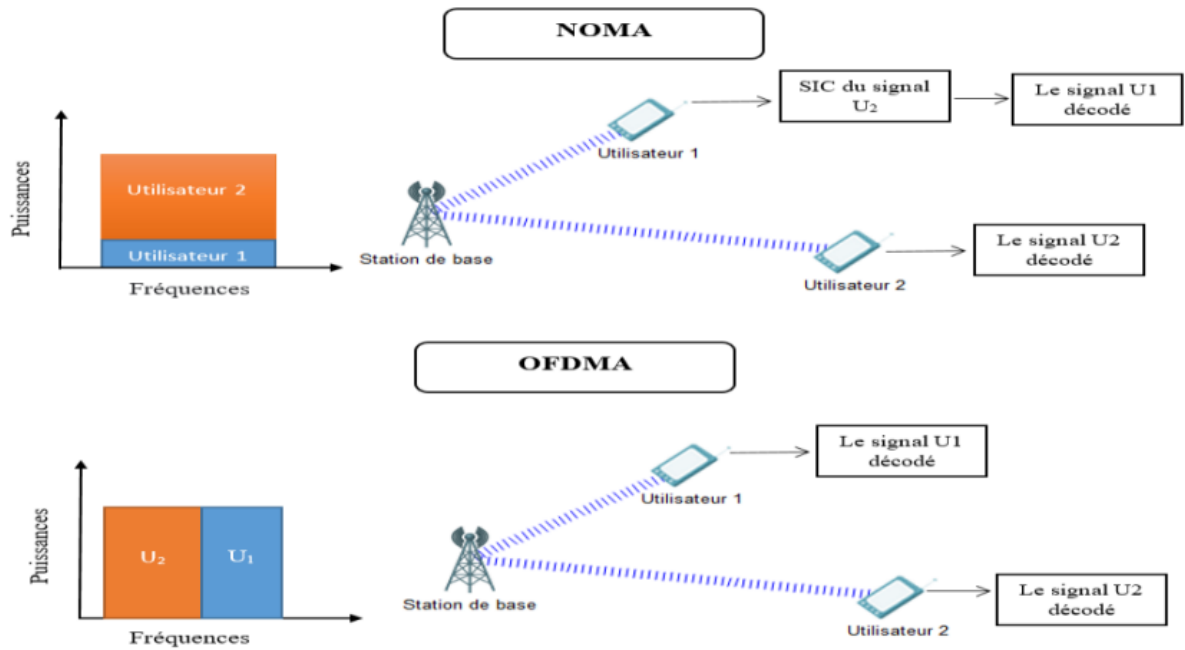


FIGURE 2.24 – Différence entre OFDMA et NOMA pour deux utilisateurs [60]

Les systèmes NOMA peuvent être classés en deux catégories : domaine de puissance NOMA (PD-NOMA) et domaine de code NOMA (CD-NOMA). Le concept PD-NOMA est d'attribuer un niveau de puissance unique à un ou plusieurs utilisateurs, ses derniers transmettent leurs signaux en partageant les mêmes ressources de code temps-fréquence, chacun utilisant sa puissance allouée. CD-NOMA s'appuie sur des livres de codes, des séquences d'étalement, des motifs d'entrelacement ou du brouillage des séquences pour allouer de manière non orthogonale des ressources aux utilisateurs [49]. NOMA favorise une connectivité massive tout en offrant une grande capacité, réduit la latence, améliore l'équité de l'utilisateur et l'efficacité spectrale, ainsi qu'elle augmente la fiabilité par rapport aux techniques d'accès multiples orthogonales (OMA) [59].

Les signaux d'informations individuels sont superposés en une seule forme d'onde, tandis qu'au niveau du récepteur, SIC (Successive Interference Cancellation) décode les signaux un par un jusqu'à ce qu'il trouve le signal souhaité [61]. comme le montre la figure

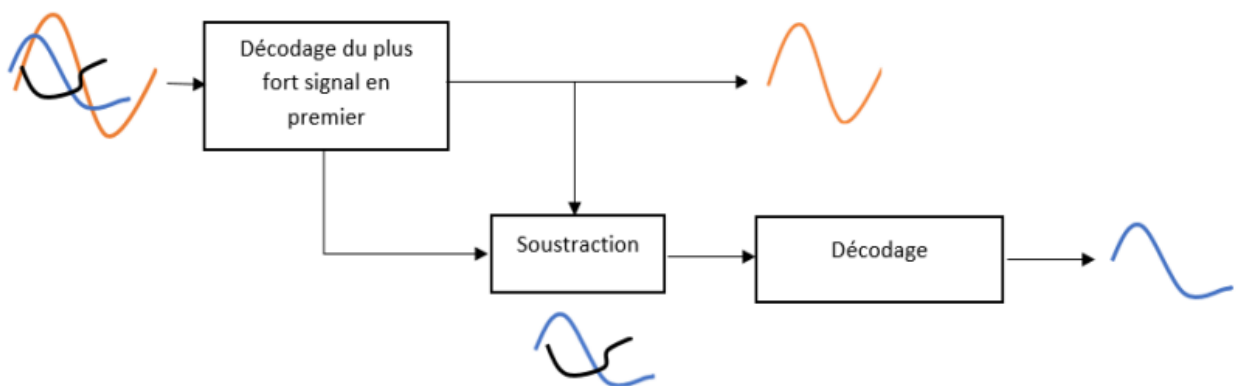


FIGURE 2.25 – Annulation des interférences successives [62]

Les trois signaux d'information sont superposés au niveau de l'émetteur. Le signal reçu au niveau du récepteur SIC comprend l'ensemble des trois signaux, le premier signal décodé par SIC est le plus fort tandis que les autres sont des interférences. Le premier signal décodé est soustrait du signal reçu et si le décodage est parfait, la forme d'onde avec le reste des signaux est obtenue avec précision. SIC itère le processus jusqu'à ce qu'il trouve le signal souhaité [18].

2.9 Conclusion

une analyse approfondie des différents aspects techniques et architecturaux de la 5G, mettant en lumière ses principaux objectifs et les innovations qui la distinguent des générations précédentes. La 5G, avec ses capacités de vitesse accrue, de latence réduite, de capacité réseau améliorée et de fiabilité optimisée, représente une avancée significative dans le domaine des communications mobiles. Les innovations telles que les ondes millimétriques, le Massive MIMO et le Beamforming jouent un rôle essentiel dans l'atteinte de ces objectifs.

Ce chapitre a également exploré l'architecture du réseau 5G, incluant le réseau d'accès radio (RAN) et le réseau central (5GC), ainsi que les différentes bandes de fréquences et numérogies utilisées. Les défis associés à leur déploiement ont été examinés, soulignant la complexité et les efforts nécessaires pour une mise en œuvre efficace de la 5G.

En conclusion, la 5G ouvre la voie à de nouvelles applications et services, transformant non seulement les communications mobiles mais aussi divers secteurs tels que les villes intelligentes, la santé connectée et les transports. Les modes de déploiement variés, adaptés aux besoins spécifiques, permettent une flexibilité dans l'adoption de cette technologie révolutionnaire.

Cette analyse démontre que la 5G n'est pas simplement une évolution de la 4G, mais une révolution technologique qui pose les bases pour un futur où la connectivité est omniprésente, fiable et capable de répondre aux exigences des applications modernes et émergentes/

Chapitre 3

La qualité de service dans la 5G

3.1 Introduction de la qualité de service

La qualité est une notion subjective et évolutive. Ainsi, la qualité a été définie par Deming comme étant la satisfaction des besoins des consommateurs ou utilisateurs [63]. Le standard ISO (international organisation of standardization), dans sa nouvelle et dernière version ISO 9000 : 2015 définit la qualité comme l'aptitude d'un ensemble de caractéristiques intrinsèques d'un objet à satisfaire des exigences [64]. En l'occurrence, la qualité dans les réseaux informatiques connue sous le terme qualité de service (QoS) a été définie par la RFC 2386 comme un ensemble des garanties à assurer, par le réseau, pour le transport d'un trafic d'une source vers une destination. L'ensemble des garanties sont assurées, lors du transport des données, par l'implémentation de différents mécanismes au sein du réseau afin de partager équitablement, dans la mesure du possible, les différentes ressources pour satisfaire les besoins (exigences) des utilisateurs réels ou virtuels (applications, services, etc.), tels que ; le débit minimal, la fiabilité et la sécurité. De son côté, l'utilisateur perçoit cette qualité, selon l'UIT-T (Union Internationale des Télécommunications), comme l'effet général de la performance d'un service qui détermine le degré de satisfaction d'un utilisateur du service. D'un autre côté purement technique, cette qualité est la capacité d'assurer la fluidité du trafic et/ou service demandée pour une application, un hôte ou un routeur. Afin de montrer la subjectivité, à titre d'exemple ; dans le cas d'une application de visioconférence, la qualité ciblée serait le délai de transfert, afin de garantir une fluidité de la communication ; alors que dans le cas d'un service de transfert de fichiers la qualité ciblée serait principalement le débit. La majorité des applications exigent une fiabilité de transfert des données qui sera garantie par le facteur de nombre de paquets transmis avec succès. En parlant des réseaux filaires, les mécanismes introduits pour garantir cette QoS (MPLS : Multi-Protocol Label Switching, IntServ : Integrated Services, DiffServ : Differentiated Services), se basent, essentiellement, sur la connaissance parfaite de l'état du réseau notamment ; la bande passante, la fiabilité des liens et les délais de transmission [65].

3.2 Qu'est-ce que la qualité de service dans le réseau ?

La qualité de service (QoS) est l'utilisation de mécanismes ou de technologies fonctionnant sur un réseau pour contrôler le trafic et assurer la performance des applications critiques avec une capacité réseau limitée. Elle permet aux organisations d'ajuster leur trafic réseau global en hiérarchisant des applications haute performance spécifiques.

La QoS est généralement appliquée aux réseaux qui véhiculent du trafic pour les systèmes à forte

consommation de ressources. Les services courants pour lesquels elle est requise comprennent la télévision par protocole Internet (IPTV), les jeux en ligne, les médias en streaming, la vidéoconférence, la vidéo à la demande (VOD) et la voix sur IP (VoIP).

En utilisant la QoS, les entreprises ont la possibilité d'optimiser les performances d'applications multiples sur leur réseau et d'obtenir une visibilité sur le débit binaire, le délai, la gigue et le débit des paquets de leur réseau. Cela leur permet de concevoir le trafic sur leur réseau et de changer la façon dont les paquets sont acheminés vers Internet ou d'autres réseaux afin d'éviter tout retard de transmission. Cela permet également à l'organisation d'atteindre la qualité de service réseau attendue pour les applications et de fournir les expériences utilisateur attendues.

L'objectif clé de la QoS est de permettre aux réseaux et aux organisations de hiérarchiser le trafic, en offrant notamment une bande passante dédiée, une gigue contrôlée et une latence plus faible. Les technologies utilisées à cet effet sont essentielles pour améliorer les performances des applications d'entreprise, des réseaux étendus (WAN) et des réseaux de fournisseurs de services.



FIGURE 3.1 – Application de la QoS

3.3 Métriques de la qualité de service

Afin de quantifier la notion de QoS et de la mesurer, un certain nombre de métriques de nature différente mais convergeant vers un même objectif sont définies, à savoir garantir la QoS et répondre aux besoins implicites et explicites des utilisateurs. Les indicateurs de qualité de service peuvent être de nature :

- Additives comme le délai de transmission de bout en bout qui est défini par la somme des délais de transmissions écoulés par le nombre de sauts afin d'atteindre la destination
- Concave comme le cas de la bande passante qui est égale à la bande passante minimale offerte par les différents liens de transmission
- multiplicatives comme le cas de la probabilité de perte des paquets qui égale au produit des probabilités de perte des paquets de tous les liens tout le long du chemin de transmission (Espès 2008) La RFC 2386 caractérise la QoS comme un ensemble de besoins à assurer par le réseau pour le transport d'un trafic d'une source à une destination (Crawley et al. 1998). Ces besoins peuvent être traduits en un ensemble d'attributs pré-spécifiés et mesurables en terme de :
 - Délai de bout en bout
 - Durée de vie du réseau
 - Bande passante
 - Nombre de paquets perdus
 - Sécurité de la donnée transmise

Dans ce qui suit, nous présenterons brièvement quelques métriques de QoS.

3.3.1 Bande passante

La bande passante représente la largeur de bande en fréquence allouée par le réseau pour un service donnée. Dans le cas des réseaux informatiques, la bande passante définit la capacité du réseau à transmettre des données de bout en bout. La gestion de la bande passante est un élément important pour la garantie de la qualité de service [66].

3.3.2 Délai de bout en bout

Le délai de bout en bout caractérise le temps effectué pour l'envoi d'un paquet par un émetteur jusqu'à son arrivée à destination. Ce délai implique :

- Délai de propagation typiquement lié à la topologie du réseau. La densité et l'étendue du réseau affectent ce délai. Aussi, la distance entre l'émetteur et le récepteur affecte ce délai.
- Délai de traitement des paquets lors de leur passage par les nœuds du réseau. Il est caractérisé par la capacité intrinsèque des routeurs en termes de files d'attente ainsi que les politiques de priorité implémentées afin de fluidifier le trafic.
- Délai de transmission dépendant essentiellement du volume de l'information transmise. Ce paramètre étroitement lié à la charge du réseau et le partage de la bande passante. [67]

A cet effet, garantir ce critère de délai signifie proposer des mécanismes assurant l'efficacité du traitement de la donnée et de sa transmission de bout en bout, en incluant les trois critères précités.

3.3.3 Gigue (variation du délai)

La gigue est exclusivement liée à la variation du délai de transmission de bout en bout au. Cette dernière est principalement due à la différence existante entre la performance des équipements du réseau dans le traitement des paquets. Ce paramètre nuit automatiquement à la qualité de service requise, et nécessite à implémenter des mécanismes d'ordonnancement des paquets à la réception [68]

3.3.4 La perte des paquets

Cette métrique permet de mesurer le taux de pertes des paquets des paquets dans le réseau, interprété par la non délivrance d'un paquet de données. Ceci se produit lorsqu'il y a des erreurs d'intégrité sur les données, la plupart du temps due à un encombrement du réseau [69].

3.4 Techniques d'optimisation de la QoS dans la 5G

L'optimisation de la QoS dans les réseaux 5G implique l'utilisation de diverses techniques et technologies pour minimiser les problèmes liés à la bande passante, à la latence, à la gigue et à la perte de paquets. Voici quelques-unes des approches couramment utilisées :

3.4.1 Prioritisation et Traffic Shaping

La priorisation et le traffic shaping sont des techniques essentielles pour gérer efficacement le trafic dans les réseaux 5G, en garantissant que les applications critiques reçoivent les ressources nécessaires

pour fonctionner de manière optimale. [70]

Prioritisation :

La priorisation consiste à organiser le trafic réseau en différentes classes ou niveaux de service, souvent en fonction de l'importance ou de l'urgence des données. Cette technique permet d'allouer des ressources de manière préférentielle aux données critiques, assurant ainsi que les applications nécessitant une faible latence, un débit élevé ou une fiabilité accrue reçoivent les performances nécessaires.

- **Classes de Service :** Les données sont classifiées en différentes catégories telles que la VoIP, la vidéo en streaming, les applications en temps réel et les transferts de fichiers. Chaque classe de service reçoit une priorité différente basée sur ses exigences de QoS.

- **Marquage des Paquets :** Chaque paquet de données est marqué avec une étiquette de priorité à l'aide de protocoles tels que le Differentiated Services Code Point (DSCP) dans l'interface IP. Cela permet aux routeurs et aux commutateurs de traiter les paquets en fonction de leur priorité.

- **Queue Management :** Les paquets sont placés dans des files d'attente différentes selon leur priorité. Les paquets de haute priorité sont traités avant ceux de faible priorité, réduisant ainsi les délais et la perte de paquets pour les applications critiques.

Traffic Shaping :

Le traffic shaping, également connu sous le nom de regulation du trafic, est une technique utilisée pour contrôler la quantité et le rythme du trafic envoyé sur le réseau. Elle permet de lisser les pics de trafic et de s'assurer que les flux de données n'excèdent pas la capacité du réseau, ce qui pourrait conduire à une congestion et à des problèmes de QoS. [71]

- **Rate Limiting :** Imposition d'une limite supérieure à la bande passante utilisable pour certains types de trafic. Cela empêche les applications non cruciales d'épuiser les ressources réseau.

- **Token Bucket Algorithm :** Un algorithme communément utilisé pour le traffic shaping. Des "jetons" sont ajoutés à un seau à intervalles réguliers. Pour qu'un paquet soit transmis, il doit "consommer" un jeton. Cela permet de contrôler efficacement le débit du trafic.

- **Leaky Bucket Algorithm :** Similaire au Token Bucket, mais il émet des paquets à un débit constant, quel que soit le pic de trafic, aidant à amortir les rafales de trafic et à réduire la congestion.

Applications dans les Réseaux 5G :

- **Voix sur IP (VoIP) :** La priorité absolue est donnée aux paquets de voix pour réduire la latence et la gigue, assurant ainsi une communication vocale fluide et claire.

- **Streaming Vidéo :** Le trafic vidéo est priorisé pour éviter les mises en mémoire tampon et garantir une qualité de service élevée, même en période de forte demande réseau.

- **Applications en Temps Réel :** Les applications critiques comme les services de télémédecine et les systèmes de conduite autonome bénéficient de la priorisation pour assurer des opérations sûres et efficaces. [72]

3.4.2 Allocation des Ressources et Planification

L'allocation des ressources et la planification sont des processus essentiels pour optimiser l'utilisation des ressources disponibles dans les réseaux 5G. Ces techniques assurent que les utilisateurs et les applications reçoivent la capacité réseau nécessaire pour fonctionner efficacement, tout en maximisant l'efficacité globale du réseau.

Allocation des Ressources :

L'allocation des ressources se réfère à la distribution des capacités réseau telles que la bande passante, la puissance de transmission et les canaux de fréquence aux utilisateurs et aux applications. [73]

- **Dynamic Spectrum Allocation (DSA) :** Il s'agit de l'attribution dynamique des bandes de fréquence en fonction des exigences en temps réel du réseau. Cette technique permet une utilisation plus efficace du spectre disponible, en allouant davantage de spectre aux zones de forte demande et en le réduisant dans les zones de moindre demande. [74]

- **Network Slicing :** La segmentation du réseau en tranches virtualisées qui peuvent être allouées à différents types d'applications et services. Chaque tranche de réseau peut être configurée avec des niveaux de QoS spécifiques, assurant une performance optimale pour chaque type de service, qu'il s'agisse de la VoIP, du streaming vidéo ou des applications industrielles critiques.

- **Power Control :** La gestion de la puissance de transmission pour optimiser l'utilisation des ressources et limiter les interférences entre les utilisateurs. Une gestion optimale de la puissance de transmission augmente l'efficacité énergétique et garantit une couverture réseau adéquate.

Planification :

La planification se concentre sur l'ordonnancement des transmissions de données afin de maximiser l'utilisation des ressources tout en respectant les exigences de QoS des différentes applications. [75]

- **Resource Scheduling :** L'assignation des ressources du réseau, comme les slots de temps sur OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), aux utilisateurs prioritaires, assurant ainsi que les applications critiques reçoivent le service nécessaire.

- **QoS-Aware Scheduling Algorithms :** Des algorithmes de planification qui tiennent compte de la classification QoS des différents types de trafic. Par exemple, le "Proportional Fair Scheduling" équilibre l'équité et l'efficacité en attribuant des ressources de manière proportionnelle à la demande et au canal de qualité de chaque utilisateur.

- **Latency Reduction Techniques :** Planifier les transmissions de manière à réduire les délais de bout en bout, en utilisant des techniques comme la "Pre-emptive Scheduling" qui permet de donner la priorité aux paquets de faible latence.

Avantages de l'Allocation des Ressources et de la Planification :

- **Performance Optimale :** En assurant une allocation efficace et une planification judicieuse des ressources, ces techniques permettent d'atteindre des performances réseau optimales, répondant ainsi aux exigences spécifiques des applications et des utilisateurs.

- **Efficacité Spectrale :** Une gestion efficace des ressources fréquence optimise l'utilisation du spectre disponible, augmentant ainsi la capacité du réseau sans nécessiter des bandes de fréquences supplémentaires.

- Amélioration de la QoS : Ces techniques réduisent la latence, la gigue, et la perte de paquets, et assurent une bande passante suffisante pour les applications critiques, améliorant ainsi la qualité de service pour l'utilisateur final.

- Économie d'Énergie : En optimisant l'utilisation des ressources et en gérant efficacement la puissance de transmission, il est possible de réduire la consommation d'énergie, ce qui est essentiel pour les réseaux durables et pour prolonger la durée de vie des appareils mobiles.

Applications dans les Réseaux 5G :

- Smart Cities : Dans les villes intelligentes, la gestion des ressources permet de prioriser le trafic des capteurs de surveillance de la ville ou des systèmes de gestion du trafic, assurant une réponse rapide et efficace aux incidents.

- Industrie 4.0 : Les environnements de production industriels bénéficient de l'allocation et de la planification des ressources pour assurer le fonctionnement fluide des robots et des machines connectées, réduisant ainsi les temps d'arrêt et augmentant la productivité.

- Santé Connectée : Dans les applications de télémédecine, il est crucial de garantir une allocation prioritaire des ressources pour les consultations à distance et l'envoi de données médicales en temps réel, assurant ainsi des soins de haute qualité aux patients. [76]

3.4.3 Edge Computing

Le edge computing est une solution novatrice visant à optimiser la qualité de service (QoS) dans les réseaux 5G en rapprochant les capacités de calcul et de traitement des données des utilisateurs finaux. Cette approche permet de réduire significativement la latence, d'améliorer la rapidité de traitement des données, et de fournir une réponse plus rapide aux applications et services critiques. [77]

Concepts de Base du Edge Computing :

Le edge computing, ou informatique en périphérie, consiste à traiter les données à proximité du point de génération plutôt que dans un centre de données centralisé. Cette approche s'oppose au modèle traditionnel de cloud computing, où les données sont envoyées à des centres de traitement éloignés. [78]

- Edge Nodes : Dispositifs ou petits centres de données déployés à proximité des utilisateurs finaux pour effectuer le traitement des données en local. Les edge nodes peuvent être des stations de base 5G, des routeurs, des passerelles IoT, ou des serveurs situés en bordure du réseau.

- Fog Computing : Une extension du edge computing qui inclut une couche d'infrastructure intermédiaire entre les utilisateurs finaux et les centres de données centralisés. Cette couche intermédiaire traite partiellement les données avant de les envoyer au cloud pour un traitement ultérieur si nécessaire. [78]

Avantages du Edge Computing :

- Réduction de la Latence : En traitant les données localement, le edge computing réduit la latence, car les données n'ont pas à parcourir de longues distances pour être traitées. Cette réduction des délais est cruciale pour les applications en temps réel comme la réalité augmentée (AR), la réalité virtuelle (VR), et les véhicules autonomes. [79]

- **Amélioration de la Résilience** : Les edge nodes peuvent continuer à fonctionner même en cas de panne de connexion avec le cloud central, offrant ainsi une plus grande résilience et une disponibilité continue des services.
- **Optimisation de la Bande Passante** : En limitant le volume de données transmises vers les centres de données centraux, le edge computing réduit la pression sur la bande passante du réseau et permet une utilisation plus efficace des ressources réseau.
- **Sécurité et Confidentialité** : Le traitement local des données peut améliorer la sécurité et la confidentialité en limitant l'exposition des données sensibles lors de leur transmission à travers le réseau.

Technologies et Protocoles Associés :

- **Edge AI (Intelligence Artificielle en Périphérie)** : L'intégration de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique dans les edge nodes permet de fournir des analyses et des décisions en temps réel, améliorant ainsi la réactivité des services.
- **5G NR (New Radio)** : Les capacités avancées de la 5G NR, telles que le Network Slicing et le Massive MIMO, sont essentielles pour supporter les exigences élevées en termes de latence et de bande passante du edge computing.
- **Containerization and Microservices** : L'utilisation de conteneurs et de microservices facilite la modularité et l'évolutivité des applications déployées sur les dispositifs edge, permettant une gestion plus flexible et un déploiement rapide de nouvelles fonctionnalités.

Applications du Edge Computing dans les Réseaux 5G :

- **Véhicules Autonomes** : Les véhicules autonomes nécessitent une prise de décision en temps réel basée sur l'analyse de grandes quantités de données provenant de capteurs. Le edge computing permet de traiter ces données directement à bord du véhicule ou à proximité, réduisant ainsi la latence et augmentant la sécurité routière.
- **Industrie 4.0** : Les environnements de production industrielle utilisant des robots, des capteurs et des systèmes de contrôle nécessitent une prise de décision rapide et fiable. Le edge computing permet de traiter les données en temps réel sur site, améliorant l'efficacité opérationnelle et réduisant les temps d'arrêt.
- **Smart Cities** : Les villes intelligentes utilisent des capteurs pour diverses applications telles que la gestion du trafic, la surveillance de l'environnement, et les services publics. Le edge computing permet de traiter ces données localement, offrant des réponses rapides et des services plus efficaces.
- **Télémédecine** : Dans le domaine de la santé connectée, le edge computing permet de traiter les données médicales sensibles à proximité du patient, améliorant ainsi la latence des intervalles de diagnostic et de traitement, tout en assurant une meilleure confidentialité. [76]

3.5 Conclusion

La qualité de service (QoS) dans les réseaux 5G est un domaine critique qui assure des performances optimales pour une variété d'applications et de services. En explorant les techniques de priorisation et de trafic shaping, l'allocation dynamique des ressources, la planification efficace et le edge computing, nous pouvons maximiser l'efficacité et la fiabilité des communications dans un environnement de plus

en plus connecté et exigeant.

La priorisation et le trafic shaping permettent de gérer le trafic réseau de manière à satisfaire les besoins des applications critiques, réduisant la latence et la gigue tout en évitant la congestion. Ces techniques garantissent que les services prioritaires reçoivent les ressources nécessaires pour fonctionner de manière optimale.

L'allocation des ressources et la planification sont essentielles pour une utilisation efficace des capacités réseau. Le Dynamic Spectrum Allocation (DSA), le Network Slicing, et les algorithmes avancés de planification assurent que les ressources sont distribuées en fonction des besoins réels des utilisateurs et des applications. Ces méthodes permettent de maintenir une haute qualité de service tout en optimisant l'utilisation de la bande passante et en augmentant l'efficacité énergétique.

Le edge computing révolutionne la façon dont les données sont traitées en rapprochant le calcul et le stockage des utilisateurs finaux. Cette approche réduit la latence, augmente la rapidité de traitement et améliore la sécurité et la confidentialité des données. Les applications variées du edge computing, telles que les véhicules autonomes, les smart cities et l'industrie 4.0, illustrent son potentiel à transformer divers secteurs en facilitant des réponses plus rapides et plus fiables.

En résumé, l'intégration de ces techniques d'optimisation de la QoS dans les réseaux 5G est cruciale pour répondre aux exigences croissantes des utilisateurs et des applications modernes. La compréhension et l'amélioration continue des mécanismes de priorisation, de trafic shaping, d'allocation des ressources et de edge computing ouvriront la voie à une infrastructure réseau plus robuste, efficace et avant-gardiste, capable de soutenir l'évolution rapide de la technologie et des services connectés.

Chapitre 4

Simulations d'Optimisation pour Améliorer la QoS

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur l'optimisation de la qualité de service (QoS) dans un réseau 5G en milieu rural. Nous considérons une zone de couverture avec une station de base (SB) et plusieurs utilisateurs (EU). L'objectif est d'optimiser trois indicateurs clés de performance : le débit, la latence et la fiabilité de la connexion. Pour ce faire, nous utilisons MATLAB et la fonction d'optimisation génétique (GA). Les paramètres pris en compte sont la distance, la charge du réseau et le rapport signal sur bruit (SNR).

4.2 Analyse des Performances

Dans cette section, nous analysons les relations entre les principaux paramètres de performance du réseau 5G : le débit, la latence et la fiabilité de la connexion, en fonction de la distance entre les utilisateurs (UE) et la station de base (BS), du rapport signal sur bruit (SNR) et de la charge du réseau.

1. Le débit (D) : est influencé par plusieurs facteurs, notamment la distance (d), le SNR (S), et la charge du réseau (C). La relation mathématique peut être approximée par une équation de la forme :

$$D = f(d, S, C) \tag{4.1}$$

tel que d est la distance, à mesure que la distance entre l'UE et la BS augmente, le débit diminue en raison de l'affaiblissement du signal, décrit généralement par une loi de puissance inverse. S est le SNR, un SNR élevé est corrélé à un débit plus élevé, car il indique un signal fort par rapport au bruit de fond, permettant une transmission de données plus rapide et fiable. C est Charge du Réseau, une charge élevée du réseau peut réduire le débit disponible pour chaque utilisateur, car les ressources sont partagées entre un plus grand nombre d'utilisateurs et d'applications.

2. La latence moyenne (L) représente le temps écoulé entre l'envoi et la réception des données. Sa relation avec les paramètres du réseau peut être modélisée par :

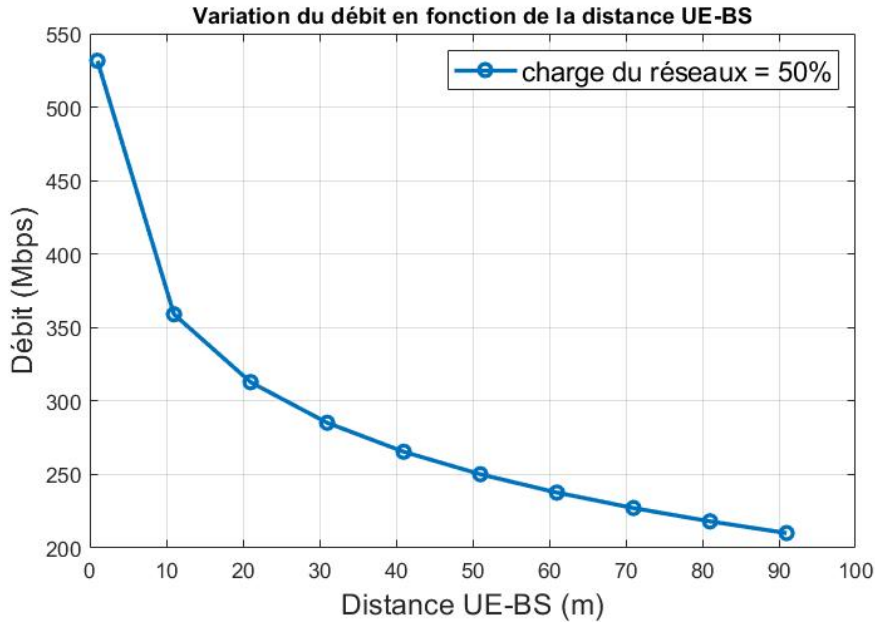


FIGURE 4.1 – Débit vs Distance

$$L = g(d, S, C) \quad (4.2)$$

Tel que une distance plus grande augmente généralement la latence, car le signal prend plus de temps à parcourir la distance entre l'UE et la BS. Un SNR plus élevé réduit les erreurs de transmission, ce qui peut contribuer à réduire la latence en assurant une communication plus fiable et rapide. De plus, d'une charge élevée peut augmenter la latence en raison de la congestion du réseau et des files d'attente plus longues pour le traitement des données.

3. La fiabilité de la connexion (R) mesure la probabilité que les données soient transmises avec succès sans erreur. Elle peut être liée aux paramètres du réseau comme suit :

$$R = h(d, S, C) \quad (4.3)$$

Tel que quand la distance augmente, la fiabilité peut diminuer en raison d'un affaiblissement du signal et d'une augmentation des pertes de transmission. Aussi, un SNR élevé améliore la fiabilité en réduisant les erreurs de transmission et en augmentant la robustesse du signal face au bruit. Une charge élevée peut réduire la fiabilité en augmentant les collisions de données et en surchargeant les ressources du réseau, conduisant à des pertes de paquets.

La figure 4.1, montre la relation entre le débit (en Mbps) et la distance (en m) entre les utilisateurs et la station de base. On observe que le débit diminue à mesure que la distance augmente. Cela s'explique par l'affaiblissement du signal sur de plus grandes distances, dû à la perte de propagation et aux interférences. Lorsque les utilisateurs sont proches de la station de base, le signal est fort, permettant un débit élevé. À mesure que la distance augmente, le signal faiblit et le débit diminue. Cette relation souligne l'importance de la distance dans l'optimisation des réseaux 5G pour maximiser la QoS.

4.3 Résultats Numériques

Fig 4.2, illustre la latence moyenne (en ms) augmente avec la charge du réseau (en pourcentage). Lorsque la charge est faible, la latence reste basse, permettant une réponse rapide aux demandes de

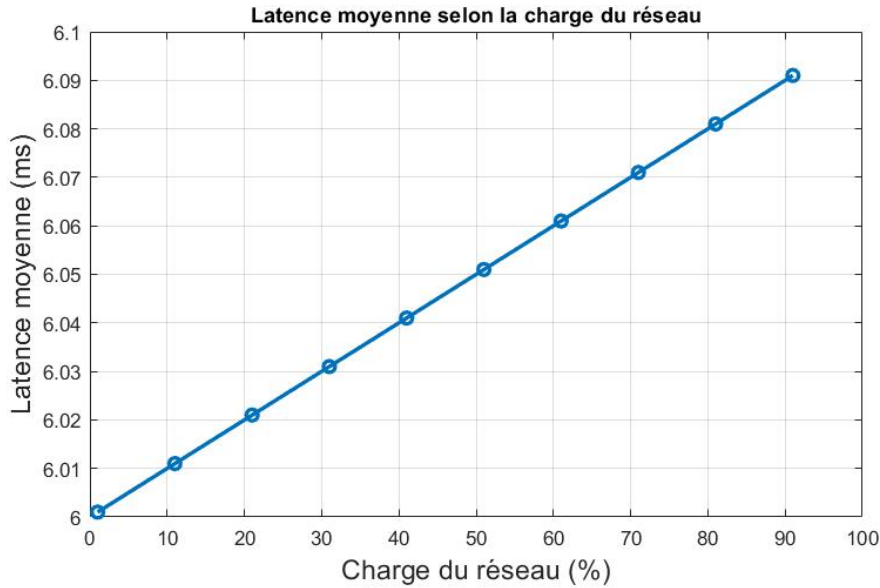


FIGURE 4.2 – Latence Moyenne vs Charge du Réseau

données. Cependant, à mesure que la charge augmente, la congestion du réseau cause des délais plus longs, car les ressources deviennent insuffisantes pour traiter toutes les demandes instantanément. Cette augmentation de la latence affecte négativement l'expérience utilisateur, rendant les applications interactives moins réactives, augmentant les temps de mise en mémoire tampon pour le streaming, et réduisant la productivité des applications professionnelles. Pour maintenir une faible latence, il est crucial de gérer efficacement la charge du réseau en augmentant sa capacité et en optimisant la gestion du trafic et l'allocation des ressources.

Fig 4.3, présente la relation entre la fiabilité de la connexion (en pourcentage) et le rapport signal sur bruit (SNR, en dB). La fiabilité de la connexion est une mesure de la capacité du réseau à maintenir une connexion stable et sans interruption. Un SNR plus élevé indique un signal plus fort par rapport au bruit de fond, ce qui améliore la qualité de la communication. À mesure que le SNR augmente, la fiabilité de la connexion s'améliore également, car un signal plus clair et plus distinct réduit les erreurs de transmission et les pertes de données. Cette relation est essentielle pour les performances du réseau, car une fiabilité accrue signifie moins de déconnexions, une meilleure qualité des appels et des transmissions de données plus robustes. En optimisant le SNR, les opérateurs de réseau peuvent offrir une expérience utilisateur plus stable et plus satisfaisante.

4.3.1 Optimisation par Algorithme Génétique (GA)

L'optimisation des paramètres du réseau est réalisée en utilisant la fonction d'optimisation génétique (GA) de MATLAB. L'algorithme génétique est une méthode d'optimisation basée sur la sélection naturelle, où les solutions potentielles sont traitées comme des individus d'une population. Ces individus subissent des processus similaires à la sélection, le croisement et la mutation pour produire des générations successives d'individus, chaque génération tendant à s'améliorer par rapport à la précédente.

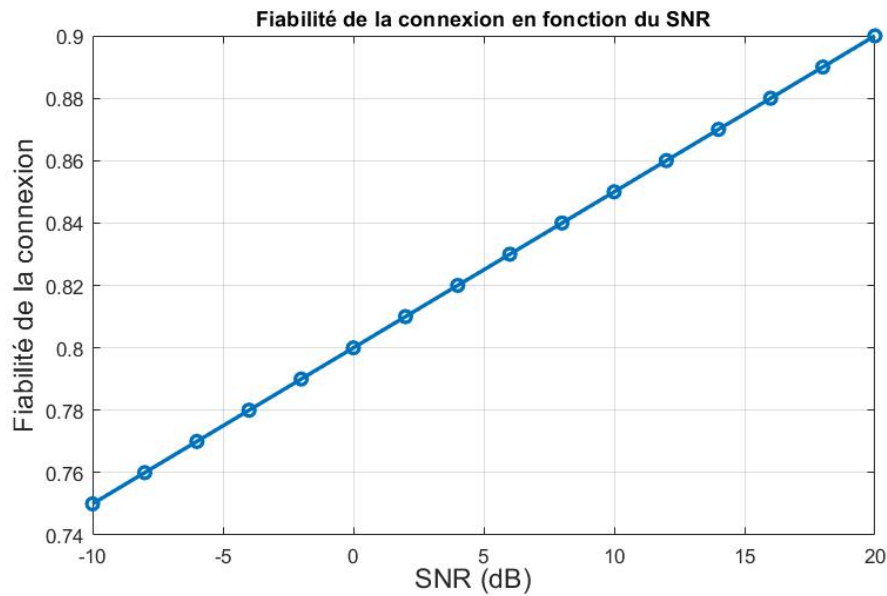


FIGURE 4.3 – Fiabilité de la Connexion vs SNR

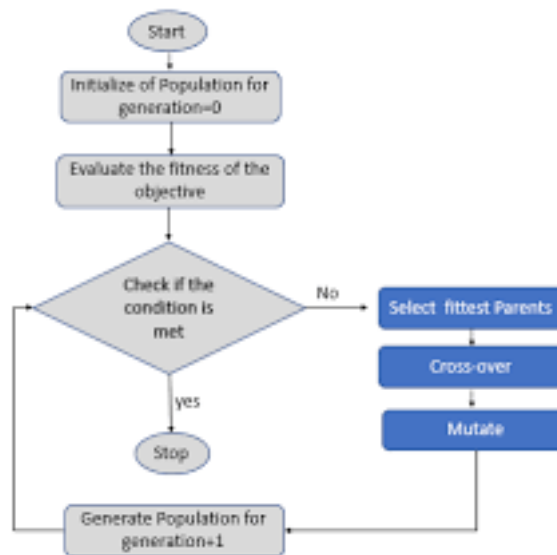


FIGURE 4.4 – genetic Algorithm optimisation [80]

4.3.2 Définition de l'Algorithme Génétique

L'algorithme génétique (GA) est une méthode d'optimisation heuristique inspirée par le processus de sélection naturelle des organismes biologiques. Les principales étapes de l'algorithme incluent (vue Fig 4 .4) :

- Initialisation : Création d'une population initiale de solutions potentielles.
- Évaluation : Calcul de la fonction objectif pour chaque individu de la population.
- Sélection : Choix des individus les plus aptes pour reproduire.
- Croisement (Crossover) : Combinaison de paires d'individus pour créer une nouvelle génération.
- Mutation : Modification aléatoire de certains individus pour maintenir la diversité génétique.
- Remplacement : Substitution de la population actuelle par la nouvelle génération.

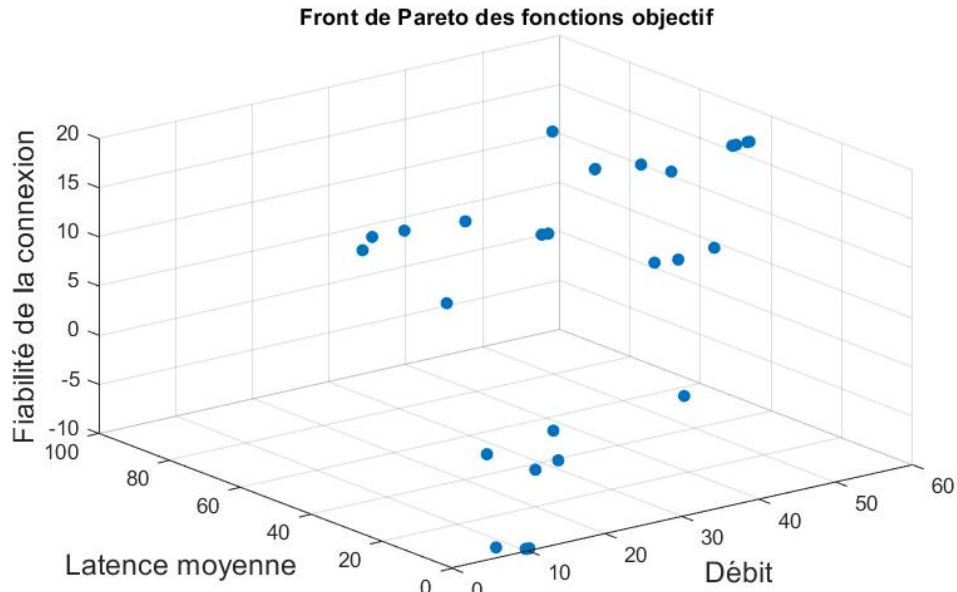


FIGURE 4.5 – optimisation des paramètres

4.3.3 Mise en Œuvre de l'Optimisation

Pour optimiser les valeurs de débit, de latence et de fiabilité, nous définissons les trois paramètres d'entrée : la distance, la charge du réseau et le SNR. La fonction objectif est construite pour maximiser le débit et la fiabilité, tout en minimisant la latence.

La figure 4.5 illustre l'optimisation en trois dimensions utilisant l'algorithme génétique (GA). Cette représentation montre comment les valeurs optimales de débit, de latence moyenne et de fiabilité de la connexion sont obtenues en fonction des paramètres de distance, de charge du réseau et de SNR.

Après l'optimisation, les valeurs optimales des paramètres sont obtenues. Les résultats montrent une amélioration significative du débit, une réduction de la latence et une augmentation de la fiabilité de la connexion. Les paramètres optimaux trouvés sont les suivants :

- Distance UE-BS : 5 km
- Charge du réseau (%) : 10.2841
- SNR (dB) : 50.453

Les valeurs de la fonction objectif à la solution optimale sont les suivantes :

- Débit : 745.7981 Mbps
- Latence moyenne : 15.1462 ms
- Fiabilité de la connexion : 1.0523

Ces résultats indiquent que la distance optimale entre les utilisateurs (UE) et la station de base (BS) est de 5 km, avec une charge de réseau de 10.2841 et un rapport signal sur bruit (SNR) de 50.453 dB. Cette configuration maximise le débit, minimise la latence moyenne et améliore la fiabilité de la connexion, démontrant ainsi l'efficacité de l'algorithme génétique dans l'optimisation des performances du réseau 5G pour une meilleure qualité de service (QoS).

4.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté une méthode pour optimiser la QoS dans un réseau 5G rural en utilisant des simulations MATLAB et la fonction d'optimisation génétique. Les figures illustratives ont montré les relations entre les paramètres critiques, et l'optimisation a permis d'identifier les configurations optimales pour améliorer le débit, réduire la latence et augmenter la fiabilité de la connexion. Cette approche peut être étendue et adaptée à d'autres scénarios de réseau pour continuer à améliorer les performances et l'expérience utilisateur.

Conclusion Générale

La cinquième génération de réseaux mobiles, communément appelée 5G, représente une avancée majeure dans le domaine des communications sans fil. Elle se distingue par des vitesses de transmission de données ultra-rapides, une latence extrêmement faible et une connectivité fiable, répondant ainsi aux besoins croissants d'applications et de services variés tels que l'Internet des objets (IoT), les véhicules autonomes, la réalité augmentée, et bien d'autres technologies émergentes.

Cette thèse a exploré en profondeur la qualité de service (QoS) dans les réseaux 5G, en mettant en évidence les défis et les solutions potentielles pour garantir des performances optimales. Les principaux résultats et contributions de cette étude peuvent être résumés comme suit :

1. État de l'art des Réseaux Cellulaires :

Une rétrospective des générations précédentes, de la 1G à la 4G, a permis de comprendre les limitations et les besoins non satisfaits qui ont conduit au développement de la 5G. Caractéristiques Techniques de la 5G :

La 5G introduit de nouvelles architectures réseau et des technologies d'accès radio qui améliorent significativement le débit, réduisent la latence et augmentent la capacité du réseau.

2. Qualité de Service (QoS) dans la 5G :

Les différents facteurs influençant la QoS ont été analysés, ainsi que les mécanismes de gestion de la QoS. Les défis spécifiques posés par les nouvelles applications et services ont été mis en lumière, soulignant comment la 5G répond à ces exigences.

3. Qualité de Service (QoS) dans la 5G :

Les différents facteurs influençant la QoS ont été analysés, ainsi que les mécanismes de gestion de la QoS. Les défis spécifiques posés par les nouvelles applications et services ont été mis en lumière, soulignant comment la 5G répond à ces exigences.

4. Méthodologies et Outils pour Améliorer la QoS :

Des simulations réalisées avec MATLAB ont permis d'évaluer et d'améliorer la QoS. L'utilisation de l'algorithme génétique (GA) a été particulièrement efficace pour optimiser les paramètres réseaux

- Résultats Clés : Les simulations ont montré que la distance optimale entre les utilisateurs (UE) et la station de base (BS) est de 5 km, avec une charge de réseau de 10.2841 et un rapport signal sur bruit (SNR) de 50.453 dB. Cette configuration maximise le débit, minimise la latence moyenne et améliore la fiabilité de la connexion, démontrant ainsi l'efficacité de l'algorithme génétique dans l'optimisation des performances du réseau 5G pour une meilleure QoS.

Implications et Perspectives Ces résultats ont des implications importantes pour le déploiement futur des réseaux 5G. En optimisant les paramètres critiques, les opérateurs de réseaux peuvent améliorer significativement la qualité de service, même dans des environnements complexes comme les zones rurales. L'approche adoptée dans cette thèse peut être étendue à d'autres contextes et configurations de réseau, offrant ainsi une base solide pour des études futures et des développements pratiques dans le domaine des télécommunications.

Recommandations pour les Travaux Futurs Exploration de Nouvelles Techniques d'Optimisation : Bien que l'algorithme génétique ait montré son efficacité, d'autres techniques d'optimisation,

telles que les réseaux neuronaux et l'apprentissage machine, pourraient offrir des améliorations supplémentaires.

- Études Comparatives : Il serait bénéfique de comparer les performances des optimisations de la 5G dans divers environnements, urbains et ruraux, pour identifier les meilleures pratiques spécifiques à chaque contexte.
- Déploiement à Grande Échelle : Les résultats de cette thèse pourraient être testés et validés dans des déploiements à grande échelle pour vérifier leur applicabilité pratique et leur efficacité dans des conditions réelles.

En conclusion, cette thèse apporte une contribution importante à la compréhension et à l'amélioration de la qualité de service dans les réseaux 5G. Les techniques d'optimisation développées ici sont un pas important vers la réalisation du potentiel de la 5G, en assurant des services de haute qualité et en répondant aux attentes des utilisateurs dans un monde de plus en plus connecté. Les perspectives ouvertes par cette recherche promettent de nouvelles avancées et innovations dans le domaine des télécommunications.

Bibliographie

- [1] Niranjan Lal, Shobhit Mani Tiwari, Devbrat Khare, and Megha Saxena. Prospects for handling 5g network security : Challenges, recommendations and future directions. In *Journal of Physics : Conference Series*, volume 1714, page 012052. IOP Publishing, 2021.
- [2] M Series. Int vision–framework and overall objectives of the future development of int for 2020 and beyond. *Recommendation ITU*, 2083(0), 2015.
- [3] Eric Meurisse. L’umts et le haut-débit mobile. *L’Université de Marne-la-Vallée, en filière Informatique et Réseau*, 2007.
- [4] B Selon. Tremblais (communication personnelle [support de cours], 2011). *Principes de fonctionnement des réseaux mobiles : Application au GSM*.
- [5] Khireddine Melal. *Analyse des méthodes d’égalisation des techniques CDMA*. PhD thesis, Université de Batna 2, 2008.
- [6] uomustansiriyah.edu.iq. https://uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/5/5_2022_01_08!04_30_36_PM.pdf. [Accessed 14-06-2024].
- [7] Mlle BEKKAYE Chaima and Mlle HASNAOUI Sara. Allocation de ressources avec l’agrégation de porteuses dans la norme lte-a.
- [8] Assia BEN ELHADJ DJELLOUL et al. *Qualité de service (QoS) dans les réseaux mobiles 4G*. PhD thesis, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, 2016.
- [9] Yannick Bouguen, Eric Hardouin, and François-Xavier Wolff. *LTE pour les reseaux 4G*. Editions Eyrolles, 2012.
- [10] Elaboré Par. La liberalisation des telecommunications et marche des technologies de l’information et de la communication : Etude comparative entre l’algerie, la tunisie et le maroc.
- [11] AMRAOUI ZAKARIA ALLEL MONCEF. Conception de nouveau système d’antennes mimo pour le standard 5g. 2021.
- [12] Khalil Ibrahim. *Gestion des ressources des réseaux mobiles de nouvelle génération par rapport à la mobilité des utilisateurs*. PhD thesis, Université d’Avignon, 2009.
- [13] Encadreur F NAFAA MCB UMBB and Président KH HARAR MCB UMBB. Contribution à l’optimisation d’un réseau lte : Adaptation du handover.
- [14] Jean-Pierre DAMIANO. De la 5g à la 6g : contexte et enjeux ! 2020.
- [15] Philippe Follenfant, JM Nataf, P Aballea, LC Viossat, FM Robineau, H Havard, B Legait, CA Calvet, V Menuet, and P Distler. Déploiement de la 5g en france et dans le monde : aspects techniques et sanitaires. *Rapport de l’Inspection générale des affaires sociales, Paris*, 2020.
- [16] Afif Osseiran, Jose F Monserrat, and Patrick Marsch. *5G mobile and wireless communications technology*. Cambridge University Press, 2016.

- [17] Amal BOURMADA. *Vers une approche cross layer pour le support de la QoS dans les Réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université de Batna 2, 2017.
- [18] Olumide Alamu, Babatunde Iyaomolere, and Abdulfatai Abdulrahman. An overview of massive mimo localization techniques in wireless cellular networks : Recent advances and outlook. *Ad Hoc Networks*, 111 :102353, 2021.
- [19] Xiaohu Ge, Song Tu, Guoqiang Mao, Cheng-Xiang Wang, and Tao Han. 5g ultra-dense cellular networks. *IEEE wireless communications*, 23(1) :72–79, 2016.
- [20] Qu'est-ce que la 5G? | Juniper Networks — juniper.net. <https://www.juniper.net/fr/fr/research-topics/what-is-5g.html>. [Accessed 03-07-2024].
- [21] Mansoor Shafi, Andreas F Molisch, Peter J Smith, Thomas Haustein, Peiying Zhu, Prasan De Silva, Fredrik Tufvesson, Anass Benjebbour, and Gerhard Wunder. 5g : A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice. *IEEE journal on selected areas in communications*, 35(6) :1201–1221, 2017.
- [22] Scott Thornton. The impacts of 5G on the future : a new era of connectivity — 5gtechnologyworld.com. <https://www.5gtechnologyworld.com/the-impacts-of-5g-on-the-future-a-new-era-of-connectivity/>. [Accessed 18-06-2024].
- [23] Boyd Bangerter, Shilpa Talwar, Reza Arefi, and Ken Stewart. Networks and devices for the 5g era. *IEEE Communications Magazine*, 52(2) :90–96, 2014.
- [24] Comment tester la l'ultra-fiabilité et la faible latence des réseaux 5G selon les exigences de l'URLLC? • Actutem — actutem.com. <https://www.actutem.com/comment-tester-la-lutra-fiabilite-et-la-faible-latence-des-reseaux-5g-selon-les-exigences-> [Accessed 14-06-2024].
- [25] contact@cyber-cover.fr CYBER COVER. 5G : quels sont les enjeux de cybersécurité? — cyber-cover.fr. <https://www.cyber-cover.fr/cyber-documentation/cyber-securite/quels-sont-les-veritables-enjeux-de-cybersecurite-poses-par-larrivee-de-la-5g>. [Accessed 14-06-2024].
- [26] Mr Kais Ameer and Mme Soumaya Hamouda FSB. Etude des scénarios de clustering des réseaux 4g de tt pour la migration vers une architecture 5g cloud-ran.
- [27] Jonatan Langlet. Offloading virtual network functions—hierarchical approach, 2020.
- [28] <https://forum.huawei.com/enterprise/fr/Introduction-À-la-5G-PrÃsentation-de-l-interface-5-thread/667499477457584128-667480998079770624>. [Accessed 30-05-2024].
- [29] BOUHAFER ASMA DEHEMCHI MARWA. Etude et analyse de méthode s de beamforming pour des systèmes m ulti-utilisateur s pour la 5g. 2019.
- [30] Condoluci, Gallo, Mussot, Apostolos Kousaridas, Spapis, Mahlouji, and Toktam Mahmoodi. 5g v2x system-level architecture of 5gcar project. *Future Internet*, 11 :217, 10 2019.
- [31] Soumia BENARIBA and Meryem Mamia BENOSMAN. *Etude et implémentation de Handover intra-LTE basé sur une architecture femtocellules*. PhD thesis, 2018.
- [32] Emine Moutaly. *Etude d'une architecture radio-sur-fibre pour le fronthaul 5G*. PhD thesis, Université Paris-Est ; Université de Nouakchott, 2019.
- [33] Éric Mayeul Olusegun Fafolahan. *Gestion de la mobilité dans les réseaux denses de cinquième génération (5G)*. PhD thesis, Ecole Polytechnique, Montreal (Canada), 2019.

- [34] Mohamed Amine OUAMRI. *Optimisation du réseau de téléphonie mobile pour une couverture maximale d'une région urbaine*. PhD thesis, Université de Béjaia-Abderrahmane Mira.
- [35] Priya Babel, Mr Anup Kumar Bhola, and DCK Jha. Delay and throughput comparison between hard handover and soft handover by varying the speed in mobile wimax. *International Journal of Research*, 2(4) :742–746, 2015.
- [36] Gueziz Safia. *Contribution à la simulation et l'émulation des Réseaux sans fil de dernière génération*. PhD thesis, Université KASDI MERBAH Ouargla.
- [37] K. KABORE et J. L. PEREIRA. Etude de passage de la 4g vers la 5g. *Revue Scientifique et Technique de l'Ingénieur*, 22(1) :p. 25–34, 2021.
- [38] Ilham Salhane and Mounir Rifi. La technologie 5g pour les objets connectés. In *Colloque sur les Objets et systèmes Connectés-COC'2021*, 2021.
- [39] Balazs Bertenyi, Satoshi Nagata, Havish Kooropaty, Xutao Zhou, Wanshi Chen, Younsun Kim, Xizeng Dai, and Xiaodong Xu. 5g nr radio interface. *Journal of ICT Standardization*, 6(1-2) :31–58, 2018.
- [40] Author. 5G NR Terminologies - Subcarrier Spacing, Fram-Subframe, Slot and Symbol - Techplayon — techplayon.com. <https://www.techplayon.com/understanding-basic-5g-nr-terminologies-subcarrier-spacing-frame-and-subframe-slot-and-ofdm> [Accessed 27-05-2024].
- [41] Gaurav Singh Baghel, M. V. Swati, and Sourav Ghosh. *MIMO Antennas : A 5G Communication Perspective*, pages 1–19. Springer Singapore, Singapore, 2021.
- [42] W. Dou K. Daci. *Etude de massive MIMO pour 5G*. PhD thesis, université echahid hamma lakhdarel-oued, 2019.
- [43] YOUSFI Hamza ABDAT Belarbi. Simulation d'un système de communication numérique multi-antennes, multi-accès et multi-posystème de quatrièmerteuses pour un génération (4g). 2018.
- [44] Amal Amyar. Conception et analyse d'une antenne mimo fractal 4x4 pour les applications ulb. 2022.
- [45] Emil Björnson, Mats Bengtsson, and Björn Ottersten. Optimal multiuser transmit beamforming : A difficult problem with a simple solution structure [lecture notes]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 31(4) :142–148, 2014.
- [46] LOS vs NLOS | Difference between LOS and NLOS wireless channels — rfwireless-world.com. <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/LOS-vs-NLOS-wireless-channel.html>. [Accessed 26-05-2024].
- [47] Navuday Sharma, Maurizio Magarini, L. Dossi, Luca Reggiani, and Roberto Nebuloni. A study of channel model parameters for aerial base stations at 2.4 ghz in different environments. 01 2018.
- [48] <https://www.techopedia.com/definition/5077/non-line-of-sight-nlos>. [Accessed 26-05-2024].
- [49] Fouad Aknouche, Housseem Eddine Djema, and Sofiane Encadreur Haddad. *Optimisation de l'allocation de puissance pour un système MIMO-NOMA dans les communications par la lumière visible*. PhD thesis, Université de Jijel, 2023.
- [50] Marcelo S Alencar, Valdemar C da Rocha Jr, Marcelo S Alencar, and Valdemar C da Rocha Jr. Propagation channels. *Communication Systems*, pages 207–235, 2020.

- [51] Kadri Zahia, Dib Souad, and Mezhoud Naima. Techniques de positionnement dans le réseau 5g. Master's thesis, Université Abderrahmane Mira - Bejaia, 2020.
- [52] https://www.researchgate.net/post/what_is_the_difference_between_nakagami-m_and_general_fading. [Accessed 29-05-2024].
- [53] A Andriamanalina. Modélisation des différents canaux des systèmes de communication numérique, 2010.
- [54] Dat-Duong Phan. *Contrôle de la puissance pour les réseaux sans fil*. PhD thesis, Université de Poitiers, 2014.
- [55] Signal-to-interference-plus-noise ratio - Wikipedia — en.wikipedia.org. https://en.wikipedia.org/wiki/Signal-to-interference-plus-noise_ratio. [Accessed 04-06-2024].
- [56] Hesham ElSawy and Ekram Hossain. Two-tier hetnets with cognitive femtocells : Downlink performance modeling and analysis in a multichannel environment. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 13(3) :649–663, 2013.
- [57] Ye Geoffrey Li and Gordon L Stuber. *Orthogonal frequency division multiplexing for wireless communications*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [58] Guillaume Villemaud. *Les communications multi-* : contribution au développement d'architectures radio flexibles pour les réseaux sans fil hétérogènes*. PhD thesis, 12 2013.
- [59] Mahmoud Aldababsa, Mesut Toka, Selahattin Gökçeli, Güneş Karabulut Kurt, Oğuz Kucur, et al. A tutorial on nonorthogonal multiple access for 5g and beyond. *Wireless communications and mobile computing*, 2018, 2018.
- [60] Belmien Carlos Talla, Olivier Bossou, Cyrille Feudjio, Joseph Mbogue, Gédéon Ngoufo, and Roger Tchuidjan. A new approach of successive interference cancellation decoder in power domain non-orthogonal multiple access transmission. *Wireless Networks*, 29 :1–13, 10 2022.
- [61] Refik Caglar Kizilirmak and Hossein Khaleghi Bizaki. Non-orthogonal multiple access (noma) for 5g networks. *Towards 5G Wireless Networks-A Physical Layer Perspective*, 83 :83–98, 2016.
- [62] S Markkandan, Kapil Aggarwal, Ashok Kuruppath, K Selvakumarasamy, Rajanish Kaushal, and Makarand Jadhav. Design of precoder for a mimo-noma system using gaussian mixture modelling. *Optical and Quantum Electronics*, 56, 12 2023.
- [63] Dang-Quan Nguyen and Pascale Minet. Quality of service routing in a manet with olsr. *J. Univers. Comput. Sci.*, 13(1) :56–86, 2007.
- [64] Mohamad Hamze. *Autonomie, sécurité et QoS de bout en bout dans un environnement de Cloud Computing*. PhD thesis, Université de Bourgogne, 2015.
- [65] Francois Le Faucheur, Liwen Wu, Bruce Davie, Shahram Davari, Pasi Vaananen, Ram Krishnan, Pierrick Cheval, and Juha Heinanen. Multi-protocol label switching (mpls) support of differentiated services. Technical report, 2002.
- [66] Claude Chaudet. *Qualité de service et réseaux ad-hoc-un état de l'art*. PhD thesis, INRIA, 2001.
- [67] Leila Boukhalfa. *Prise en compte de la qualité de service dans les réseaux mobiles ad-hoc*. PhD thesis, Paris 12, 2006.
- [68] Ronald Beaubrun and Badji Molo. Évaluation du délai dans un réseau mobile ad hoc multi-services. In *2008 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, pages 000251–000256. IEEE, 2008.

- [69] Fabrice Theoleyre. Une auto-organisation et ses applications pour les réseaux ad hoc et hybrides. *Lion*, 2006.
- [70] Jean Walrand. A concise tutorial on traffic shaping and scheduling in time-sensitive networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2023.
- [71] Adel A Ahmed, Sharaf J Malebary, Waleed Ali, and Omar M Barukab. Smart traffic shaping based on distributed reinforcement learning for multimedia streaming over 5g-vanet communication technology. *Mathematics*, 11(3) :700, 2023.
- [72] Jie Li, Cong Zhang, Zhi Liu, Richang Hong, and Han Hu. Optimal volumetric video streaming with hybrid saliency based tiling. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2022.
- [73] Alaa Daoud, Flavien Balbo, Paolo Gianessi, and Gauthier Picard. Av-olra : Une modélisation générique pour le problème de l'allocation des ressources dans le domaine du transport à la demande. *Revue Ouverte d'Intelligence Artificielle*, 4(2) :169–192, 2023.
- [74] Haixing Wu, Shunfu Jin, and Wuyi Yue. Pricing policy for a dynamic spectrum allocation scheme with batch requests and impatient packets in cognitive radio networks. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 31(2) :133–149, 2022.
- [75] Francisco Hugo Costa Neto, Emanuel Bezerra Rodrigues, Diego Aguiar Sousa, Tarcisio Ferreira Maciel, and Francisco Rodrigo Porto Cavalcanti. Qos-aware scheduling algorithms to enhance user satisfaction in ofdma systems. *Transactions on emerging telecommunications technologies*, 28(10) :e3165, 2017.
- [76] Jürgen Fritz. Industrie 4.0 durch künstliche intelligenz : Daten als grundlage für die moderne fertigung. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 117(5) :344–348, 2022.
- [77] Zhaolong Ning, Yuxuan Yang, Xiaojie Wang, Lei Guo, Xinbo Gao, Song Guo, and Guoyin Wang. Dynamic computation offloading and server deployment for uav-enabled multi-access edge computing. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 22(5) :2628–2644, 2021.
- [78] Weisong Shi, Jie Cao, Quan Zhang, Youhuizi Li, and Lanyu Xu. Edge computing : Vision and challenges. *IEEE internet of things journal*, 3(5) :637–646, 2016.
- [79] Chiraag Juvekar, Vinod Vaikuntanathan, and Anantha Chandrakasan. {GAZELLE} : A low latency framework for secure neural network inference. In *27th USENIX security symposium (USENIX security 18)*, pages 1651–1669, 2018.
- [80] Abadal Salam T Hussain, Muhammed K Jarjes, and Syed F Ahmed. Pid controller optimization using genetic algorithm based zeta converter application. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9(4) :558–562, 2020.
- [81] Raed Abduljabbar Aljiznawi, Naseer Hwaidi Alkhazaali, Saba Qasim Jabbar, and Dheyaa Jasim Kadhim. Quality of service (qos) for 5g networks. *International Journal of Future Computer and Communication*, 6(1) :27, 2017.
- [82] John G Proakis and Masoud Salehi. *Digital communications*. McGraw-hill, 2008.