

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur

UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA
Faculté des Science
Département d'Informatique



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Pour l'obtention

Du Diplôme de Master en Informatique

Option : Systèmes Informatiques et Réseaux

THÈME

L'Évaluation et la Simulation de la 5G NR en milieu urbain

Présenté par :

Lekhal Meriem
Kessali Abderrezak

Promoteur : DR.Benyahia Mohamed

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciements

Au seuil de ce mémoire, il nous est agréable de nous acquitter d’une dette de reconnaissance envers tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l’aboutissement de ce travail. Nos premiers remerciements vont à Allah, pour la volonté et la persévérance qu’Il nous a accordées.

Nous tenons à exprimer notre plus profonde gratitude à notre directeur de thèse, le professeur **BENYAHIA**. Nous le remercions pour la confiance qu’il nous a témoignée, pour la qualité de son encadrement, ainsi que pour sa grande patience et sa disponibilité. Ses conseils avisés et sa rigueur scientifique ont été un guide précieux pour mener à bien cette recherche.

Nous remercions également **les membres du jury** d’avoir accepté d’évaluer notre travail et pour le temps qu’ils consacreront à sa lecture.

Notre reconnaissance s’étend à nos chères familles, pour leur amour, leurs sacrifices, leur soutien moral et matériel indéfectible, et pour leurs prières qui nous ont accompagnés tout au long de ce parcours.

Enfin, nous n’oublions pas nos amis et collègues pour leur amitié, leur soutien moral et les moments de détente qui ont rendu cette aventure plus agréable.

ملخص

يهدف دراسة أداء تقنية الجيل الخامس للراديو الجديد (5G NR) في سياق لا تزال فيه الخدمة غير متاحة تجارياً، يقدم هذا العمل تقييماً قائماً على المحاكاة باستخدام برنامج NS-3. نقوم بنمذجة بنية الجيل الخامس غير المستقلة (NSA) حيث يتم توصيل راديو الجيل الخامس بشبكة الجيل الرابع الأساسية (EPC). الهدف الرئيسي هو مقارنة أداء نطاق التردد الرئيسيين للجيل الخامس: الموجات المليمترية (mmWave) والنطاقات تحت 6 جيجاهرتز (Sub-6GHz). تم إجراء محاكاة لعدة سيناريوهات لتحليل مؤشرات الأداء الرئيسية مثل الإنتاجية (Débit)، وزمن الاستجابة (Latence)، والموثوقية (Fiabilité) في بيئة حضرية واقعية. تؤكد نتائجنا أن تقنية mmWave تسمح بالوصول إلى معدلات نقل بيانات عالية جداً ولكن على حساب المدى وقدرة اختراق الحواجز. في المقابل، توفر تقنية Sub-6GHz تغطية أوسع وأكثر استقراراً. تتيح هذه الدراسة قياس المكاسب التي تقدمها تقنية 5G NR على مستوى الواجهة الراديوية، كما تسلط الضوء على القيود الملزمة لاستخدام شبكة الجيل الرابع الأساسية للخدمات المتقدمة للجيل الخامس.

الكلمات المفتاحية: الجيل الخامس للراديو الجديد (5G NR)، الموجات المليمترية (mmWave)، نطاقات التردد تحت 6 جيجاهرتز (Sub-6GHz)، محاكاة الشبكات، NS-3، تقييم الأداء، الإنتاجية، زمن الاستجابة، الموثوقية، بيئة حضرية، بنية غير مستقلة (NSA).

Abstract

In order to study the performance of 5G New Radio (NR) in a context where the service is not yet commercially available, this work presents an evaluation based on simulation using NS-3. We model a 5G Non-Standalone (NSA) architecture where the 5G radio is connected to an existing 4G Evolved Packet Core (EPC). The main objective is to compare the performance of the two key 5G frequency bands : millimeter wave (mmWave) and Sub-6GHz. Several scenarios were simulated to analyze key performance indicators such as throughput, latency, and reliability in a realistic urban environment. Our results confirm that mmWave technology can achieve very high data rates, but at the cost of range and obstacle penetration. Sub-6GHz technology, on the other hand, offers more extensive and stable coverage. This study quantifies the gains provided by 5G NR at the radio interface level and highlights the inherent limitations of using a 4G core network for advanced 5G services.

Keywords : 5G NR, EPC, LTE, Millimeter Wave (mmWave), Sub-6GHz, Network Simulation, NS-3, Performance Evaluation, Throughput, Latency, Reliability, Urban Environment, Non-Standalone Architecture (NSA).

Résumé

Afin d'étudier les performances de la 5G New Radio (NR) dans un contexte où le service n'est pas encore commercialement disponible, ce travail présente une évaluation par simulation utilisant NS-3. Nous modélisons une architecture 5G non autonome (NSA) où la radio 5G est connectée à un cœur de réseau 4G EPC. L'objectif principal est de comparer les performances des deux bandes de fréquences clés de la 5G : les ondes millimétriques (mmWave) et les bandes Sub-6GHz. Plusieurs scénarios ont été simulés pour analyser des indicateurs de performance clés tels que le débit, la latence et la fiabilité dans un environnement urbain réaliste. Nos résultats confirment que la technologie mmWave permet d'atteindre des débits très élevés mais au détriment de la portée et de la pénétration des obstacles. La technologie Sub-6GHz, quant à elle, offre une couverture plus étendue et plus stable. Cette étude permet de quantifier les gains apportés par la 5G NR au niveau de l'interface radio et de mettre en évidence les limitations inhérentes à l'utilisation d'un cœur de réseau 4G pour les services 5G avancés.

Mots-clés : 5G NR, EPC, LTE, Ondes millimétriques (mmWave), Sub-6GHz, Simulation de réseau, NS-3, Évaluation des performances, Débit, Latence, Fiabilité, Milieu urbain, Architecture non autonome (NSA).

Table des matières

Remerciements	1
ملخص	2
Abstract	3
Résumé	4
Liste des acronymes	10
Introduction Générale	12
1 État de l'Art et Contexte Théorique	14
1.1 Introduction	14
1.2 4G LTE EPC	15
1.3 Présentation de la 5G	15
1.4 Le passage de la 4G LTE EPC vers une architecture 5G NR .	16
1.5 Les caractéristiques clés de la 5G	17
1.6 Les principales technologies de la 5G	19
1.6.1 Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) . .	19
1.6.2 Beamforming	20
1.6.3 URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communications)	21
1.6.4 Network Slicing	22
1.7 Variation du nombre d'utilisateurs et impact sur le debit . . .	24
1.8 Comparaison : Sub-6GHz vs mmWave	24
1.8.1 Avantages de la 5G mmWave	26
1.8.2 Défis de la 5G mmWave	26
1.8.3 Avantages du 5G Sub-6	27

1.8.4	Défis du 5G Sub-6	28
1.9	Influence de la bande passante et du nombre d'antennes	29
1.10	Les limites pratiques de la 5G	29
1.11	Mesure de la latence	30
1.12	Comparaison de la latence entre 4G et 5G	31
1.13	Influence de la charge réseau sur la latence	32
1.14	Impact du nombre de sauts entre utilisateurs et cœur du réseau	32
1.15	Applications sensibles à la latence	33
1.16	Simulation de perte de paquets et impact sur les performances	34
1.17	mécanismes de retransmission et correction d'erreur.	34
1.17.1	Mécanismes de retransmission dans la 5G	34
1.17.2	Mécanismes de correction d'erreur	35
1.18	Impact de l'interférence et congestion du réseau sur la fiabilité.	35
1.19	Solutions pour améliorer la fiabilité	36
1.20	Conclusion	36
2	Méthodologie et Conception de la Simulation	38
2.1	Topologie et Environnement de Simulation	38
2.2	Choix et Présentation du Simulateur NS-3	40
2.2.1	Module mmWave/LTE dans NS-3	41
2.3	Comparaison avec d'Autres Simulateurs	42
2.4	Configuration Détaillée du Simulateur	44
2.4.1	Spécifications de la Machine de Simulation	44
2.4.2	Paramètres Globaux de Simulation	44
2.4.3	Modèles de Propagation	46
2.4.4	Planificateur MAC (MAC Scheduler)	46
2.5	Scénarios de Simulation	47
2.5.1	Scénario de Base et Modèles de Trafic	47
2.5.2	Cas d'Étude et Paramètres Variés	48
3	Simulation et Analyse des résultats	49
3.1	Introduction	49
3.2	Analyse du débit	49
3.2.1	Impact du spectre utilisé	49
3.2.2	Impact de la distance	50
3.2.3	Impact du nombre d'UE	53
3.3	Analyse de la Latence et la Gigue (Jitter)	55
3.3.1	Variation avec la distance	55

3.3.2	Variation avec la charge réseau	57
3.4	Analyse de la fiabilité	59
3.4.1	Variation avec la distance	59
3.4.2	Variation avec la charge réseau	60
3.5	Conclusion	61
Conclusion Générale		62
Bibliographie		64

Table des figures

1.1	Architecture 5G NSA	16
1.2	Application de la 5G	18
1.3	Massive MIMO	20
1.4	beamforming	21
1.5	URLLC	22
1.6	Slicing	23
1.7	Les fréquences utilisées dans la 5G	25
1.8	Distribution des bandes de fréquence selon l'architecture 5G .	26
1.9	Différence de latence entre la configuration LTE et la configuration 5G optimisée.. . . .	31
2.1	Topologie Urbaine pour les Simulations.	39
3.1	Impact du spectre utilisé sur le débit et l'efficacité spectrale. .	50
3.2	Débit moyen en fonction de la distance.	51
3.3	MCS moyen en fonction de la distance.	52
3.4	SINR moyen en fonction de la distance.	53
3.5	Débit Moyen en fonction du nombre du UEs.	54
3.6	Latence Moyenne en fonction de la distance.	55
3.7	Jitter Moyen en fonction de la distance.	56
3.8	Latence Moyenne en fonction du nombre du UEs.	57
3.9	Jitter Moyen en fonction du nombre du UEs	58
3.10	Perte de Paquets en fonction de la distance	59
3.11	Perte de Paquets en fonction du nombre du UEs.	60

Liste des tableaux

1.1	Comparaison des performances entre la 4G et 5G	18
1.2	Comparaison entre les bandes mmWave et Sub-6 GHz pour la 5G	28
2.1	Comparaison entre NS-3, OMNeT++ et MATLAB	43
2.2	Paramètres globaux pour la bande mmWave (26 GHz)	45
2.3	Paramètres globaux pour la bande Sub-6 GHz (3.5 GHz) . . .	45

Liste des acronymes

3GPP 3rd Generation Partnership Project.

4G Fourth Generation.

5G Fifth Generation.

AR Augmented Reality.

eMBB Enhanced Mobile Broadband.

eNB Evolved Node B.

EPC Evolved Packet Core.

FCC Federal Communications Commission.

FR1 Frequency Range 1.

FR2 Frequency Range 2.

gNB Next Generation Node B.

HARQ Hybrid Automatic Repeat reQuest.

LDPC Low-Density Parity-Check.

LOS Line-of-Sight.

LTE Long Term Evolution.

MAC Medium Access Control.

MCS Modulation Coding Scheme.

MIMO Multiple-Input Multiple-Output.

mmWave Millimeter Wave.

NLOS Non-Line-of-Sight.

NR New Radio.

NSA Non Standalone Architecture.

QoS Quality of Service.

RLC-AM Radio Link Control-Acknowledged Mode.

SINR Signal-to-interference-plus-noise ratio.

SVD Singular value decomposition.

TCP Transmission Control Protocol.

TR Technical Report.

UE User equipment.

URLLC Ultra Reliable Low Latency Communications.

VR Virtual Reality.

Introduction Générale

L'avènement de la cinquième génération des réseaux de communication mobile (5G) constitue un changement de paradigme destiné à répondre aux limitations inhérentes aux systèmes de quatrième génération (4G LTE). Alors que la 4G a démocratisé l'accès à l'internet mobile à haut débit, son architecture Evolved Packet Core (EPC) n'est pas optimisée pour la diversité et la criticité des services émergents. L'interface radio 5G New Radio (NR) a été spécifiquement développée pour adresser un large éventail de cas d'usage, allant du très haut débit mobile (eMBB) aux communications ultra-fiables à faible latence (URLLC).

L'introduction de la 5G NR s'accompagne de l'utilisation de nouvelles bandes de fréquences, notamment les ondes millimétriques (mmWave), qui, par leur large bande passante, offrent un potentiel de capacité sans précédent. Néanmoins, la transition vers un réseau 5G complet se fait de manière progressive. L'architecture de déploiement initiale, dite non autonome (NSA), consiste à intégrer l'interface radio 5G NR au cœur de réseau 4G EPC existant.

La problématique centrale de cette étude réside dans l'évaluation des performances de cette configuration hétérogène. Il est impératif de quantifier les gains réels apportés par la nouvelle interface radio, mais aussi d'identifier les goulots d'étranglement potentiels imposés par le maintien du cœur de réseau 4G.

Notre méthodologie repose sur la simulation à événements discrets, un outil indispensable pour l'analyse de systèmes aussi complexes, particulièrement dans un contexte où les déploiements réels sont encore inexistantes. Le simulateur ns-3, enrichi du module mmWave, a été sélectionné pour la fidélité de ses modèles physiques et protocolaires.

Les objectifs de ce mémoire sont de conduire une analyse comparative des performances des bandes mmWave et Sub-6GHz dans un environnement

urbain modélisé, en évaluant des indicateurs clés tels que le débit, la latence et la fiabilité sous diverses conditions opérationnelles.

La suite de ce document est structurée comme suit :

- **Le chapitre 1** présente la technologie 5G NR ainsi que ses principales innovations, tout en mettant en évidence les limitations de la 4G LTE et de son cœur réseau EPC.
- **Le chapitre 2** présentera la méthodologie de simulation, les scénarios implémentés sous ns-3 et les différents paramètres de simulation.
- **Le chapitre 3** présentera l'analyse détaillée des résultats obtenus pour chaque métrique de performance.
- **Le chapitre 4** offrira une conclusion générale, synthétisant nos contributions et proposant des perspectives pour de futurs travaux de recherche.

Chapitre 1

État de l'Art et Contexte Théorique

1.1 Introduction

L'évolution des réseaux de télécommunications a connu une progression remarquable au cours des dernières décennies, passant de la 4G LTE EPC à l'émergence de la 5G NR, architecture innovante conçue pour répondre aux exigences croissantes en termes de capacité, de rapidité et de fiabilité. Ce chapitre se propose d'établir un panorama complet de l'état de l'art en matière de 5G, en mettant en lumière les avancées technologiques majeures qui sous-tendent cette nouvelle génération de réseaux mobiles.

Nous commencerons par analyser le passage de l'architecture 4G LTE EPC vers la nouvelle architecture 5G NR, en soulignant les changements fondamentaux et les bénéfices apportés. Ensuite, nous explorerons les caractéristiques clés de la 5G, telles que la vitesse de transmission, la densité de connexions, et la flexibilité du réseau. La présentation des principales technologies de la 5G, telles que les ondes millimétriques, le Massive MIMO, et la virtualisation du réseau, permettra de mieux comprendre les fondements techniques de cette révolution.

L'évaluation du débit et de la capacité des connexions constitue une étape essentielle pour mesurer la performance réelle des réseaux 5G, notamment en milieu urbain où la densité d'utilisateurs est élevée. Par ailleurs, l'étude de la latence et des délais de transmission est cruciale pour garantir des services en temps réel, tels que la réalité augmentée ou la conduite autonome. Enfin,

la fiabilité des communications et la gestion des erreurs seront abordées pour assurer la robustesse et la stabilité des réseaux 5G dans des environnements complexes.

Ce panorama théorique constitue une base solide pour la suite de notre étude, qui s'appuiera sur ces concepts pour évaluer et simuler la performance de la 5G NR en contexte urbain.

1.2 4G LTE EPC

La 4G LTE EPC (Evolved Packet Core) est le cœur du réseau 4G qui gère la connectivité, la gestion des sessions, la sécurité et la mobilité des utilisateurs. Il s'agit d'une architecture centralisée qui permet une transmission rapide et efficace des données mobiles. La 4G LTE (Long-Term Evolution) a permis d'énormes progrès en termes de vitesse et de capacité par rapport aux générations précédentes.

1.3 Présentation de la 5G

La 5G reprend les technologies déjà utilisées avec la 4G LTE, mais se différencie sur plusieurs points très importants. En premier lieu, la 5G est une mise à jour technologique de la 4G LTE et peut réutiliser les mêmes bandes de fréquences que cette dernière. Grâce à cette mise à jour, un smartphone 5G peut bénéficier d'un meilleur débit qu'un smartphone 4G pourtant connecté à la même antenne et en utilisant la même fréquence.[\[10\]](#)

La 5G fait également appel à de nouvelles bandes de fréquences divisées en deux groupes.

Le premier regroupe les bandes de fréquences 5G Sub-6.

Le second, le groupe des ondes Millimétriques, permet d'augmenter sensiblement le débit au détriment de la portée

En ce qui concerne la 5G NR (Nouvelle Radio), il s'agit de la spécification technique élaborée par le 3rd Generation Partnership Project (3GPP) pour la mise en œuvre de la 5G. Elle englobe les technologies de modulation, les fréquences, les antennes, ainsi que d'autres éléments techniques essentiels pour déployer efficacement cette nouvelle génération de réseau. [\[5\]](#)

1.4 Le passage de la 4G LTE EPC vers une architecture 5G NR

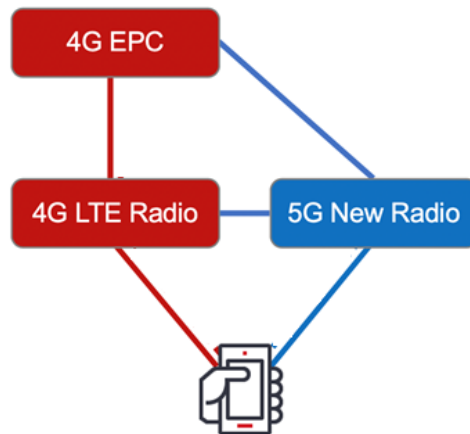


FIG. 1.1 : Architecture 5G NSA

La transition de la 4G LTE vers une architecture 5G NR (New Radio) représente une avancée significative dans le domaine des télécommunications. Pour faciliter cette évolution, de nombreux opérateurs choisissent d'adopter une architecture NSA (Non-Standalone), qui permet d'intégrer progressivement la 5G tout en s'appuyant sur l'infrastructure existante de la 4G.

Dans un premier temps, il est important de comprendre que la 4G LTE a établi les bases de la connectivité mobile moderne, offrant des vitesses de données élevées et une latence réduite. Cependant, avec l'augmentation des besoins en bande passante et l'émergence de nouvelles applications, comme l'Internet des objets (IoT) et la réalité augmentée, la 5G NR a été développée pour répondre à ces exigences croissantes.

L'architecture NSA permet aux opérateurs de déployer la 5G sans avoir à remplacer complètement leur infrastructure 4G. Dans ce modèle, la 5G NR fonctionne en tandem avec la 4G LTE. Cela signifie que les utilisateurs peuvent bénéficier des avantages de la 5G, tels que des vitesses de téléchargement plus rapides et une latence plus faible, tout en continuant à utiliser les réseaux 4G existants pour certaines fonctions.

Concrètement, dans une architecture NSA, (Figure 1.1) le cœur du réseau reste basé sur la technologie 4G, tandis que les stations de base 5G NR

sont ajoutées pour améliorer la couverture et la capacité. Les données des utilisateurs sont d'abord traitées par le réseau 4G, puis transmises via les nouvelles stations 5G. Cela permet une transition en douceur, car les opérateurs peuvent étendre leur réseau 5G progressivement, tout en maintenant la qualité de service pour les utilisateurs.

Le passage de la 4G LTE à la 5G NR via une architecture NSA représente une approche pragmatique pour moderniser les réseaux de télécommunications. Cette méthode permet d'exploiter les investissements existants tout en préparant le terrain pour une adoption plus large de la 5G à l'avenir. Les utilisateurs peuvent ainsi profiter des avantages de la 5G tout en continuant à bénéficier de la fiabilité de la 4G. [10]

1.5 Les caractéristiques clés de la 5G

Voici quelques caractéristiques clés de la 5G

Vitesse et Débit La 5G offre des vitesses de téléchargement pouvant atteindre plusieurs gigabits par seconde, permettant des expériences utilisateur améliorées pour le streaming vidéo en haute définition, les jeux en ligne et d'autres applications gourmandes en données .

Latence Réduite c'est-à-dire le temps nécessaire pour qu'un paquet de données soit envoyé et reçu, est considérablement réduit avec la 5G, atteignant des niveaux aussi bas que 1 ms. Cela est crucial pour des applications en temps réel, comme la conduite autonome et la réalité augmentée.

Capacité et Connectivité Massive :La 5G peut supporter un nombre beaucoup plus élevé d'appareils connectés simultanément, ce qui est essentiel pour l'Internet des objets (IoT). Cela permet de connecter des capteurs, des appareils domestiques intelligents et d'autres technologies de manière efficace.

Fiabilité et Sécurité La 5G est conçue pour être plus fiable, avec des mécanismes de sécurité avancés pour protéger les données et les communications.

Applications de la 5G La 5G ouvre la voie à de nouvelles applications (Figure 1.2) et services dans divers secteurs, y compris la santé, l'agriculture, l'industrie et les villes intelligentes.[17]

La 5G représente une avancée majeure dans le domaine des télécommunications, offrant des vitesses élevées, une faible latence et une connectivité massive.

La 5G représente une avancée significative par rapport à la 4G dans de

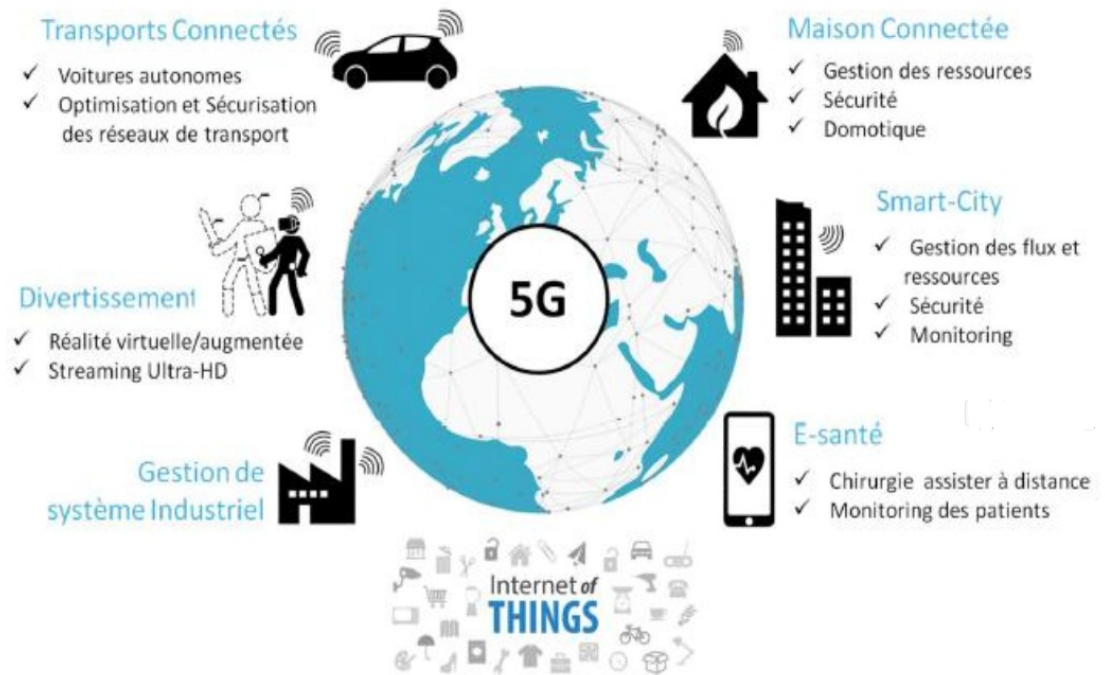


FIG. 1.2 : Application de la 5G
[13]

nombreux aspects. Voici un tableau de comparaison des performances entre la 4G et la 5G :

Performances	4G	5G
Débit maximal(Gbit/s)	1	20
Débit aperçu par l'utilisateur(Mbit/s)	10	100
Efficacité spectrale	1x	3x
Vitesse (Km/h)	350	500
Latence(ms)	10	1
Nombre d'objets connectés sur une zone (quantité d'objet)	10^5	10^6
Efficacité énérgitique du réseau	1x	100x

TAB. 1.1 : Comparaison des performances entre la 4G et 5G
[22]

1.6 Les principales technologies de la 5G

La 5G repose sur une architecture avancée et plusieurs technologies clés qui permettent d'atteindre ses objectifs de performance, de capacité et de flexibilité. Voici un aperçu des principales technologies et concepts associés à la 5G :

1.6.1 Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Description

Massive MIMO est une technologie qui utilise un grand nombre d'antennes à la fois à l'émetteur (station de base) et au récepteur (appareil utilisateur)(Figure 1.3). Contrairement aux systèmes MIMO traditionnels, qui utilisent quelques antennes, Massive MIMO peut utiliser des centaines d'antennes. [24]

Avantages :

- **Augmentation de la capacité :** En multipliant le nombre d'antennes, Massive MIMO permet d'augmenter la capacité du réseau en servant plusieurs utilisateurs simultanément dans le même spectre de fréquence.
- **Amélioration de la fiabilité :** La diversité spatiale offerte par de nombreuses antennes réduit les effets de l'interférence et améliore la qualité du signal.
- **Efficacité énergétique :** En concentrant le signal vers les utilisateurs, Massive MIMO peut réduire la puissance nécessaire pour transmettre des données [24].

Ces avantages rendent le Massive MIMO crucial pour répondre à la demande croissante en communications sans fil à haute vitesse et fiables.

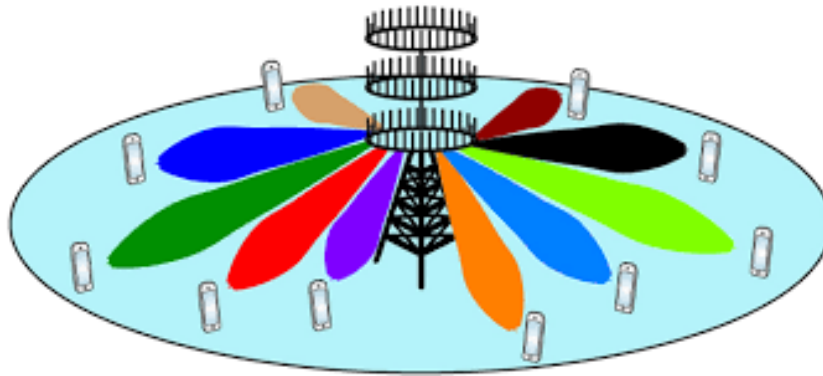


FIG. 1.3 : Massive MIMO
[9]

1.6.2 Beamforming

Description :

Le beamforming est une technique qui permet de diriger le signal radio vers un utilisateur spécifique plutôt que de le diffuser dans toutes les directions. Cela se fait en ajustant les phases et les amplitudes des signaux émis par les différentes antennes. Cette approche ciblée améliore la puissance et la qualité de la connexion Figure(1.4).

Avantages :

- **Amélioration de la couverture :** En concentrant le signal, le beamforming améliore la couverture et la qualité du signal pour les utilisateurs situés à la périphérie de la zone de couverture.
- **Réduction des interférences :** En dirigeant le signal vers un utilisateur spécifique, le beamforming réduit les interférences avec d'autres utilisateurs, ce qui améliore la performance globale du réseau.
- **Optimisation des ressources :** Cette technique permet une utilisation plus efficace du spectre radio, ce qui est crucial dans un environnement où la demande de bande passante est élevée.

[21]

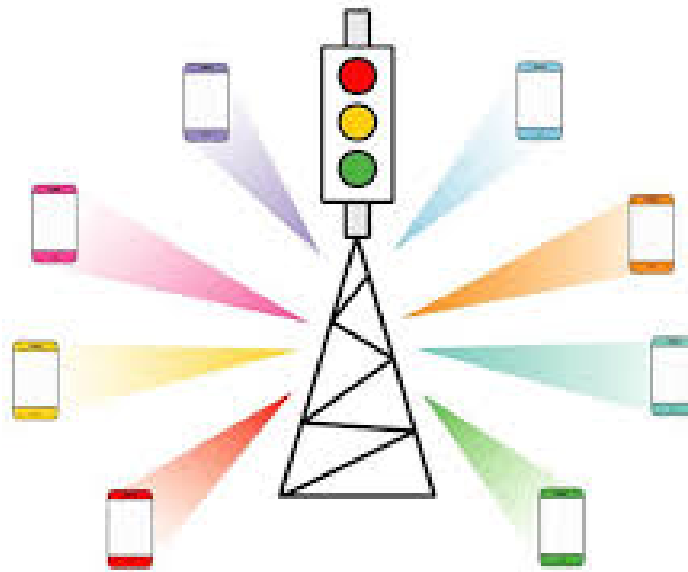


FIG. 1.4 : beamforming
[18]

Le beamforming joue un rôle crucial pour offrir des connexions plus rapides et plus fiables, garantissant une expérience fluide aux utilisateurs de leurs appareils mobiles.

1.6.3 URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communications)

Description :

URLLC, ou Communication Ultra-Fiable à Faible Latence, est une composante clé de la 5G qui va transformer notre façon de communiquer avec la technologie. Elle permet d'envoyer et de recevoir des données de manière très fiable et presque instantanée, avec une latence pouvant descendre à une milliseconde. Cela est essentiel pour des applications critiques comme les véhicules autonomes, les systèmes industriels, la chirurgie à distance ou la réalité virtuelle, où chaque milliseconde compte. Figure(1.5) Grâce à des avancées technologiques dans l'architecture du réseau, l'utilisation de fréquences élevées et des algorithmes intelligents, l'URLLC garantit une communication

fluide et sécurisée pour les usages les plus exigeants. En résumé, cette technologie ouvre la voie à une nouvelle ère d'innovation, où la connectivité devient plus rapide, fiable et adaptée aux besoins du futur. [23]

Avantages :

- **Réactivité** : URLLC permet des communications en temps réel, essentielles pour des applications où chaque milliseconde compte.
- **Fiabilité** : La technologie garantit que les données critiques sont transmises sans perte, ce qui est vital pour des applications sensibles à la sécurité.
- **Flexibilité** : URLLC peut coexister avec d'autres types de services (comme le streaming vidéo) sur le même réseau, optimisant ainsi l'utilisation des ressources.

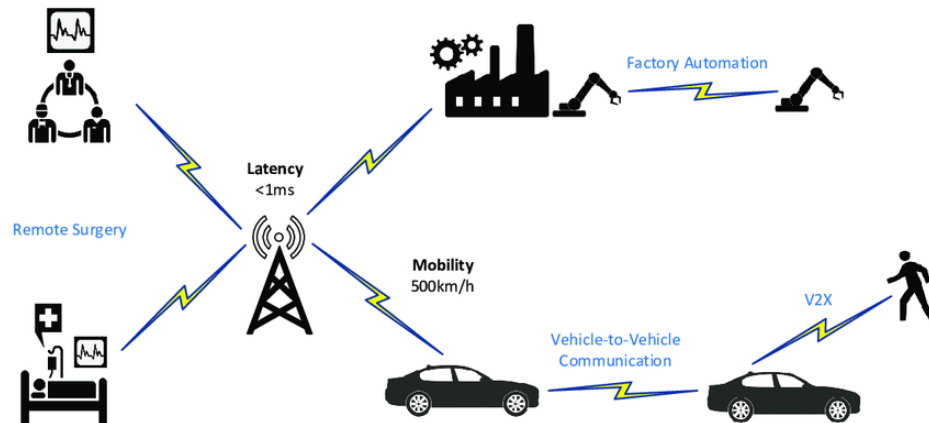


FIG. 1.5 : URLLC
[14]

1.6.4 Network Slicing

Description :

Le slicing de réseau (découpage de réseau) est une approche qui permet de créer plusieurs réseaux virtuels (slices) sur une infrastructure physique

unique. Chaque slice peut être optimisé pour des cas d'utilisation spécifiques, avec des exigences de performance, de latence et de capacité différentes. Figure(1.6)

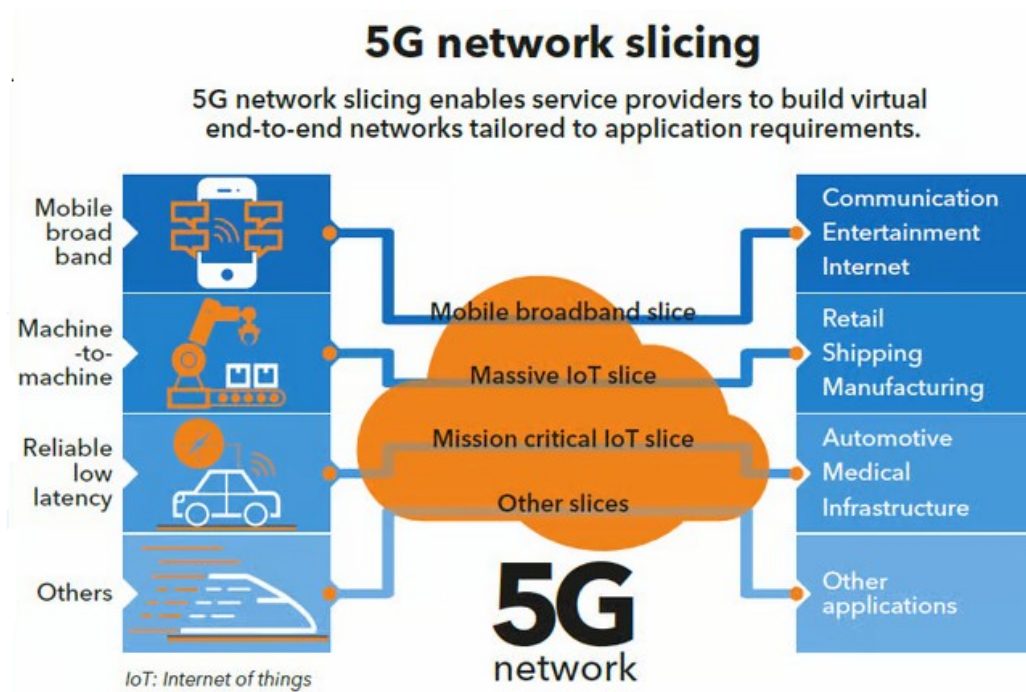


FIG. 1.6 : Slicing

Avantages :

- **Personnalisation** : Chaque slice peut être configuré pour répondre aux besoins spécifiques d'un service ou d'un client, permettant une grande flexibilité.
- **Efficacité des ressources** : Le slicing permet une utilisation plus efficace des ressources réseau, en allouant dynamiquement la bande passante et les capacités en fonction des besoins.
- **Isolation** : Les slices sont isolés les uns des autres, ce qui garantit que les performances d'un service ne sont pas affectées par d'autres services sur le même réseau.

Ces technologies clés de la 5G, telles que Massive MIMO, le beamforming, URLLC et le slicing de réseau, sont essentielles pour réaliser les promesses de la 5G en matière de vitesse, de capacité, de fiabilité et de flexibilité. Elles permettent de répondre aux exigences croissantes des utilisateurs et des applications, tout en optimisant l'utilisation des ressources réseau.

1.7 Variation du nombre d'utilisateurs et impact sur le débit

Lorsque le nombre d'utilisateurs sur un réseau 5G augmente, la capacité totale du réseau doit être partagée entre tous ces utilisateurs. Si le réseau est très sollicité, cela peut entraîner une réduction du débit pour chaque utilisateur individuel, car les ressources (bande passante, puissance de traitement, etc.) sont réparties entre plus de personnes.

Cependant, la technologie 5G est conçue pour gérer efficacement un grand nombre d'utilisateurs grâce à des techniques avancées comme la Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) et la gestion dynamique du spectre. Cela permet de maintenir des débits élevés même en cas de forte affluence, mais il peut tout de même y avoir une légère baisse de performance si le nombre d'utilisateurs devient extrêmement élevé ou si la couverture est limitée.

plus il y a d'utilisateurs, plus le débit peut diminuer pour chacun, mais grâce aux innovations technologiques, cette baisse est généralement maîtrisée pour offrir une expérience utilisateur satisfaisante.

1.8 Comparaison : Sub-6GHz vs mmWave

la 5G fonctionne sur deux bandes de fréquences : sub-6 GHz (FR1) et mmWave (FR2).Figure(1.7) [16]

5G à haute bande ou à ondes millimétriques (mmWave) : grande vitesse mais courte portée. Les fréquences de la 5G à haute bande vont de 24 GHz à 100 GHz, ce qui la rend incroyablement rapide - permettant des vitesses de plusieurs gigabits par seconde. Mais ces hautes fréquences ont du mal à traverser les bâtiments et les murs, ce qui la rend utile uniquement sur de courtes distances.

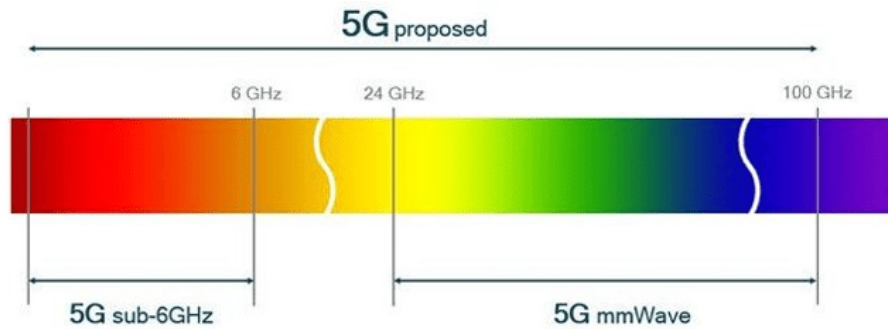


FIG. 1.7 : Les fréquences utilisées dans la 5G
[16]

5G à bande moyenne Sub-6 : portée moyenne, bonne vitesse. La bande moyenne fonctionne entre 1 et 6 GHz et offre une portée plus longue que la bande haute, avec de bonnes vitesses de l'ordre du gigabit par seconde. En fait, ce spectre 5G est la bande 5G la plus utilisée et est couramment utilisée sur les campus d'entreprises.

Différentes longueurs d'onde et bandes de fréquences sur le spectre offrent des performances variées. Cependant, la mmWave et le Sub-6 fonctionnent tous deux avec la 5G, mais présentent quelques différences, que nous découvrirons dans le tableau. la 5G supporte un spectre de fréquences plus large que celui de la génération précédente. La Commission fédérale des communications (FCC) délivre des licences pour des bandes de spectre à différents opérateurs ou fournisseurs de réseaux sans fil pour leurs réseaux 5G.[16]

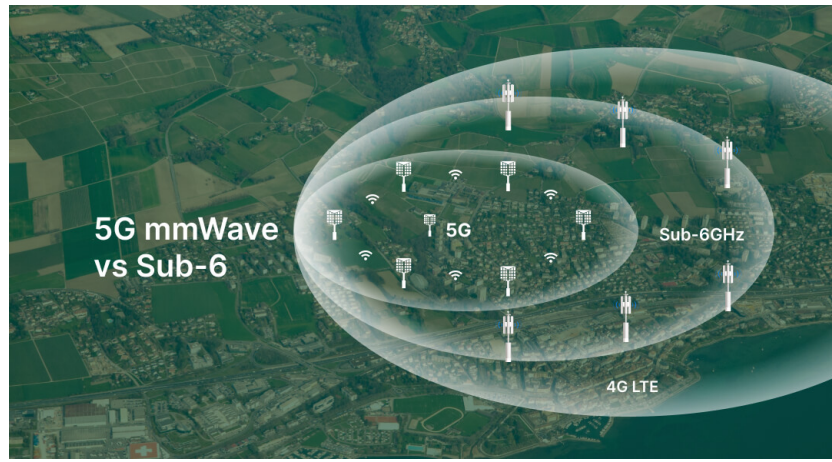


FIG. 1.8 : Distribution des bandes de fréquence selon l'architecture 5G [16]

1.8.1 Avantages de la 5G mmWave

La 5G mmWave offre de nombreux avantages qui changent notre façon de nous connecter et d'interagir avec la technologie :

- **Vitesse améliorée.**
- **Temps de réponse ultra-faibles.**
- **Capacité plus élevée.**
- **Déploiement pratique :** Les antennes millimétriques sont plus petites et plus légères, ce qui facilite leur déploiement.
- **Expansion de la couverture :** L'extension de la couverture par petites cellules permet aux organisations d'accroître leurs capacités mmWave grâce à un réseau de petites antennes.
- **Amélioration de l'expérience utilisateur :** Le mmWave réduit la latence, offrant une connexion plus fluide et plus réactive.

1.8.2 Défis de la 5G mmWave

Malgré tous ces avantages, la 5G mmWave présente aussi quelques limitations :

- **Couverture limitée :** Les signaux mmWave sont facilement bloqués par des obstacles comme les bâtiments et les arbres, ce qui nécessite davantage de stations de base pour une couverture étendue.
- **Susceptible aux interférences :** Des facteurs externes comme la pluie et les conditions météorologiques peuvent affecter la qualité du signal.
- **Coût plus élevé :** La mise en œuvre de la technologie mmWave peut être plus coûteuse que les réseaux 5G traditionnels.

1.8.3 Avantages du 5G Sub-6

Le sous-6 GHz offre plusieurs bénéfices, notamment une gamme plus étendue de la 5G ou du mmWave :

- **Couverture plus large :** Les fréquences en sous-6 GHz, en particulier celles de la bande basse, permettent une couverture étendue. Elles sont adaptées aux zones rurales et suburbaines où la densité de population est plus faible.
- **Meilleure pénétration :** Ces fréquences ont une capacité de pénétration supérieure à celle du mmWave. Les signaux peuvent traverser plus efficacement des obstacles comme les murs ou la végétation. Cette caractéristique améliore la connectivité en intérieur comme en extérieur.
- **Densité de connexion améliorée :** Les réseaux 5G en sous-6 GHz supportent un nombre beaucoup plus élevé d'appareils connectés par kilomètre carré comparé à la 4G. Cela les rend idéaux pour des déploiements IoT plus efficaces et des applications de villes intelligentes.
- **Transition fluide :** Étant donné le chevauchement avec les bandes 4G LTE existantes, les fréquences en sous-6 GHz facilitent une transition en douceur vers la 5G. Les opérateurs peuvent ainsi exploiter leur infrastructure actuelle tout en introduisant de nouveaux services 5G.
- **Expérience utilisateur améliorée :** Le sous-6 est plus rapide et plus fiable que la LTE, ce qui améliore l'expérience utilisateur. Les utilisateurs peuvent communiquer, diffuser, télécharger et uploader plus rapidement, gagnant ainsi du temps par rapport aux générations précédentes de réseaux cellulaires.

1.8.4 Défis du 5G Sub-6

- **Partage du spectre** : Le partage du spectre avec d'autres services sans fil peut entraîner des interférences et une dégradation des performances.
- **Capacité moindre** : Le sous-6 GHz ne peut pas atteindre la capacité potentielle du mmWave, surtout dans les zones très peuplées.
- **Interférences accrues** : L'utilisation plus large des appareils sans fil peut provoquer davantage d'interférences, ce qui peut impacter la performance du réseau.

Caractéristique	Sub-6 GHz	mmWave (ondes millimétriques)
Plage de fréquences	Typiquement 1–6 GHz	Typiquement 24–100 GHz
Portée	Longue (plusieurs centaines de mètres)	Courte (quelques dizaines de mètres)
Pénétration dans les bâtiments	Bonne	Très faible
Débit théorique	Modéré (jusqu'à 1 Gbit/s)	Très élevé (plusieurs Gbit/s)
Bande passante disponible	Limitée (20–100 MHz)	Large (jusqu'à 400 MHz ou plus)
Latence	Faible	Très faible (grâce à la bande passante)
Beamforming requis	Pas toujours nécessaire	Essentiel pour compenser la perte de propagation
Densité de déploiement	Faible à moyenne	Très élevée (micro/pico-cellules)
Sensibilité aux obstacles	Faible	Très élevée
Utilisation typique	Zones rurales / urbaines mixtes	Zones urbaines denses, intérieur, hotspots

TAB. 1.2 : Comparaison entre les bandes mmWave et Sub-6 GHz pour la 5G [16]

mmWave et Sub-6 GHz sont tous deux des bandes de fréquences de la 5G. il existe des différences importantes en termes de couverture, de débits, de capacités de pénétration et d'applications. Par exemple, la gamme mmWave ou FR2 commence à partir de 24 GHz, tandis que la gamme Sub-6 reste en dessous de 6 GHz.

1.9 Influence de la bande passante et du nombre d'antennes

La bande passante, c'est la quantité de données que le réseau peut transmettre en une seconde. Plus cette bande passante est grande, plus le réseau peut supporter de connexions simultanées et de données à haute vitesse. Dans le contexte de la 5G, une bande passante plus large permet d'obtenir des débits très rapides, ce qui est idéal pour le streaming vidéo en haute définition, la réalité virtuelle, ou encore l'Internet des objets.

Quant au nombre d'antennes, il s'agit souvent de ce qu'on appelle la technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output). Plus il y a d'antennes, plus le réseau peut envoyer et recevoir plusieurs flux de données en même temps. Cela augmente la capacité, la fiabilité et la vitesse du réseau. La 5G utilise souvent des antennes massives (massive MIMO), qui permettent d'optimiser la couverture et la performance, même dans des zones très densément peuplées.

une bande passante plus large combinée à un grand nombre d'antennes permet à la 5G d'offrir des vitesses plus élevées, une meilleure capacité, et une connectivité plus fiable, même dans des environnements très encombrés. Cela ouvre la voie à de nombreuses innovations et à une expérience utilisateur améliorée.

1.10 Les limites pratiques de la 5G

La 5G nécessite l'installation de nombreuses antennes et stations de base, notamment en raison de ses fréquences plus élevées qui ont une portée plus courte. Cela signifie que la couverture initiale peut être limitée, surtout dans les zones rurales ou peu densément peuplées.

- **Coût d’installation élevé :** La mise en place d’un réseau 5G demande des investissements importants pour l’infrastructure, ce qui peut ralentir son déploiement dans certaines régions ou pour certains opérateurs.
- **Problèmes d’interférences et de signal :** Les fréquences plus élevées utilisées par la 5G, comme les ondes millimétriques, sont plus sensibles aux obstacles physiques (bâtiments, arbres, pluie), ce qui peut affecter la stabilité et la qualité du signal.
- **Consommation d’énergie accrue :** Les appareils compatibles 5G peuvent consommer plus d’énergie, ce qui peut réduire leur autonomie, surtout si la connectivité 5G est utilisée de manière intensive.
- **Questions de sécurité et de santé :** Bien que les études soient encore en cours, certaines préoccupations persistent concernant l’impact potentiel des ondes 5G sur la santé et la sécurité, ce qui peut freiner certains déploiements ou susciter des débats publics.
- **Compatibilité et transition :** La transition vers la 5G nécessite que les appareils soient compatibles, ce qui peut représenter un coût pour les consommateurs et les entreprises, et ralentir l’adoption généralisée.

En résumé, si la 5G promet une révolution dans la connectivité, ses limites pratiques actuelles concernent principalement la couverture, le coût, la stabilité du signal, et certains enjeux liés à la santé et à la compatibilité. Mais avec le temps, ces défis devraient diminuer à mesure que la technologie et l’infrastructure évoluent.

1.11 Mesure de la latence

Mesurer la latence, c’est-à-dire le délai de transmission d’un signal, entre deux points éloignés. Pour cela, on utilise deux appareils équipés d’horloges synchronisées via un système GPS, ce qui permet de mesurer précisément le temps que met un paquet de données pour voyager d’un point à l’autre.

Il aborde aussi la complexité de mesurer cette latence dans les réseaux mobiles 5G, où les appareils se déplacent souvent entre différentes stations de base. La synchronisation des horloges, la transmission d’horodatages précis et la localisation GPS sont essentielles pour obtenir des mesures fiables.

Les opérateurs de téléphonie doivent assurer une couverture fiable, parfois en collaborant avec d'autres opérateurs, pour maintenir la qualité du service. Grâce à des équipements spécialisés, il est possible de mesurer simultanément la latence, la gigue (variabilité du délai), et d'autres paramètres, en enregistrant la position GPS du véhicule ou de l'appareil en mouvement. Ces données peuvent ensuite être analysées et visualisées sur des cartes, avec des couleurs indiquant où se produisent des problèmes de réseau.[20]

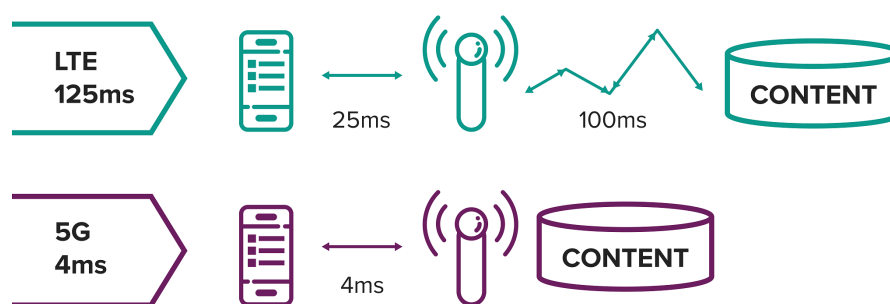


FIG. 1.9 : Différence de latence entre la configuration LTE et la configuration 5G optimisée..

[25]

1.12 Comparaison de la latence entre 4G et 5G

La 5G offre une latence considérablement réduite par rapport à la 4G. Alors que la latence de la 4G se situe généralement entre 20 et 50 millisecondes, la 5G vise à réduire cette valeur à moins de 10 millisecondes, voire à moins d'une milliseconde dans certains cas. Cette faible latence permet des interactions en temps réel, ce qui est essentiel pour les applications nécessitant une réactivité instantanée, telles que les jeux en ligne, la réalité virtuelle/augmentée et les véhicules autonomes.[7]

1.13 Influence de la charge réseau sur la latence

La charge réseau, c'est-à-dire la quantité de données qui circule sur le réseau à un moment donné, a une influence directe sur la latence, qui correspond au délai de transmission des données d'un point à un autre.

Lorsque la charge réseau est faible, les données peuvent circuler rapidement, ce qui entraîne une faible latence. En revanche, lorsque le réseau est fortement sollicité, la congestion peut survenir, provoquant des retards dans la transmission des données. Cela signifie que la latence augmente, ce qui peut affecter la qualité des appels vidéo, des jeux en ligne ou toute autre application nécessitant une communication en temps réel.

Plus la charge réseau est élevée, plus la latence tend à augmenter, ce qui peut rendre l'expérience utilisateur moins fluide. C'est pourquoi il est important de gérer la charge du réseau pour maintenir une faible latence et assurer une bonne performance des services en ligne.

1.14 Impact du nombre de sauts entre utilisateurs et cœur du réseau

L'impact du nombre de sauts entre utilisateurs et le cœur du réseau est un aspect important dans la performance et la stabilité des réseaux de communication, comme Internet ou d'autres réseaux de télécommunications.

Chaque "saut" correspond à une étape ou un relais entre deux points du réseau. Plus il y a de sauts entre un utilisateur et le cœur du réseau, plus le signal doit traverser de relais ou de nœuds, ce qui peut entraîner plusieurs effets :

- **Latence accrue :** Plus il y a de sauts, plus le délai pour que l'information voyage d'un point à un autre est long. Cela peut affecter la rapidité avec laquelle vous recevez ou envoyez des données, ce qui est crucial pour des applications en temps réel comme la vidéo en direct ou les jeux en ligne.

- **Perte de qualité** : Chaque saut peut introduire des pertes ou des dégradations du signal, ce qui peut nécessiter des retransmissions ou des corrections, impactant la qualité globale de la communication.
- **Complexité et fiabilité** : Un grand nombre de sauts augmente la complexité du réseau et peut aussi augmenter le risque de panne ou de congestion à certains points, ce qui peut réduire la fiabilité du service.

Réduire le nombre de sauts entre utilisateurs et le cœur du réseau permet généralement d'améliorer la vitesse, la qualité et la fiabilité des communications. C'est pourquoi les réseaux modernes cherchent souvent à optimiser leur architecture pour minimiser ces sauts autant que possible.

1.15 Applications sensibles à la latence

Les applications sensibles à la latence sont celles pour lesquelles la rapidité de la réponse ou du traitement est cruciale pour leur bon fonctionnement ou pour l'expérience utilisateur.

Quelques exemples courants :

- **Jeux en ligne** : où une latence élevée peut provoquer des décalages ou des retards, affectant la jouabilité.
- **Vidéoconférences et appels en temps réel** : pour assurer une communication fluide sans décalage ou interruption.
- **Trading financier en temps réel** : où chaque milliseconde compte pour prendre des décisions rapides.
- **Systèmes de contrôle industriel ou de robotique** : nécessitant une réaction immédiate pour la sécurité ou la précision.
- **Applications de réalité virtuelle (VR) et réalité augmentée (AR)** : pour éviter la latence qui pourrait provoquer des malaises ou des désagréments.

Toute application où la rapidité de la réponse influence directement la performance ou l'expérience utilisateur est sensible à la latence.

1.16 Simulation de perte de paquets et impact sur les performances

La simulation de perte de paquets et son impact sur les performances de communication 5G est un sujet très intéressant et important, surtout avec l'essor des réseaux 5G qui promettent des débits très élevés et une faible latence.

la perte de paquets se produit lorsque des données envoyées sur un réseau ne parviennent pas à leur destination. Cela peut être dû à divers facteurs comme la congestion du réseau, les interférences, ou encore la mobilité des utilisateurs. En simulant cette perte, on peut mieux comprendre comment le réseau réagit dans différentes conditions et quelles sont ses limites.

L'impact principal de la perte de paquets sur la communication 5G inclut une dégradation de la qualité de service, une augmentation de la latence, et une réduction du débit effectif. Par exemple, dans une application critique comme la télémédecine ou la conduite autonome, même une petite perte peut avoir des conséquences importantes.

Les simulations permettent d'évaluer ces effets en modélisant différents scénarios, comme des taux de perte variables ou des conditions de réseau fluctuantes. Cela aide à optimiser les protocoles, à améliorer la gestion du trafic, et à renforcer la résilience du réseau.

1.17 mécanismes de retransmission et correction d'erreur.

1.17.1 Mécanismes de retransmission dans la 5G

La retransmission est essentielle pour assurer que les données envoyées entre l'émetteur et le récepteur arrivent correctement, même en présence de bruits ou d'interférences.

En 5G, le principal protocole utilisé est HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest). Voici comment cela fonctionne :

HARQ combine deux techniques : la retransmission automatique (ARQ) et la correction d'erreur par codage.

Lorsqu'un récepteur détecte une erreur dans un paquet de données, il demande une retransmission. La retransmission n'est pas immédiate, mais elle

est combinée avec la version précédente pour améliorer la correction d’erreur. Cela permet d’optimiser la vitesse et la fiabilité de la communication.[1]

1.17.2 Mécanismes de correction d’erreur

Pour minimiser le nombre de retransmissions nécessaires, la 5G utilise plusieurs techniques de correction d’erreur :

Codage de correction d’erreur : des codes comme le LDPC (Low-Density Parity-Check) et le Polar codes sont utilisés pour détecter et corriger automatiquement certaines erreurs sans nécessiter de retransmission.

Codage adaptatif : en fonction de la qualité du canal, la puissance de transmission et le type de codage peuvent être ajustés pour optimiser la transmission.

La 5G combine la correction d’erreur avancée avec des mécanismes de retransmission intelligents comme HARQ pour garantir une transmission rapide, fiable et efficace, même dans des environnements difficiles.[11]

1.18 Impact de l’interférence et congestion du réseau sur la fiabilité.

L’interférence se produit lorsque plusieurs signaux se croisent ou se superposent, ce qui peut réduire la qualité de la communication. Dans un réseau 5G, cela peut arriver si plusieurs appareils ou réseaux utilisent des fréquences proches ou si des obstacles physiques perturbent la transmission. Cela peut entraîner des pertes de données, des ralentissements ou des coupures temporaires.

La congestion, quant à elle, survient lorsque trop d’utilisateurs ou d’appareils tentent d’accéder au réseau en même temps. Avec la 5G, qui promet une connectivité massive, cela peut devenir un défi dans les zones très peuplées ou lors d’événements importants. La congestion peut provoquer des délais plus longs, une baisse de la qualité de service, voire des interruptions.

Pour assurer la fiabilité malgré ces défis, les réseaux 5G intègrent des technologies avancées comme la gestion dynamique du spectre, la segmentation du réseau, et l’utilisation de plusieurs fréquences pour répartir la charge. Ces innovations permettent de minimiser l’impact de l’interférence et de la congestion, garantissant ainsi une connexion plus stable et fiable.

1.19 Solutions pour améliorer la fiabilité

HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest) : C'est une technique qui combine la retransmission automatique des données erronées avec la correction d'erreurs. Lorsqu'un message reçu comporte des erreurs, le système demande une retransmission, mais il utilise aussi des mécanismes pour corriger les erreurs sans nécessiter une nouvelle transmission complète. Cela permet d'améliorer la fiabilité tout en réduisant la latence.

FEC (Forward Error Correction) : Cette méthode consiste à ajouter des données redondantes aux messages avant leur transmission. Le récepteur peut alors détecter et corriger certaines erreurs sans demander de retransmission. Le FEC est particulièrement utile dans les environnements où la latence doit être minimisée ou où la retransmission est coûteuse ou difficile.

Autres solutions et stratégies dans la 5G :

MIMO (Multiple Input Multiple Output) : Utilisation de plusieurs antennes pour améliorer la qualité du signal et la fiabilité. Network Slicing : Création de segments de réseau dédiés avec des niveaux de fiabilité spécifiques selon les besoins des applications. Répartition de charge et gestion intelligente du trafic : Pour éviter la surcharge et garantir une meilleure stabilité.

la combinaison de HARQ, FEC, MIMO, et d'autres techniques permet à la 5G d'offrir une connectivité très fiable, adaptée aux usages critiques.

1.20 Conclusion

Ce chapitre a permis d'établir une compréhension approfondie de l'état actuel de la technologie 5G NR, en mettant en lumière ses caractéristiques clés et ses enjeux dans un contexte urbain. La présentation de la 5G a révélé ses avancées technologiques majeures, notamment en termes de débit, de capacité et de latence, qui sont essentielles pour répondre aux besoins croissants en connectivité. L'évaluation du débit et de la capacité des connexions a montré que la 5G offre des performances nettement supérieures aux générations précédentes, permettant une gestion efficace d'un grand nombre d'appareils connectés. L'étude de la latence et des délais de transmission a souligné l'importance de ces paramètres pour les applications en temps réel, telles que la réalité augmentée ou la conduite autonome. Enfin, l'analyse de la fiabilité des communications et de la gestion des erreurs a mis en évidence les défis liés à la stabilité et à la sécurité des réseaux 5G, tout en soulignant

les solutions technologiques mises en œuvre pour garantir une communication fiable. En somme, ce panorama théorique constitue une base solide pour la suite de notre étude, notamment la modélisation et la simulation de la performance de la 5G NR en environnement urbain.

Chapitre 2

Méthodologie et Conception de la Simulation

Cette section détaille la **méthodologie de simulation** adoptée pour évaluer les performances des réseaux 5G dans des environnements urbains denses. Nous décrivons la **topologie de simulation** et les **modèles de propagation** employés, conformément aux spécifications industrielles. Nous justifions ensuite le **choix du simulateur NS-3**, en présentant ses capacités et en le comparant à d'autres outils pertinents. Enfin, nous détaillons la **configuration spécifique** des simulations, incluant les paramètres clés pour les bandes de fréquence millimétriques et sub-6 GHz, ainsi que les modèles de canal et les planificateurs MAC utilisés, avant de présenter les **scénarios** mis en œuvre pour notre analyse.

2.1 Topologie et Environnement de Simulation

Les simulations sont réalisées sur une topologie urbaine d'une superficie de 175×300 mètres carrés. Cette zone est couverte par 16 antennes directionnelles pour la bande millimétrique, et 3 antennes pour la bande sub-6 GHz, réparties de manière à assurer une bonne couverture radio sur l'ensemble de la grille urbaine, comme illustré à la Figure 2.1.

Sauf indication contraire, tous les scénarios de simulation reposent sur les modèles de propagation définis par la spécification 3GPP TR 38.901 [26].

Le simulateur utilisé est NS-3 (version 3.42) accompagné du module mm-Wave (version 8) [12], qui prend en charge les communications à ondes millimétriques conformément aux spécifications 3GPP.

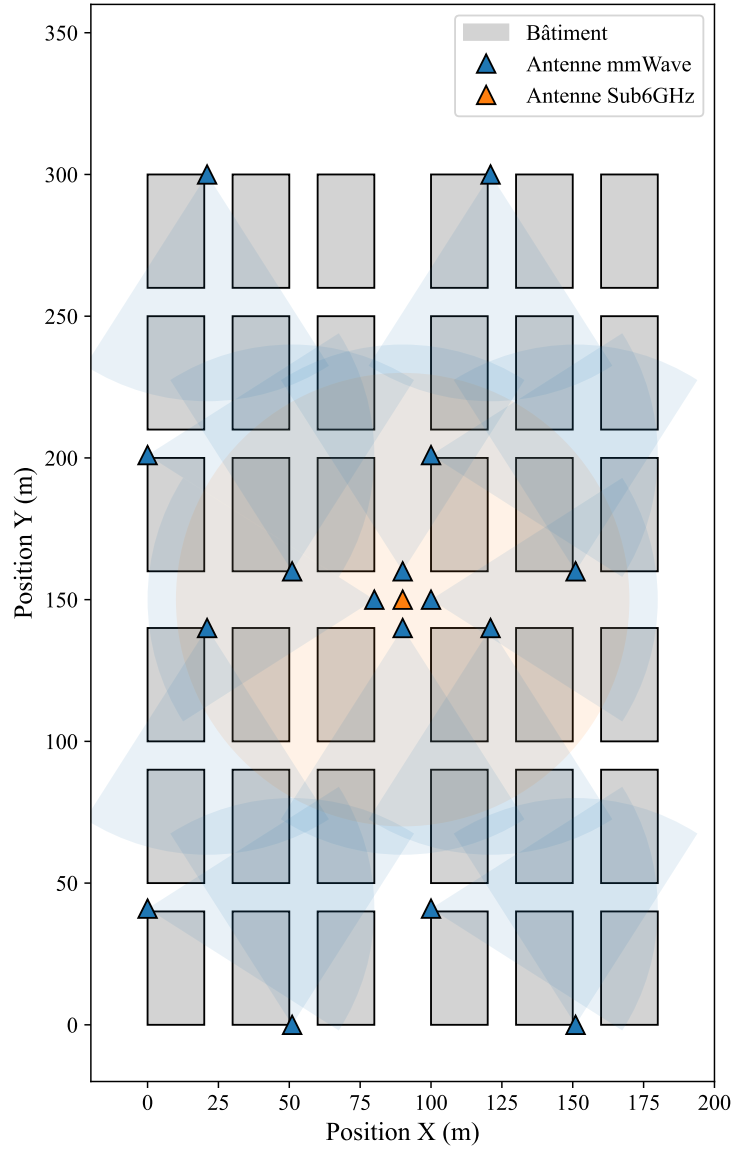


FIG. 2.1 : Topologie Urbaine pour les Simulations.

2.2 Choix et Présentation du Simulateur NS-3

Pour mener à bien cette étude, le **simulateur de réseau NS-3 (Network Simulator 3)**, en version 3.42, a été choisi en raison de sa **flexibilité**, de sa **précision** et de son **support communautaire robuste**. NS-3 est un simulateur à événements discrets, open-source et écrit en C++ avec des outils Python, ce qui permet une grande personnalisation et une modélisation détaillée des protocoles réseau.

Les raisons clés qui ont motivé ce choix sont les suivantes :

- **Modularité et Flexibilité** : L'architecture modulaire de NS-3 permet aux utilisateurs d'ajouter ou de modifier des modules pour simuler différents protocoles et technologies. Cela inclut des modules spécifiques pour la 5G, comme le module mmWave, essentiel pour cette étude. Cette flexibilité facilite la personnalisation des scénarios pour tester de nouvelles idées ou évaluer des configurations réseau particulières.
- **Précision et Réalisme** : NS-3 offre des modèles de propagation et des implémentations de protocoles de communication réalistes, ce qui permet d'obtenir des résultats de simulation qui se rapprochent des performances réelles des réseaux 5G. Le simulateur inclut des modèles pour des technologies clés de la 5G, telles que Massive MIMO, le beam-forming, et URLLC, permettant une étude approfondie de ces concepts.
- **Outils d'Analyse et de Visualisation** : NS-3 fournit des outils robustes pour collecter et analyser des données de simulation, permettant aux chercheurs d'évaluer les performances des réseaux en fonction de divers critères (débit, latence, fiabilité, etc.). Les résultats peuvent être visualisés à l'aide de graphiques et de tableaux, facilitant l'interprétation des données et la communication des résultats.
- **Communauté Active et Support** : NS-3 bénéficie d'une communauté active de développeurs et de chercheurs qui contribuent à son développement et à l'amélioration de ses fonctionnalités. Cela garantit des mises à jour régulières, une documentation complète et un support communautaire précieux.

- **Interopérabilité et Adaptabilité à la Recherche :** NS-3 peut être intégré avec d'autres outils et simulateurs, permettant de créer des environnements de simulation plus complexes. Il est également largement utilisé dans les milieux académiques pour l'enseignement et la recherche innovante sur les concepts de réseaux.

En outre, le NS-3 dispose d'une documentation officielle complète ainsi que d'un riche comité d'utilisateurs [8, 19]. L'architecture de NS-3, repensée depuis NS-2, offre une conception optimisée pour les progrès des langages de programmation et du génie logiciel [3].

2.2.1 Module mmWave/LTE dans NS-3

Le module mmWave/LTE dans NS-3 est conçu spécifiquement pour simuler les réseaux de communication mobile de quatrième (LTE) et cinquième génération (5G mmWave). Ce module est indispensable pour notre étude, car il permet d'analyser les performances des réseaux utilisant des technologies avancées, notamment les fréquences millimétriques et les techniques de gestion des ressources [15].

Caractéristiques du Module mmWave

- **Support des Fréquences Millimétriques :** Le module mmWave permet de simuler des réseaux 5G utilisant des bandes de fréquence millimétriques (généralement entre 24 GHz et 100 GHz), ce qui est essentiel pour atteindre des débits de données élevés et une faible latence.
- **Modulation et Codage Avancés :** Il inclut des schémas de modulation (e.g., QAM) et des techniques de codage optimisées pour la transmission de données à très haut débit.
- **MIMO (Multiple Input Multiple Output) et Beamforming :** Le module prend en charge les technologies MIMO, y compris le Massive MIMO, et des mécanismes de beamforming comme le SVD Beamforming, cruciaux pour améliorer la capacité et la fiabilité des liaisons dans les bandes mmWave.
- **Modélisation de la Propagation et des Interférences :** Il modélise les effets de propagation spécifiques aux ondes millimétriques,

incluant l'atténuation, les réflexions et les interférences, avec un accent particulier sur les conditions LOS / NLOS.

- **Scénarios de Mobilité :** Le module permet de simuler des utilisateurs mobiles, essentiel pour évaluer les performances du réseau dans des environnements dynamiques.

Caractéristiques du Module LTE

- **Architecture de Réseau :** Le module LTE modélise l'architecture typique d'un réseau LTE, y compris les éléments tels que l'eNodeB, le cœur de réseau et les utilisateurs.
- **Gestion des Ressources Radio (RRM) :** Il inclut des mécanismes pour l'allocation de ressources, le contrôle de puissance et la gestion de la QoS.
- **Support de la Mobilité :** Le module permet de simuler la mobilité des utilisateurs et les transferts inter-eNodeB pour évaluer la continuité du service.
- **Scénarios de Trafic Variés :** Il permet de simuler différents types de trafic (voix, vidéo, données) pour évaluer les performances du réseau sous diverses charges.

Le simulateur NS-3, avec ses modules mmWave et LTE, offre un environnement puissant et flexible pour étudier et analyser les performances des réseaux de communication mobile modernes.

2.3 Comparaison avec d'Autres Simulateurs

Lorsqu'il s'agit de simuler des réseaux de communication, plusieurs simulateurs sont disponibles, chacun ayant ses propres caractéristiques, avantages et inconvénients. Le Tableau 2.1 compare NS-3 avec d'autres simulateurs populaires tels qu'OMNeT++ et MATLAB.

TAB. 2.1 : Comparaison entre NS-3, OMNeT++ et MATLAB

Critère	NS-3	OMNeT++	MATLAB
Type de simulateur	Simulateur de réseau open-source à événements discrets	Simulateur de réseau open-source basé sur des composants/modules	Environnement de calcul numérique avec des capacités de simulation
Langage principal	C++ et Python	C++ et NED (Network Description Language)	MATLAB
Utilisation principale	Recherche avancée en réseaux, protocoles, Internet, réseaux sans fil (5G, LTE)	Conception et modélisation de systèmes distribués et de réseaux (très visuel)	Mathématiques, traitement du signal, modélisation de systèmes, prototypage rapide
Interface utilisateur	Ligne de commande, scripts (Python/C++)	Interface graphique riche, NED, scripts	MATLAB GUI, scripts (interactif)
Communauté et support	Grande et active communauté open-source, mailing lists, wiki	Communauté active, extensible, support commercial disponible	Très large communauté académique et industrielle, support commercial étendu
Flexibilité et extensibilité	Très flexible, architecture open-source, permet des modifications profondes au niveau du code	Très flexible, modulaire, excellent pour la construction de modèles complexes à partir de composants	Flexible, mais moins spécialisé en réseaux à des niveaux de détail faibles ; nécessite des toolboxes spécifiques
Applications typiques	Réseaux sans fil (LTE, 5G, Wi-Fi), Internet des objets, protocoles de routage	Réseaux filaires et sans fil, systèmes embarqués, cloud computing	Simulation de liens physiques, traitement d'antenne, algorithmes de machine learning pour la communication, analyse de données

Le choix du simulateur dépend largement des besoins spécifiques de l'utilisateur, de son niveau d'expertise et des objectifs de simulation. NS-3 est particulièrement adapté pour la recherche sur les réseaux de communication modernes, y compris la 5G, grâce à sa modularité, sa précision et sa capacité à modéliser des protocoles détaillés. OMNeT++ est également une excellente option pour ceux qui recherchent une interface graphique et une modularité orientée composants, tandis que MATLAB est idéal pour les analyses mathématiques, le traitement du signal et le prototypage rapide.

2.4 Configuration Détaillée du Simulateur

Cette section présente les paramètres spécifiques et les modèles employés pour configurer les simulations dans NS-3, en distinguant les configurations pour les bandes mmWave et Sub-6 GHz.

2.4.1 Spécifications de la Machine de Simulation

Les simulations ont été menées sur deux environnements informatiques distincts. Le premier, une station de travail équipée d'un processeur Intel Xeon E3-1270 v3 cadencé à 3.50 GHz (4 cœurs, 8 threads), disposait de 20 Go de RAM DDR3 et d'un disque SSD SATA de 500 Go. Le second était un ordinateur portable muni d'un processeur Intel Core i5-1230U (10 cœurs, 12 threads), de 16 Go de RAM DDR4 et d'un disque SSD NVMe de 500 Go. Le système d'exploitation utilisé est Ubuntu 24.04 LTS. La version de NS-3 (3.42) et du module mmWave (version 8) ont été compilées avec GCC version 11.4.0.

Ces spécifications garantissent une puissance de calcul suffisante pour l'exécution des scénarios complexes et la gestion des données de simulation, contribuant à la reproductibilité des résultats.

2.4.2 Paramètres Globaux de Simulation

Pour les simulations utilisant le spectre millimétrique (bande mmWave), les paramètres globaux suivants ont été utilisés :

TAB. 2.2 : Paramètres globaux pour la bande mmWave (26 GHz)

Paramètre	Valeur
Bande de fréquence	n257 (26 GHz)
Largeur de bande	400 MHz
Nombre d'eNB mmWave	16 (antennes directionnelles)
Hauteur des eNB	10 m
Modèle d'antenne	ThreeGppAntennaModel
Largeur de faisceau	65° (horizontal et vertical)
Modèle de propagation	ThreeGppUmiStreetCanyonPropagationLossModel
Modulation	Adaptative (MCS 0–28)
Planification MAC	MmWaveFlexTtiPfMacScheduler
Mécanisme de beamforming	SVD Beamforming
Type d'utilisateur	Utilisateurs statiques
Simulation EPC	Activée
Durée de simulation	12 secondes

Et pour les simulations utilisant le spectre Sub-6 GHz, les paramètres sont les suivants :

TAB. 2.3 : Paramètres globaux pour la bande Sub-6 GHz (3.5 GHz)

Paramètre	Valeur
Bande de fréquence	n78 (3.5 GHz)
Largeur de bande	100 MHz
Nombre d'eNB sub-6Ghz	3 (antennes directionnelles)
Hauteur des eNB	25 m
Modèle d'antenne	ThreeGppAntennaModel
Largeur de faisceau	65° (horizontal et vertical)
Modèle de propagation	ThreeGppUmaPropagationLossModel
Modulation	Adaptative (MCS 0–28)
Planification MAC	MmWaveFlexTtiPfMacScheduler
Mécanisme de beamforming	SVD Beamforming
Type d'utilisateur	Utilisateurs statiques
Simulation EPC	Activée
Durée de simulation	12 secondes

Dans les deux cas, le modèle de condition du canal est *BuildingsChannel-ConditionModel*, sauf si les conditions de visibilité (LOS / NLOS) ne sont pas

importantes pour l'expérience spécifique. L'activation de la simulation EPC (Evolved Packet Core) a permis de modéliser un environnement réseau de bout en bout plus réaliste, incluant les aspects de signalisation et de gestion des données au-delà de la seule interface radio.

2.4.3 Modèles de Propagation

Les simulations utilisent les modèles de propagation définis par la spécification 3GPP TR 38.901 [26], adaptés à l'environnement urbain dense. Ces modèles prennent en compte les conditions de visibilité (LOS / NLOS), les pertes dues à la diffraction, ainsi que les effets de réflexion multiples. Le choix de différents modèles de propagation est dicté par les caractéristiques distinctes des ondes dans ces bandes de fréquence et leur adéquation aux environnements urbains respectifs.

Pour les fréquences inférieures à 6 GHz (Sub-6 GHz), un modèle de type Urban Macro (`ThreeGppUmaPropagationLossModel`) est utilisé, simulant un déploiement de macro-cellules. Pour les bandes mmWave, un modèle Urban Micro (`ThreeGppUmiStreetCanyonPropagationLossModel`) est appliqué, caractérisé par des pertes de propagation accrues et une sensibilité plus grande aux obstacles. Les effets de fading en espace libre et multi-trajets sont modélisés à l'aide d'un canal stochastique à plusieurs états.

2.4.4 Planificateur MAC (MAC Scheduler)

Le planificateur MAC *MmWaveFlexTtiPfmMacScheduler* est un planificateur à partage proportionnel (*Proportional Fair*). Ce planificateur n'applique pas de mécanismes explicites de qualité de service (QoS), ce qui permet d'évaluer les performances brutes du système sans l'influence de politiques de QoS spécifiques, offrant une base pour des études ultérieures intégrant la QoS. Il répartit équitablement les ressources disponibles entre les utilisateurs connectés, sans distinction de priorité, en fonction de leur état de canal et de leurs besoins en capacité. La désignation "FlexTti" indique une flexibilité dans la durée du *Transmission Time Interval* (TTI), pertinente pour simuler l'adaptabilité des systèmes 5G.

2.5 Scénarios de Simulation

Pour évaluer les performances des réseaux 5G en environnement urbain et répondre aux objectifs de cette étude, plusieurs scénarios de simulation ont été conçus. Ces scénarios visent à analyser l'impact de divers paramètres réseau et de trafic sur des métriques clés telles que le débit agrégé, la latence de bout en bout et le taux de perte de paquets.

2.5.1 Scénario de Base et Modèles de Trafic

Le scénario de base s'appuie sur la topologie urbaine et la configuration des stations de base détaillées précédemment dans la Section 2.1. Les utilisateurs sont initialement statiques, répartis uniformément dans la zone de simulation, ce qui nous permet d'isoler l'impact des conditions de propagation et de la charge réseau sans les complexités de la mobilité pour cette phase de l'étude. La durée de chaque simulation est fixée à 12 secondes, et toutes les simulations sont exécutées un nombre suffisant de fois (e.g., 30 répétitions) avec des graines aléatoires différentes pour assurer la convergence statistique des résultats et la fiabilité des mesures.

Pour la caractérisation des performances, différents modèles d'application NS-3 ont été utilisés, chacun adapté à la métrique mesurée :

- **Test de Débit** : Pour évaluer le débit et la capacité du réseau en fonction de la distance, l'application BulkSend a été déployée. Elle génère un flux de données continu et maximal, permettant de saturer le lien pour mesurer la capacité maximale. La taille des paquets a été fixée à 1200 octets.
- **Test de Latence** : Pour l'évaluation de la latence de bout en bout, l'application UdpClient a été utilisée. Cette application envoie des paquets UDP de 200 octets avec un intervalle inter-paquet de 50 ms. Ce choix permet d'envoyer un flux de trafic léger et régulier, idéal pour mesurer le délai de transmission sans saturer le réseau.
- **Test de Fiabilité** : La fiabilité du lien a également été évaluée en utilisant l'application BulkSend avec une taille de paquets de 1200 octets. En observant le taux de paquets reçus par rapport aux paquets envoyés sous des charges et distances variées, nous pouvons caractériser la robustesse de la transmission.

2.5.2 Cas d'Étude et Paramètres Variés

Afin d'étudier l'influence de facteurs spécifiques sur les performances du réseau, les paramètres suivants ont été systématiquement variés pour créer différents cas d'étude :

- **Nombre d'Utilisateurs** : Les simulations ont été exécutées avec un nombre variable d'utilisateurs, allant de 1 à 60 utilisateurs par incréments de (10,30), afin d'évaluer l'impact de la charge réseau et de la densité d'utilisateurs sur la capacité et la qualité de service perçue.
- **Distance entre l'émetteur et le récepteur** : En complément de la variation du nombre d'utilisateurs, des simulations ont été menées en faisant varier la distance entre les utilisateurs et les stations de base (eNBs). Cette approche nous a permis d'évaluer l'impact de l'atténuation du signal et des conditions de propagation sur le débit, la latence et la fiabilité. Pour ce faire, les utilisateurs ont été positionnés à des distances spécifiques et croissantes des eNBs, permettant d'analyser les performances du réseau à différentes portées.
- **Fréquence de Fonctionnement** : Les performances sont comparées pour les deux bandes de fréquences clés : la bande mmWave (26 GHz) et la bande Sub-6 GHz (3.5 GHz), en utilisant les configurations spécifiques détaillées dans les Tableaux 2.2 et 2.3. Cette comparaison est essentielle pour analyser les avantages et inconvénients inhérents à chaque bande dans l'environnement urbain simulé.
- **Modèles de Propagation Spécifiques** : L'impact des conditions de visibilité (LOS / NLOS) est étudié en comparant des scénarios où le modèle *BuildingsChannelConditionModel* est activé ou désactivé, afin de comprendre son influence sur la connectivité et le débit.

Chaque scénario est conçu pour isoler et analyser l'effet d'un ou plusieurs paramètres spécifiques sur les performances du réseau, en gardant les autres paramètres constants pour faciliter l'interprétation des résultats.

Chapitre 3

Simulation et Analyse des résultats

3.1 Introduction

Ce chapitre se concentre sur l'analyse de trois métriques clés de performance : le débit, la latence et la fiabilité de la technologie 5G dans un environnement urbain.

3.2 Analyse du débit

3.2.1 Impact du spectre utilisé

Pour cette expérience, nous avons fait usage d'un nœud à une distance fixe (10m) de la base de l'antenne. Le nœud est un client eMBB qui utilise le protocole TCP. Les résultats sont les suivants :

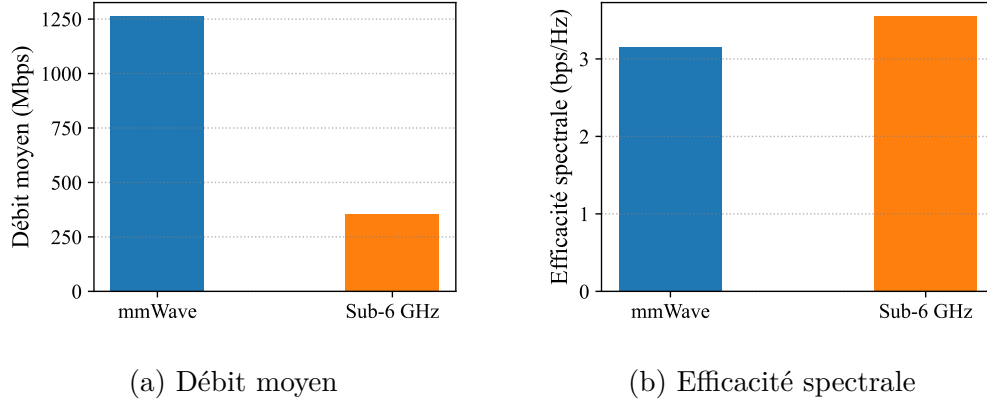


FIG. 3.1 : Impact du spectre utilisé sur le débit et l'efficacité spectrale.

Comme illustré à la Figure 3.1a, le débit moyen obtenu avec le spectre millimétrique est nettement supérieur à celui du spectre Sub-6 GHz. Cette différence s'explique principalement par la plus grande largeur de bande disponible (400 MHz contre 100 MHz), ce qui met en évidence l'avantage du spectre millimétrique pour répondre aux exigences élevées en capacité dans les zones urbaines denses.

En revanche, la Figure 3.1b montre que, bien que le débit absolu soit plus élevé avec la mmWave, l'efficacité spectrale — c'est-à-dire la quantité de bits transmis par hertz — [2] est légèrement meilleure dans le cas du spectre Sub-6 GHz. Cela suggère que, du point de vue de l'utilisation optimale des ressources spectrales, le Sub-6 GHz reste plus efficient, notamment dans les environnements à couverture étendue ou en présence de contraintes de propagation.

3.2.2 Impact de la distance

Dans ce scénario, nous allons mesurer le débit d'un nœud eMBB à des distances différentes du gNB, et observer comment cela affecte le débit.

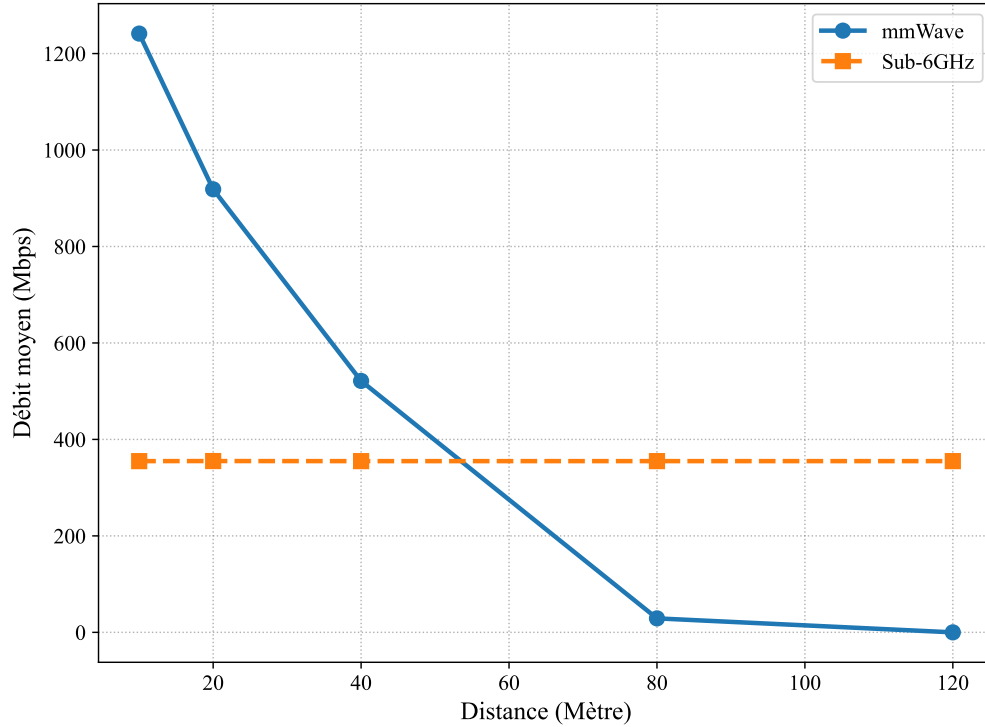


FIG. 3.2 : Débit moyen en fonction de la distance.

L'analyse de la Figure 3.2 met en lumière une limitation fondamentale de la technologie mmWave : sa haute sensibilité à la distance de propagation par rapport au Sub-6 GHz. On observe une chute drastique du débit pour la liaison mmWave, particulièrement dans les 80 premiers mètres. Cette performance est intrinsèquement liée à la qualité du canal physique, comme le confirment la Figure 3.4 (SINR vs. Distance) et la Figure 3.3 (MCS vs. Distance). En effet, l'augmentation de la distance provoque une forte atténuation du signal, ce qui entraîne une chute du SINR. En réponse, le mécanisme d'adaptation de lien sélectionne un MCS moins efficace pour maintenir la fiabilité de la connexion. Cette sélection d'un MCS inférieur réduit mécaniquement le nombre de bits pouvant être encodés par symbole, ce qui se traduit par une baisse significative du débit de données utile mesuré au niveau de la couche application.

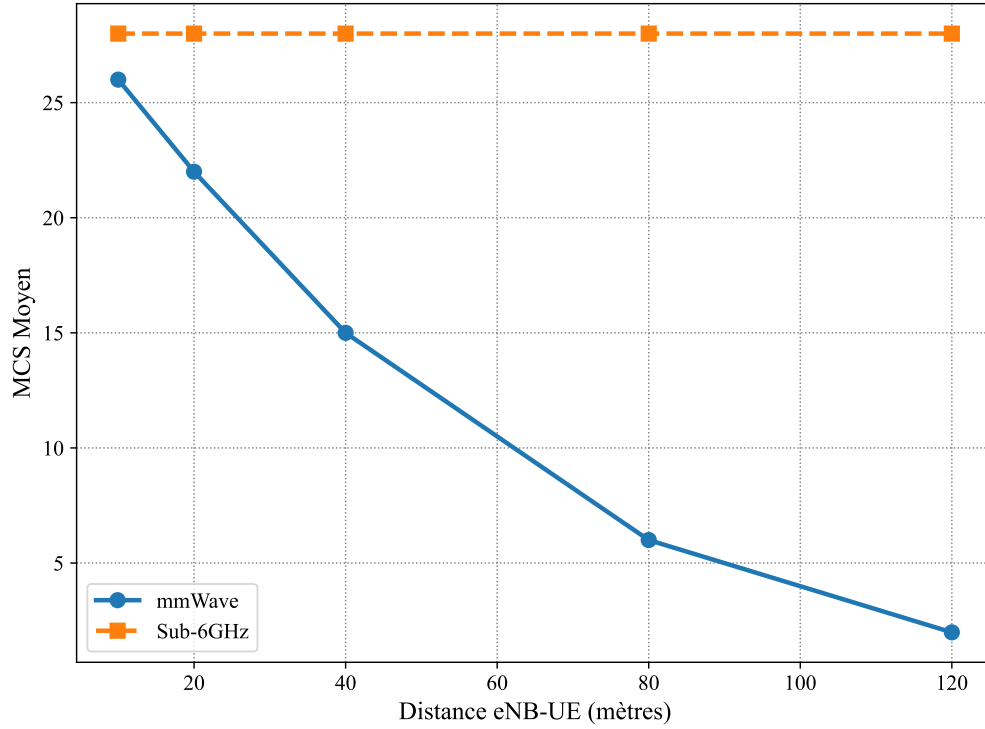


FIG. 3.3 : MCS moyen en fonction de la distance.

Par opposition à la technologie mmWave, le spectre Sub-6 GHz présente une résilience à la distance bien supérieure, comme l'illustre la Figure 3.2. Alors que le débit mmWave s'effondre rapidement, celui du Sub-6 GHz reste remarquablement constant, assurant une performance stable sur la majorité de la zone de test. L'analyse des métriques de la couche physique (Figures 3.3 et 3.4) révèle la cause de cette stabilité : le signal à 3.5 GHz subit une atténuation beaucoup plus faible, ce qui permet de maintenir un SINR et un MCS élevés et constants sur de longues distances. Le compromis fondamental de cette technologie réside cependant dans sa bande passante limitée, qui plafonne son débit maximal à un niveau inférieur à celui atteignable par mmWave dans des conditions optimales.

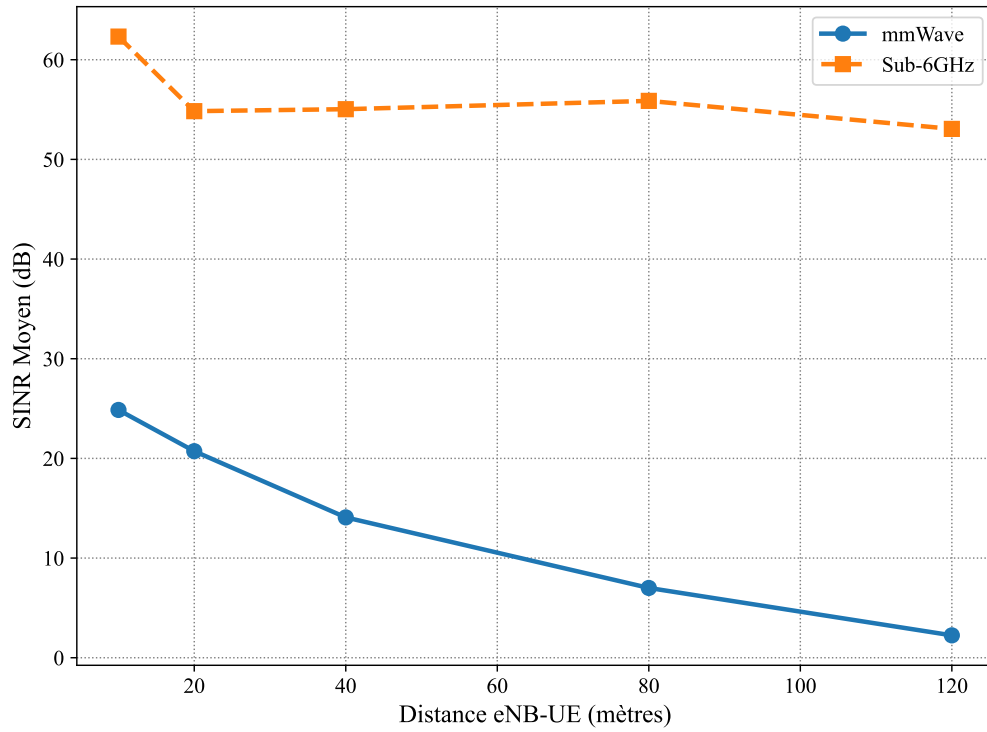


FIG. 3.4 : SINR moyen en fonction de la distance.

3.2.3 Impact du nombre d'UE

Dans ce scénario, nous distribuerons uniformément les nœuds eMBB (UE) à l'extérieur en utilisant une mobilité à position constante.

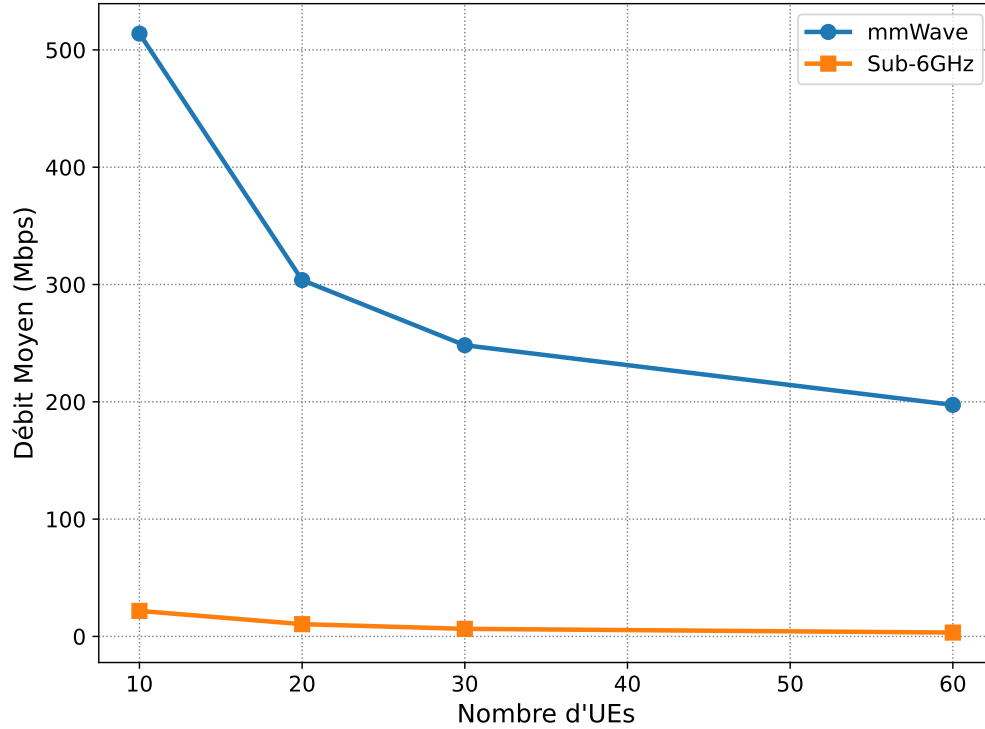


FIG. 3.5 : Débit Moyen en fonction du nombre du UEs.

Il ressort de la Figure 3.5 que le débit du spectre millimétrique décroît de manière substantielle avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs. Cette observation indique un partage inhérent de la bande passante et du temps d'antenne entre les unités d'équipement (UEs). Compte tenu de l'implémentation du planificateur MAC MmWaveFlexTtiPfMacScheduler, qui ne fait appel à aucun mécanisme de qualité de service (QoS), la diminution du débit peut être directement attribuée à la compétition entre les UEs pour l'accès au canal. Le spectre sub-6 GHz manifeste un comportement similaire, où le débit diminue à mesure que le nombre d'UEs s'accroît cependant, son débit moyen est notablement inférieur à celui de la bande mmWave.

3.3 Analyse de la Latence et la Gigue (Jitter)

3.3.1 Variation avec la distance

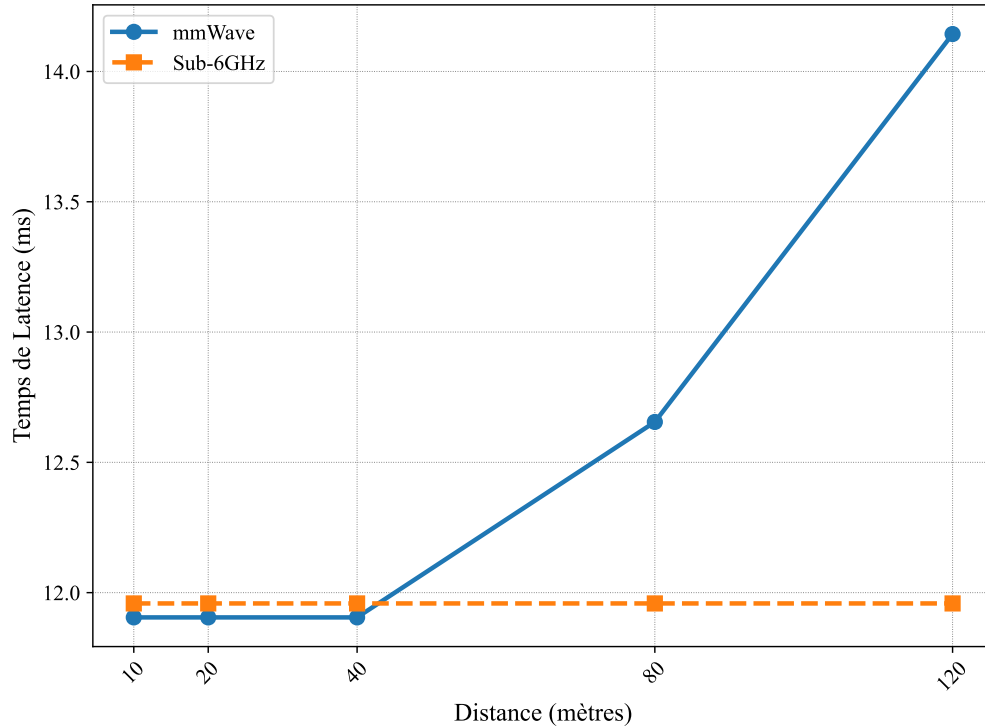


FIG. 3.6 : Latence Moyenne en fonction de la distance.

La Figure 3.6 illustre un compromis fondamental entre les technologies mmWave et Sub-6GHz en matière de latence. Si la bande millimétrique offre une latence minimale inférieure dans des conditions de ligne de vue quasi parfaites (jusqu'à 40 mètres), sa performance se dégrade à mesure que la liaison se fragilise. L'ascension de la latence observée entre 40 et 120 mètres s'explique par le travail constant du système pour maintenir une connexion stable. La recherche de faisceaux et l'adaptation aux trajets multiples [4], nécessaires lorsque le chemin direct n'est plus optimal, introduisent un délai de traitement qui s'ajoute au temps de propagation. Le spectre Sub-6GHz, bien que présentant une latence de base légèrement supérieure, démontre une

bien meilleure stabilité, sa performance restant insensible à l'augmentation de la distance dans cette plage, ce qui en fait une technologie plus prévisible pour les applications sensibles à la latence sur de plus longues portées.

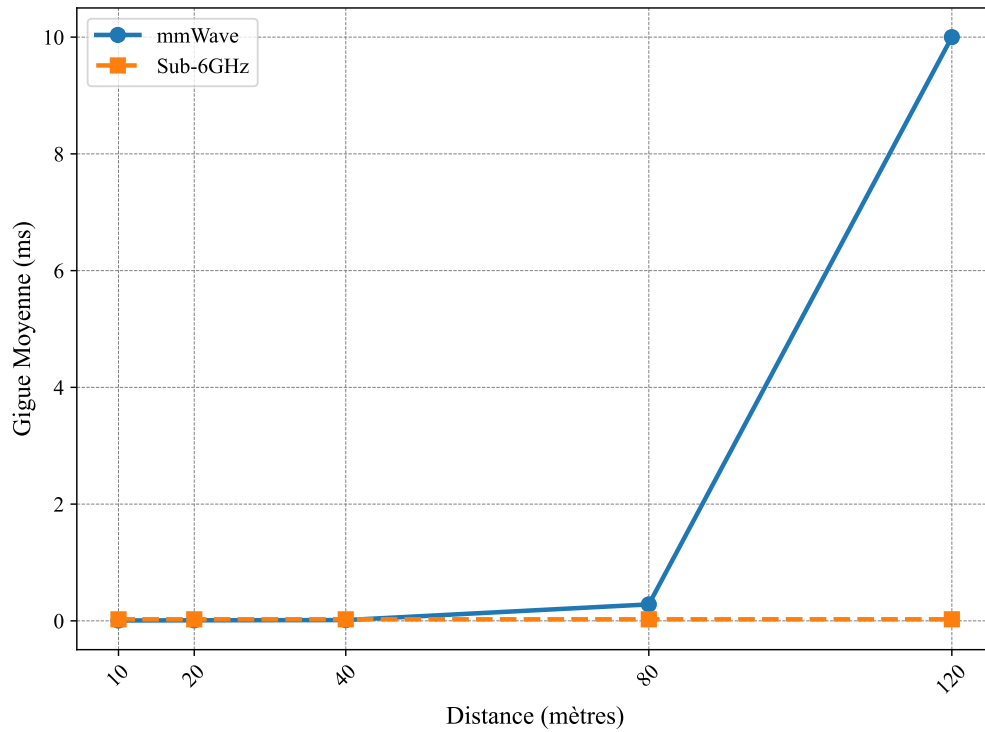


FIG. 3.7 : Jitter Moyen en fonction de la distance.

En corrélation directe avec l'augmentation de la latence, la Figure 3.7 montre une dégradation significative de la stabilité de la liaison mmWave avec la distance. La gigue (jitter), initialement faible, augmente considérablement entre 80 et 120 mètres, atteignant un pic de 10 ms. Cette variabilité accrue des délais de transmission est imputable à l'instabilité du canal : à mesure que la liaison s'affaiblit, les mécanismes de gestion de faisceaux et les micro-retransmissions introduisent des délais non constants, ce qui augmente la gigue. En revanche, la bande Sub-6GHz démontre une fiabilité supérieure, avec une gigue quasi nulle sur toute la plage de simulation, attestant de la grande stabilité de son canal de propagation.

3.3.2 Variation avec la charge réseau

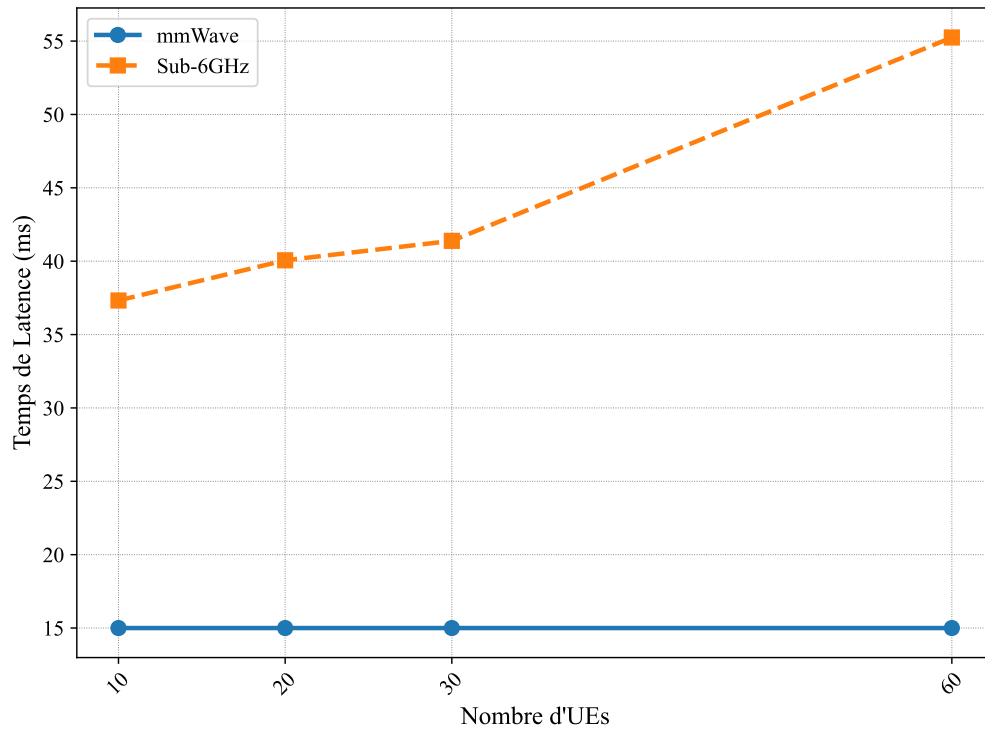


FIG. 3.8 : Latence Moyenne en fonction du nombre du UEs.

La Figure 3.8 révèle un contraste saisissant dans la manière dont les deux technologies gèrent la congestion du réseau. Alors que la latence de la liaison Sub-6GHz est non seulement plus élevée à la base, mais se dégrade également de manière linéaire avec l'ajout de chaque utilisateur, la liaison mmWave affiche une stabilité remarquable. Sa latence reste fixe à environ 15 ms, même sous une charge de 60 utilisateurs.

Cette dichotomie s'explique par la différence fondamentale de capacité. La bande passante de 100 MHz du Sub-6GHz devient rapidement un goulot d'étranglement, provoquant une accumulation dans les tampons de l'eNodeB et donc une augmentation de la latence. À l'inverse, la bande passante de 400 MHz du mmWave est tellement vaste qu'elle opère bien en deçà de son point de saturation dans nos scénarios, éliminant de fait la latence liée à la

congestion. Pour les applications eMBB en milieu dense, la technologie mmWave est donc non seulement supérieure en termes de débit, mais également en termes de prévisibilité de la latence.

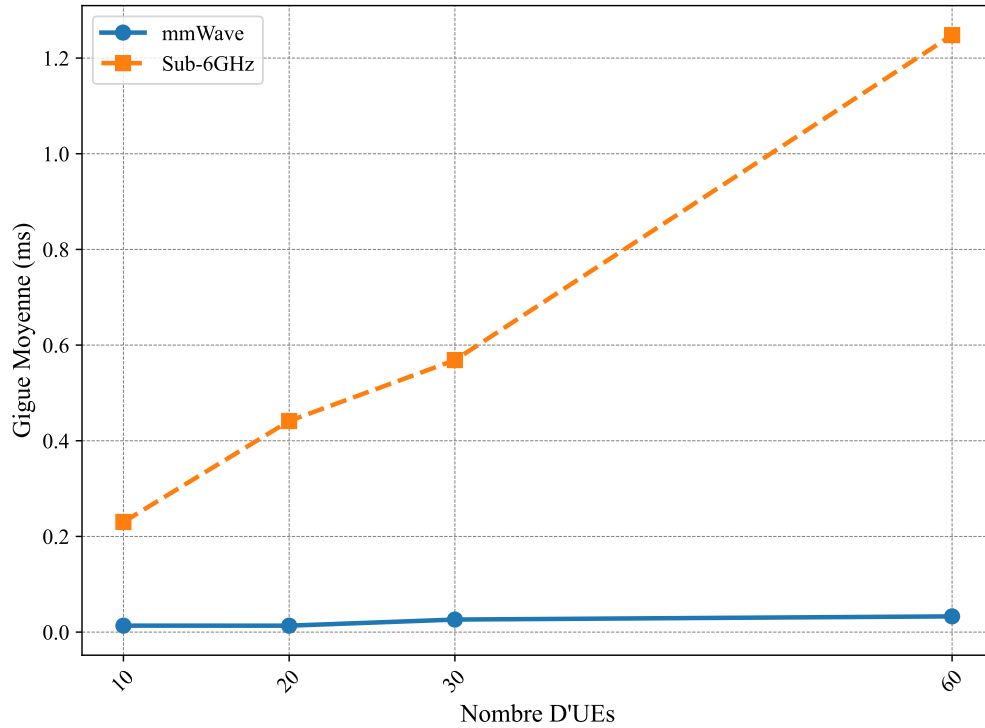


FIG. 3.9 : Jitter Moyen en fonction du nombre du UEs

L'étude de la gigue en fonction de la charge du réseau (Figure 3.9) corrobore nos conclusions précédentes sur la latence. La liaison mmWave se distingue par une gigue quasi inexistante, attestant de l'absence de congestion significative dans la plage de charge étudiée. La capacité du canal à traiter le flux de données sans créer de files d'attente variables se traduit par une stabilité remarquable des délais de transmission.

En contraste, la liaison Sub-6GHz, bien que présentant une gigue modérée, affiche une corrélation positive entre le nombre d'utilisateurs et la variabilité des délais. Cette tendance, bien que non critique aux charges testées, indique que le système approche de son point de saturation, où la gestion des

files d'attente devient moins prévisible. Il est donc possible de conclure que la supériorité de la technologie mmWave pour les services en temps réel ne réside pas uniquement dans sa faible latence moyenne, mais également dans sa capacité à maintenir une gigue minimale, même sous une charge réseau élevée.

3.4 Analyse de la fiabilité

3.4.1 Variation avec la distance

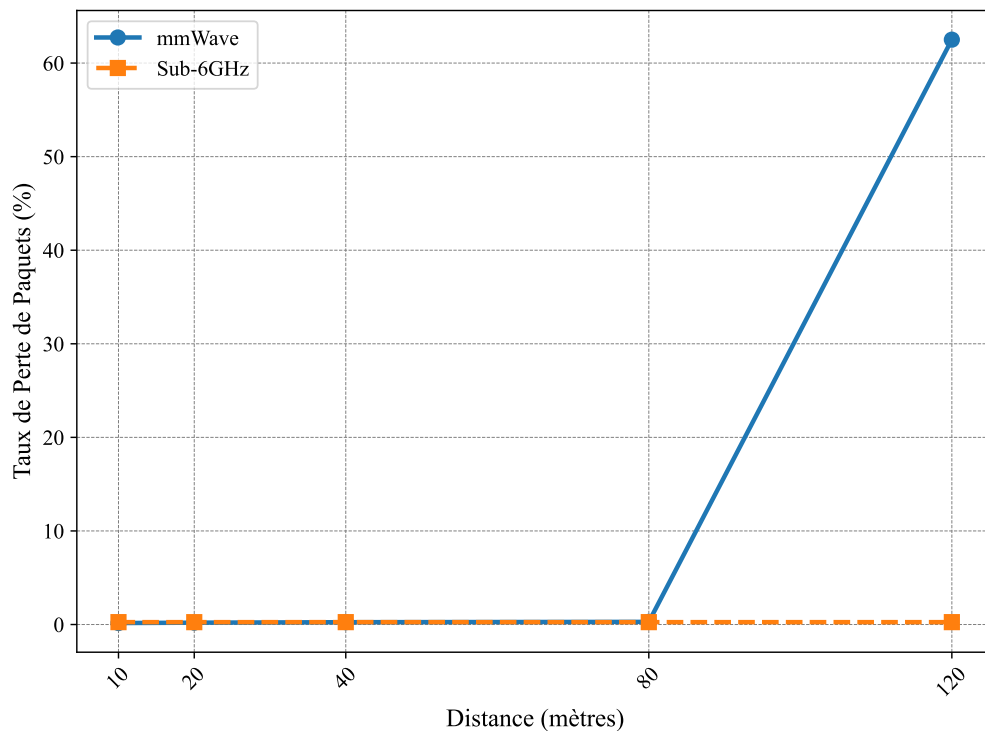


FIG. 3.10 : Perte de Paquets en fonction de la distance

La Figure 3.10 illustre de manière frappante le compromis entre capacité et fiabilité. Alors que les deux technologies offrent une transmission sans

perte à courte et moyenne portée (jusqu'à 80 mètres), leurs performances divergent radicalement à plus longue distance. La technologie mmWave, bien que capable de hauts débits, devient rapidement inutilisable, perdant plus de la moitié de ses paquets à 120 mètres. Cette "falaise de performance" (cliff effect) est une caractéristique inhérente aux hautes fréquences. Le spectre Sub-6GHz, à l'inverse, démontre sa valeur en tant que couche de couverture fiable, maintenant une connexion sans erreur sur l'ensemble de la topologie testée. Ces résultats prouvent que si la technologie mmWave est une solution pour des "îlots de capacité", elle ne peut, à elle seule, garantir une connectivité fiable et omniprésente, un rôle pour lequel le Sub-6GHz reste indispensable.

3.4.2 Variation avec la charge réseau

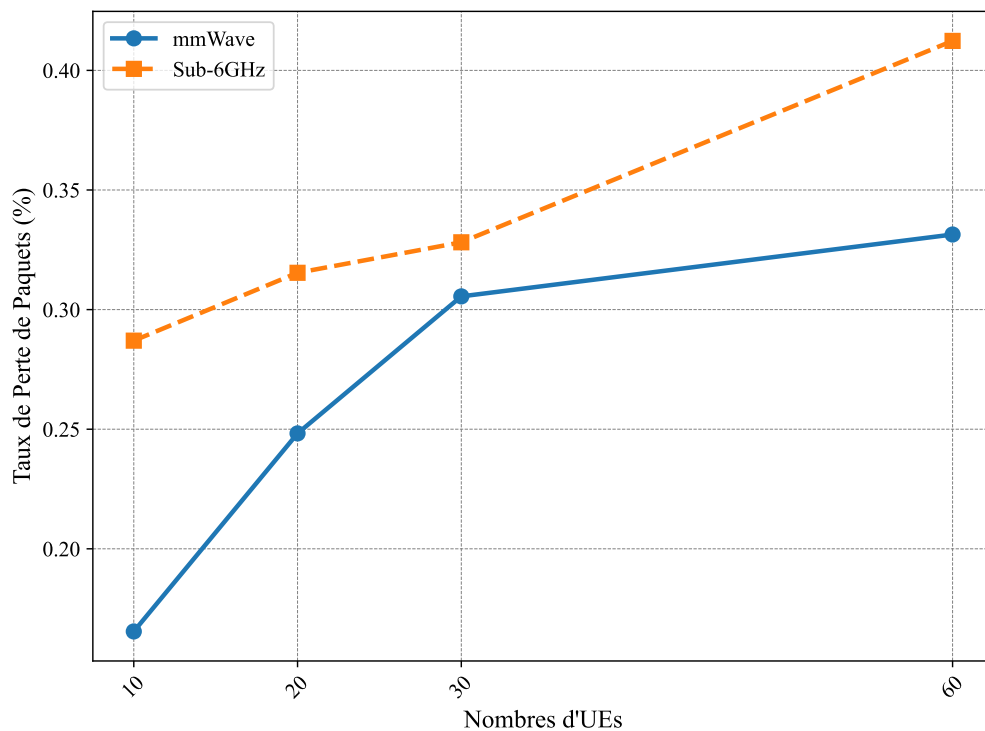


FIG. 3.11 : Perte de Paquets en fonction du nombre du UEs.

La Figure 3.11 révèle un aspect crucial de la performance du réseau : la gestion de la congestion. Bien que les deux technologies affichent une tendance ascendante de la perte de paquets avec l'augmentation de la charge, le taux de perte demeure remarquablement bas (inférieur à 1%). Ce résultat, qui pourrait à première vue suggérer une excellente scalabilité, doit être interprété à la lumière des résultats de débit précédents. La faible perte de paquets n'est pas le signe d'une capacité illimitée, mais la conséquence directe de l'auto-régulation du trafic par TCP. En réponse à la congestion naissante, les flux TCP réduisent leur débit, sacrifiant la vitesse pour garantir la fiabilité de la transmission. La pente légèrement plus prononcée pour le Sub-6GHz indique que son seuil de congestion est atteint plus rapidement en raison de sa bande passante plus limitée. Cette analyse démontre que, dans un réseau TCP, la dégradation de la performance sous charge se manifeste d'abord par une baisse du débit par utilisateur, bien avant que la perte de paquets ne devienne significative.

3.5 Conclusion

En conclusion, cette étude a permis de quantifier les gains de performance de la 5G New Radio par rapport à une étude antérieure de la 4G LTE [6] à travers l'analyse de trois métriques fondamentales. Premièrement, en termes de débit, nos simulations démontrent une capacité significativement accrue pour la 5G NR, se traduisant par un débit par utilisateur plus élevé. Deuxièmement, concernant la latence, l'utilisation du spectre mmWave en 5G NR permet d'atteindre des délais de transmission bien plus faibles, offrant ainsi une meilleure qualité de service pour les applications sensibles. Enfin, pour la fiabilité, puisque les deux technologies s'appuient sur des mécanismes de retransmission similaires (TCP, HARQ, RLC-AM), nos résultats confirment que la 5G NR maintient un niveau de fiabilité comparable et robuste, conforme aux standards établis par la 4G LTE.

Conclusion Générale

Ce travail de thèse a été initié pour répondre aux limitations de performance des réseaux 4G LTE et pour évaluer quantitativement les promesses de la nouvelle interface radio 5G NR dans une architecture de déploiement non autonome (NSA).

Nos objectifs principaux étaient de comparer les performances des bandes de fréquences mmWave et Sub-6GHz, d'analyser leur comportement sous différentes conditions de charge et de propagation, et d'identifier les limitations de l'architecture 5G NSA.

Nos simulations ont systématiquement mis en évidence un compromis fondamental : la technologie mmWave offre une capacité de débit de pointe très élevée, mais au prix d'une faible portée et d'une forte sensibilité aux obstacles. Inversement, la bande Sub-6GHz garantit une couverture beaucoup plus robuste et fiable, mais avec un potentiel de débit plus limité.

Nous avons démontré que la chute rapide du débit en mmWave avec la distance (résultat du chapitre 5.7.2) est une conséquence directe de la dégradation du SINR, forçant le système à utiliser des schémas de modulation et de codage (MCS) moins efficaces.

En matière de latence, nos expériences ont révélé que la large bande passante de la technologie mmWave la rend moins susceptible à la congestion, offrant ainsi une meilleure qualité de service pour les flux de type URLLC lorsque le réseau est fortement chargé. De plus, nos tests sur la fiabilité ont quantifié l'importance des mécanismes TCP pour maintenir une connexion stable face aux erreurs de canal.

Ces résultats suggèrent qu'une stratégie de déploiement hétérogène est

la plus viable. Les opérateurs devraient s'appuyer sur le Sub-6GHz pour assurer une couche de couverture macro-cellulaire continue et fiable, tout en déployant des micro-cellules mmWave de manière ciblée dans les zones à très forte densité d'utilisateurs (hotspots) pour fournir une capacité de pointe.

Notre analyse des limitations du cœur 4G EPC pour gérer le trafic URLLC valide la transition de l'industrie vers un cœur de réseau 5G (5GC) natif, qui est indispensable pour réaliser pleinement la promesse de la 5G et préparer le terrain pour la 6G.

Il est important de noter que nos simulations ont été menées avec des utilisateurs statiques. L'introduction de la mobilité des utilisateurs représenterait une couche de complexité supplémentaire, notamment pour la gestion des faisceaux en mmWave.

De plus, bien que le module ns-3 soit très détaillé, il ne modélise pas toutes les fonctionnalités des équipements des fabricants réels. Nos résultats représentent donc une évaluation de la performance du standard lui-même, et non d'un produit commercial spécifique.

Une extension naturelle de ce travail serait d'intégrer des modèles de mobilité réalistes pour étudier l'impact des transferts inter-cellulaires (handovers) sur la performance. De plus, l'implémentation d'un ordonnanceur MAC sensible à la Qualité de Service (QoS) permettrait d'analyser plus en profondeur la coexistence des services eMBB et URLLC.

À plus long terme, cette plateforme de simulation pourrait être étendue pour explorer des technologies candidates pour la 6G, telles que l'utilisation de surfaces intelligentes reconfigurables (RIS) pour améliorer la couverture mmWave en milieu urbain.

Bibliographie

- [1] 5Gtopix. 5g harq : Mécanismes et fonctionnement détaillé. <https://5gtopix.com/5g-harq-mecanismes-et-fonctionnement-detaille/>, 2025.
- [2] AccelerComm. Spectral efficiency. <https://www.accelercomm.com/spectral-efficiency>, n.d. Accessed : 2025-07-02.
- [3] Landry Aguehounde. Conception d’algorithme de la couche physique de wimax sous ns3, 2014. Disponible en ligne.
- [4] Ahmed Alkhateeb, Omar El Ayach, Geert Leus, and Robert W. Heath. Channel estimation and hybrid precoding for millimeter wave cellular systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 8(5) :831–846, 2014.
- [5] Université de Tlemcen. Dspace université de tlemcen - thèse ou document. <http://dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/23504>, 2025. Consulté le 5 juillet 2025.
- [6] Hachemi melek Djefjel ikram. Évaluation des performances des réseaux mobiles. *Univ DR Taher Moulay Saida*, page 69, 06 2023.
- [7] Abdelkader El Fayedh. 5g vs 4g : Comprendre la différence. <https://iotindustriel.com/autres/technologies/4g-5g/reseau-5g-vs-reseau-4g/>, 2021.
- [8] Yahiaoui Hamza and Lounnas Redouane. *Étude des Performances des Réseaux 4G LTE*. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri, 2017.
- [9] Sacha Kavanagh Jon Mundy. What is massive mimo technology? <https://5g.co.uk/guides/what-is-massive-mimo-technology/>, What Is Massive MIMO Technology? Accessed : 2025-07-02.

- [10] PEREIRA Jose Liborio KABORE Karim. Etude de passage de la 4g vers la 5g. <http://e-biblio.univ-mosta.dz/bitstream/handle/123456789/20177/P.F.E-VERSION1%20corrige%20%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, 2021.
- [11] Ao Li. *Performances des codes correcteurs d'erreur LDPC appliqués au lien Fronthaul optique haut débit pour l'architecture C-RAN du réseau 5G : conception et implantation sur FPGA*. Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2017. Français. <https://theses.hal.science/tel-01744890>.
- [12] Marco Mezzavilla, Menglei Zhang, Michele Polese, Russell Ford, Sourjya Dutta, Sundeep Rangan, and Michele Zorzi. End-to-end simulation of 5g mmwave networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 20(3) :2237–2263, 2018.
- [13] Boris Moret. *Amplificateur de puissance autonome pour applications OFDM et beamforming de la 5G aux fréquences millimétriques en technologie CMOS avancée*. PhD thesis, Université de Bordeaux, 2017.
- [14] Manuel Eugenio Morocho-Cayamcela, Haeyoung Lee, and Wansu Lim. Machine learning for 5g/b5g mobile and wireless communications : Potential, limitations, and future directions. *IEEE Access*, 7:137184–137206, 09 2019.
- [15] ns-3 Consortium. 5g lena and mmwave nr module for ns-3. <https://www.nsnam.org/docs/models/html/buildings.html>, 2024. Accessed : 2024-06-19.
- [16] NYBsys. 5g mmwave vs sub-6. <https://nybsys.com/5g-mmwave-vs-sub-6/>, 2025. Consulté le 22 juin 2025.
- [17] Gérard Berry Serge Abiteboul. Quelles seront les applications concrètes de la 5g? <https://theconversation.com/quelles-seront-les-applications-concretes-de-la-5g-170843>, 2021.
- [18] IEEE Spectrum. 5g bytes : Beamforming explained. <https://spectrum.ieee.org/5g-bytes-beamforming-explained>, 2025. Consulté le 19 juin 2025.

- [19] NS-3 Development Team. *ns-3 Network Simulator Manual*, 2024. Accessed : 2025-06-20.
- [20] Biblio Techno. Comment mesurer la latence sur un réseau de communication 5g. <https://www.actutem.com/comment-mesurer-la-latence-sur-un-reseau-de-communication-5g/>, 2024.
- [21] Frederick W Vook, Amitava Ghosh, and Timothy A Thomas. MIMO and beamforming solutions for 5g technology. In *2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014)*, pages 1–4. IEEE, 2014.
- [22] Abdemoultalib Wahi. Réseau de cinquième génération 5g. <https://fr.scribd.com/document/701466555/PFE-5G-2024?v=0.591>, 2023. Consulté le 19 juin 2025.
- [23] Wraycastle. Qu'est-ce que l'urllc dans la 5g? https://wraycastle.com/fr/blogs/glossaire-des-termes-de-la-technologie-des-telecommunications/what-is-urllc-in-5g?_pos=2&_sid=85d2fc521&_ss=r, 2025. Consulté le 19 juin 2025.
- [24] Wraycastle. Understanding massive MIMO and beamforming : A simple guide for everyone. <https://wraycastle.com/fr/blogs/base-de-connaissances/understanding-massive-mimo-and-beamforming-a-simple-guide-for-everyone>, 2025. Consulté le 19 juin 2025.
- [25] Paweł Zajączkowski. 5g : What is the key to low latency? <https://xebia.com/blog/5g-what-is-the-key-to-low-latency-2/>, 2020.
- [26] Qiuming Zhu, Cheng-Xiang Wang, Boyu Hua, Mao Kai, Shan Jiang, and Mengtian Yao. *3GPP TR 38.901 Channel Model*, pages 1–35. 01 2021.