

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTÈRE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE MIRA - BEJAIA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT ATE



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES
EN VUE D'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER
OPTIONS RÉSEAU DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

Dimensionnement et planification
d'un réseau 5G dans le port de
Béjaïa (BMT)

Réalisé par :

Mlle. KEDDAD Ferroudja
Mlle. MADADI Lynda

Encadré par :

Mr. BELLAHSENE Hocine
Mr. LATRECHE Sofiane

Membre de jury :

Mr. KHIREDDINE Abdelkrim
Mr. TOUNSI Mohamed

Promotion 2024 - 2025

Dédicace

Je dédie ce travail :

À **Dieu**, pour sa lumière, sa protection et ses nombreuses bénédictions.
Sans Lui, rien n'aurait été possible.

À ma **famille**, pour tout l'amour et le soutien qu'elle m'a toujours donnés. Merci d'avoir cru en moi, même dans les moments difficiles.

À mes **frères et sœurs**, pour vos encouragements et votre présence. Vous m'avez toujours motivé à continuer.

À mes **amis**, pour votre aide, vos conseils, votre bonne humeur et votre amitié sincère. Merci d'avoir été là tout au long de ce parcours.

-Ferroudja-

Dédicace

Je dédie ce travail :

À ma chère maman,

Merci pour tous tes sacrifices et ton soutien. Tu as toujours été là pour moi, depuis le début. Ton amour m'a donné la force d'avancer.

À mon cher papa,

Merci pour ton amour et tous les efforts que tu as faits pour me permettre d'étudier dans de bonnes conditions. Ton soutien a beaucoup compté pour moi.

-Lynda

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu Tout-Puissant, qui nous a donné la force, la patience et le courage pour terminer ce travail.

Nous remercions très sincèrement Monsieur Hocine BELLAHSENE pour sa disponibilité, ses conseils et son aide tout au long de ce mémoire. Grâce à ses remarques et à son accompagnement, nous avons pu avancer avec plus de confiance.

Nous remercions aussi Monsieur Sofiane LATRECHE pour son suivi et ses conseils, qui nous ont beaucoup aidés à améliorer notre travail.

Nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté de lire et d'évaluer ce mémoire. Leurs remarques seront utiles pour la suite de nos études et de notre vie professionnelle.

Enfin, un grand merci à nos camarades et amis pour leur soutien tout au long de ce parcours. Merci aussi à toutes les personnes, de près ou de loin, qui nous ont aidés à réaliser ce mémoire.

Table des matières

Table des matières	I
Table des figures	V
Liste des tableaux	VII
Liste des abréviations	VIII
Introduction générale	1
1 Présentation du réseau 5G et son évolution	3
1.1 Introduction	4
1.2 Principe de base d'un réseau mobile	4
1.3 Évolution des réseaux mobiles	5
1.4 La quatrième génération	6
1.4.1 Limitations de la 4G	6
1.5 La cinquième génération	7
1.6 Architecture générale d'un réseau 5G	8
1.6.1 Équipements utilisateurs (UE)	8
1.6.2 Le réseau d'accès radio 5G (RAN)	9
1.6.3 Le cœur de réseau 5G	9
1.7 Les modes de déploiement du réseau 5G	10
1.8 Technique d'accès multiple	11
1.8.1 Massive MIMO	11
1.8.2 Beamforming	12
1.8.3 La technique Space Division Multiple Access	12
1.8.4 La technique RSMA (Rate-Splitting Multiple Access)	13
1.8.5 La technique NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access)	13
1.9 Structure de la trame	13

I

1.10	Modèle des canaux	14
1.10.1	Les canaux physiques	14
1.10.2	Canaux de transport	15
1.10.3	Canal logique	15
1.11	Conclusion	15
2	Présentation de l'entreprise Portuaire de Béjaïa (BMT)	17
2.1	Introduction	18
2.2	Présentation du port de Béjaïa	18
2.3	Présentation de BMT	18
2.3.1	Organisation de BMT et ses différentes structures	19
2.4	Réseau utilisé dans le port	20
2.4.1	Les limites et critiques du réseau 4G	20
2.4.2	Limites de couverture dans la zone des conteneurs	21
2.5	Solutions pour améliorer la couverture réseau	21
2.5.1	Utiliser des relais temporaires	21
2.5.2	Utiliser des drones comme relais	21
2.5.3	Installer une antenne 5G dédiée	22
2.5.4	La solution par satellite	22
2.6	Les avantages de la 5G pour le port	22
2.7	Conclusion	23
3	Dimensionnement et planification d'un réseau 5G pour la BMT	24
3.1	Introduction	25
3.2	Dimensionnement de la couverture	25
3.3	Bilan de liaison	25
3.4	Choix du modèle de propagation	27
3.4.1	Modèle de perte en espace libre (Free Space Path Loss - FSPL) :	28
3.4.2	Modèle COST 231-Hata :	28
3.4.3	Modèle Okumura-Hata :	29
3.4.4	Le modèle Urban Macro (UMa)	30
3.4.5	Le modèle Urban Micro (UMi)	31
3.4.6	Le modèle Rural Macro (RMa)	31
3.5	Calcul du nombre de sites	31
3.6	Processus de dimensionnement	32

3.7	Planification d'un réseau mobile	34
3.8	Objectif de la planification	34
3.9	Processus de planification	34
3.9.1	Pré-planification	35
3.9.2	Planification	35
3.9.3	Planification détaillée	35
3.9.4	Vérification et Acceptation	36
3.9.5	Optimisation	36
3.10	Conclusion	36
4	Simulation et Discussion des Résultats	37
4.1	Introduction	38
4.2	Analyse de cas du port de Bejaïa et importation de la carte géographique	38
4.2.1	Description de l'importation de la carte	39
4.3	Étude de l'existence du réseau actuel	40
4.3.1	La couverture de l'eNodeB	41
4.4	Installation de réseau gNodeB	41
4.4.1	Antenne Massive MIMO gNodeB	42
4.4.2	Le choix des paramètres de l'antenne Massive MIMO	43
4.5	Simulation de la couverture d'une antenne Massive MIMO dotée de 16 faisceaux	44
4.5.1	Simulation de la couverture d'une antenne Massive MIMO dotée de 32 faisceaux	46
4.6	Analyse du SINR en fonction de la distance	48
4.7	Débit en fonction de la distance	48
4.8	Étude des pertes de propagation	50
4.9	Amélioration du modèle UMA par l'intégration de la probabilité de visibilité (LoS/NLoS)	52
4.10	Conclusion	54
	Conclusion	55
	Annexe	56
	Annexe	59
	Bibliographie	60

Webographie	61
-------------	----

Table des figures

1.1	Concept cellulaire	5
1.2	Evaluation des réseaux cellulaires	5
1.3	Comparaison entre la 4G et la 5G	7
1.4	Architecture générale	8
1.5	Architecture du cœur 5G[4]	9
1.6	Déploiements NSA et SA	10
1.7	Massive MIMO	12
1.8	Beamforming	12
1.9	Structure de la trame 5G[8]	14
2.1	BMT	19
2.2	Organigramme de BMT	19
3.1	Bilan de liaison gNodeB	26
3.2	Processus de dimensionnement	32
3.3	Etape de planification d'un réseau cellulaire	34
4.1	Le port de Bajaia	39
4.2	L'emplacement de la station de base eNodeB	40
4.3	La couverture de l'eNodeB	41
4.4	Emplacement antenne massive MIMO gNodeB	42
4.5	Propagation d'une antenne Massive MIMO à 16 faisceaux	46
4.6	Propagation d'antenne massive MIMO à 32 faisceaux	47
4.7	Variation du SINR en fonction de la distance dans les contextes LoS et NLoS	48
4.8	Étude comparative du débit en fonction de la distance dans les contextes LoS et NLoS	49
4.9	Influence de la distance sur le débit et le choix de la modulation . . .	50
4.10	Influence de la distance sur le débit et le choix de la modulation . . .	52

4.11	Les perte de probabilité de LOS en fonction de la distance	53
4.12	Débit en fonction de la distance intégrant la probabilité de visibilité LoS selon le modèle UMA amélioré	54

Liste des tableaux

1.1	Comparaison des performances entre la 4G et la 5G	7
3.1	Facteurs de correction selon le type de zone et la fréquence	29
3.2	Impact du SINR sur le débit et la qualité de la liaison	33
3.3	Les paramètres de la BMT	35
4.1	Paramètres d'antenne Massive MIMO	44
4.2	Paramètres clés des lobes d'antenne pour 16 faisceaux	45
4.3	Paramètres clés des lobes d'antenne pour 32 faisceaux	47
4.4	Débit, modulation et SINR en fonction de la distance pour scénarios LoS	50
4.5	Débit, modulation et SINR en fonction de la distance pour scénarios NLoS	51
4.6	Comparaison des pertes de propagation en fonction de la distance pour les scénarios LoS et NLoS	51
7	les trois sous- options de l'option 3	56
8	les deux sous- options de l'Option 4	57
9	les trois sous- options de l'option 7	57

Liste des abréviations

3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	Quatrième génération de réseau mobile
5G	Cinquième génération de réseau mobile
5GC	5G Core (Cœur de réseau 5G)
AF	Application Function
AMF	Access and Mobility Management Function
AUSF	Authentication Server Function
BMT	Béjaïa Mediterranean Terminal
BTS	Base Transceiver Station
CCE	Control Channel Element
CORESET	Control Resource Set
DG	Direction Générale
DM	Direction Marketing
DO	Direction des Opérations
DRH	Direction des Ressources Humaines
DFC	Direction des Finances et de la Comptabilité
DL-SCH	Downlink Shared Channel
DT	Direction Technique
EPC	Evolved Packet Core
EPB	Entreprise Portuaire de Béjaïa
eLTE	Enhanced LTE
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
eNodeB	Evolved Node B (station de base 4G)
FSPL	Free Space Path Loss
FUE	Facteur de bruit de l'équipement utilisateur
G	Génération de réseau mobile
GEO	Satellite en orbite géostationnaire
GgNB	Gain de la station de base 5G
gNodeB	Next Generation Node B (station de base 5G)
GUI	Graphical User Interface
HSE	Hygiène, Sécurité, Environnement
IA	Intelligence Artificielle
IoT	Internet des Objets

LTE	Long Term Evolution
LoS	Line of Sight
MAC	Medium Access Control
MAPL	Maximum Allowable Path Loss
Massive MIMO	MIMO massif (grand nombre d'antennes)
MEO	Satellite en orbite terrestre moyenne
MIMO	Multiple Input Multiple Output
mMTC	massive Machine-Type Communications
NEF	Network Exposure Function
NG-U	Next Generation User Plane
ng-eNB	Next Generation eNodeB
NLoS	Non-Line of Sight
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
NR	New Radio
NRF	Network Repository Function
NSA	Non-Standalone
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PCH	Paging Channel
PCF	Policy Control Function
PHY	Physical Layer
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PRB	Physical Resource Block
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
RCC	Radio Resource Control
RxS	Sensibilité du récepteur
RxSL	Niveau de signal reçu
SA	Standalone
SBA	Service-Based Architecture
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SDMA	Space Division Multiple Access
RSMA	Rate-Splitting Multiple Access
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SMF	Session Management Function
SPA	Société par Actions
TDMA	Time Division Multiple Access
UE	User Equipment

Liste des abréviations

UDM	Unified Data Management
UL-SCH	Uplink Shared Channel
UMA	Urban Macrocell
UPF	User Plane Function
URLLC	Ultra-Reliable Low Latency Communications

Introduction générale

Les technologies de communication mobile ont connu une évolution considérable au fil du temps. Elles ont profondément transformé notre manière de travailler, de produire, de communiquer et de gérer les flux d'informations. Aujourd'hui, la cinquième génération de réseau mobile, appelée 5G, constitue une avancée majeure. Cette nouvelle technologie ne se limite pas à offrir un débit de connexion plus élevé : elle propose également une latence extrêmement faible (quasi instantanée), une meilleure fiabilité, ainsi que la capacité de connecter un nombre très important d'équipements simultanément, sans altération de la qualité de service. Grâce à l'ensemble de ces améliorations, la 5G trouve des applications dans de nombreux secteurs tels que la santé, les transports, l'industrie et la logistique.

Les ports maritimes, comme celui de Béjaïa, peuvent tirer pleinement parti de ces atouts. Il s'agit d'environnements particulièrement dynamiques où de nombreux systèmes et équipements doivent fonctionner de manière coordonnée, qu'il s'agisse des caméras de surveillance, des capteurs, des grues ou encore des postes informatiques de gestion. Pour garantir la continuité et l'efficacité des opérations, il est indispensable de disposer d'un réseau rapide et fiable. Le port de Béjaïa, qui compte parmi les plus grands ports d'Afrique du Nord, joue un rôle déterminant dans le commerce extérieur de l'Algérie. Cependant, certaines zones du port, notamment les terminaux cotonniers, souffrent d'une connectivité limitée avec le réseau 4G actuel. La couverture y est souvent insuffisante, la connexion instable, voire inexistante, ce qui engendre des retards, des pertes d'informations et des difficultés dans l'exploitation des équipements modernes. Dans ce contexte, la 5G apparaît comme une solution particulièrement pertinente. Elle permettrait d'améliorer la qualité de la connectivité, de couvrir les zones mal desservies et de contribuer à la modernisation des infrastructures portuaires.

C'est dans cette perspective que s'inscrit ce mémoire. Il a pour objectif de proposer une solution claire, efficace et adaptée pour le déploiement d'un réseau 5G au sein du port de Béjaïa. Ce travail est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation de la technologie 5G, en détaillant ses principales caractéristiques, notamment le haut débit, la faible latence et la capacité de connexion massive. Ces éléments permettront de comprendre en quoi la 5G représente une évolution significative par rapport à la 4G.

Le deuxième chapitre décrit le port de Béjaïa : son organisation, ses activités principales et les difficultés rencontrées avec le réseau actuel, en particulier dans les zones à faible couverture, ce qui complique la gestion opérationnelle des équipements.

Le troisième chapitre porte sur la conception et la planification du réseau 5G au niveau du port. Il expose les critères de choix et de positionnement des antennes, les modèles de propagation retenus, ainsi que les différentes étapes nécessaires à l'implémentation d'un réseau performant, en prenant en compte les contraintes techniques et économiques.

Enfin, le dernier chapitre présente les résultats des simulations effectuées sous MATLAB, qui démontrent concrètement l'impact positif de la 5G sur la couverture et la qualité du réseau dans les zones critiques, permettant ainsi d'optimiser et de moderniser les opérations portuaires.

Pour conclure, ce mémoire met en évidence que la 5G constitue une solution efficace pour pallier les insuffisances de la 4G au port de Béjaïa. En améliorant la connectivité, elle contribue à rendre les activités plus rapides, plus fiables et plus modernes.

Chapitre 1

Présentation du réseau 5G et son évolution

1.1 Introduction

L'évolution des réseaux de communication mobile au fil des décennies a profondément transformé notre manière de communiquer et d'accéder à l'information. Cette transformation progressive s'est construite autour de différentes générations technologiques, chacune apportant son lot d'innovations. La première génération, appelée 1G, marque le début de la téléphonie mobile avec l'introduction d'un système analogique permettant uniquement les appels vocaux. Bien que rudimentaire, cette technologie a ouvert la voie à la mobilité des communications. La deuxième génération, ou 2G, a ensuite introduit la transmission numérique, améliorant considérablement la qualité des appels tout en inaugurant les services de messagerie texte (SMS), une avancée majeure dans les usages quotidiens. La 3G, quant à elle, a marqué un tournant décisif en apportant des débits de données bien plus élevés, permettant ainsi l'accès à Internet mobile, le transfert de contenus multimédias et l'émergence d'applications connectées.

Dans ce chapitre, nous aborderons les réseaux mobiles de quatrième et cinquième générations (4G et 5G) en présentant leurs principales caractéristiques et leur impact sur les technologies et les usages actuels.

1.2 Principe de base d'un réseau mobile

Le fonctionnement du réseau mobile est basé sur un concept cellulaire, c'est-à-dire que la région couverte est divisée en petites zones appelées cellules (généralement de forme hexagonale). Les fréquences radio sont partagées entre ces cellules. Ainsi, chaque cellule est constituée d'une station de base à laquelle est associé un certain nombre de canaux de fréquences. Ces fréquences ne peuvent pas être utilisées simultanément par des cellules suffisamment proches.

Le nombre de communications simultanées qu'une station de base peut gérer est limité par le nombre de porteuses (fréquences) disponibles. L'opérateur utilise des microcellules, d'un rayon de quelques centaines de mètres, pour supporter un trafic important par unité de surface dans les zones urbaines. Souvent, ces zones sont couvertes par des antennes sectorielles à gain élevé (11 dB), comparées aux antennes omnidirectionnelles (9 dB). Dans les zones rurales peu peuplées, les cellules sont de plus grande taille (allant jusqu'à 30 km de diamètre) et sont alors appelées « macrocellules ».

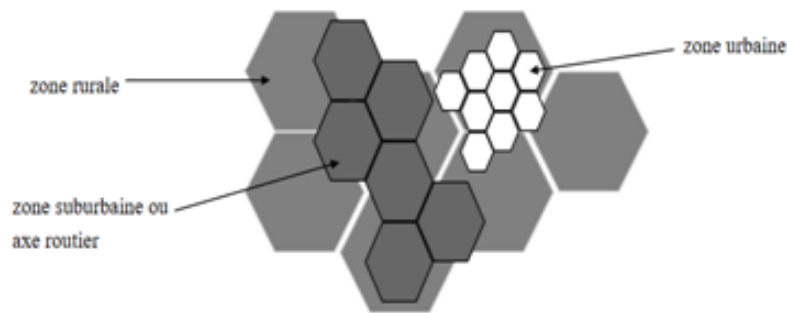


FIGURE 1.1 – Concept cellulaire

1.3 Évolution des réseaux mobiles

Un réseau téléphonique constitue un système de communication électronique destiné à offrir des services téléphoniques au grand public. Il permet la transmission de différents types de contenus entre les points de terminaison du réseau, incluant la voix, la vidéo et le texte.

Au fil des années, plusieurs générations de réseaux cellulaires ont été mises en place, débutant avec la 1G, qui reposait sur une technologie analogique et ne permettait que la transmission de la voix, sans support pour les données numériques ni les messages textuels. La 2G a marqué la transition vers le numérique. La 3G a introduit la première norme permettant l'échange simultané de voix et de données, offrant des vitesses adéquates pour répondre aux besoins des applications multimédias légères. La quatrième génération, la 4G, a su tirer parti des avantages de la 3G tout en intégrant un accès à Internet plus performant, facilitant ainsi l'usage de l'Internet mobile.

L'avènement de la 5G représente une avancée technologique significative, répondant aux exigences croissantes de la société numérique et ouvrant la voie à de nouvelles.

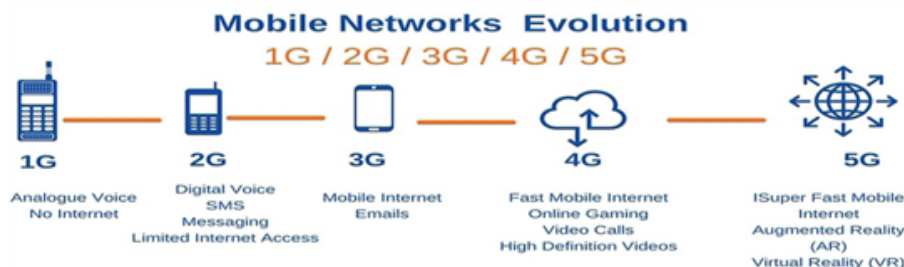


FIGURE 1.2 – Evaluation des réseaux cellulaires

1.4 La quatrième génération

Le LTE (Long Term Evolution) est la technologie mobile 4G développée par le 3GPP. Il se compose de deux parties principales : le réseau d'accès (E-UTRAN), qui gère les antennes, et le réseau central (EPC), qui traite les données.

Cette technologie offre des connexions très rapides, parfaites pour les appels vidéo et le streaming. Avec des débits théoriques pouvant atteindre 100 Mb/s en téléchargement (descente) et 50 Mb/s en envoi (montée), le LTE utilise différentes bandes de fréquences (de 1,25 MHz à 20 MHz) pour offrir une excellente couverture réseau. Comparé à la 3G, le LTE apporte une amélioration très nette des performances. Il permet un accès Internet haut débit plus fluide et une meilleure prise en charge des applications mobiles, grâce à des échanges de données bien plus rapides.

1.4.1 Limitations de la 4G

Avec l'accélération de la transformation numérique, le monde connaît une digitalisation croissante, entraînant une augmentation significative des usages numériques, en particulier des applications en temps réel telles que le cloud gaming, la télémédecine ou encore les véhicules autonomes. Toutefois, la technologie 4G présente certaines limitations qui freinent cette évolution, notamment un débit insuffisant, une latence élevée et une saturation du réseau due à la prolifération des objets connectés.

Bien que la 4G puisse théoriquement atteindre un débit de 1 Gbit/s, ses performances réelles sont souvent inférieures en raison de la congestion du réseau et de la demande croissante en bande passante. Par ailleurs, sa latence, pouvant atteindre 50 millisecondes, reste trop élevée pour les applications nécessitant des interactions instantanées.

Face à ces contraintes, la 5G se présente comme une solution innovante, offrant des débits pouvant atteindre 20 Gbit/s et une latence réduite à seulement 1 milliseconde. Cette nouvelle génération de réseau permet une prise en charge optimisée des technologies émergentes, une connectivité simultanée accrue, ainsi qu'une meilleure efficacité énergétique. Grâce à ces avancées, la 5G répond aux exigences croissantes des utilisateurs et constitue un levier essentiel pour le développement de la société numérique de demain [1].

Performance / Génération	4G	5G
Débit maximal (Gbit/s)	1	20
Débit moyen pour l'utilisateur (Mbit/s)	10	100
Efficacité spectrale	1x	3x
Vitesse maximale (km/h)	350	500
Latence (ms)	10	1
Nombre d'objets connectés par km ²	10 ⁵	10 ⁶
Efficacité énergétique du réseau	1x	100x
Débit sur une zone (Mbit/s/m ²)	0,1	10

TABLE 1.1 – Comparaison des performances entre la 4G et la 5G

La 5G vise à réaliser les améliorations suivantes :

- Une augmentation significative du nombre d'utilisateurs pouvant être pris en charge.
- Une réduction de la latence par un facteur 10.
- La gestion d'un volume de trafic considérable généré par les utilisateurs.
- L'élargissement de la bande passante des applications afin de répondre à une grande variété de demandes et de caractéristiques.

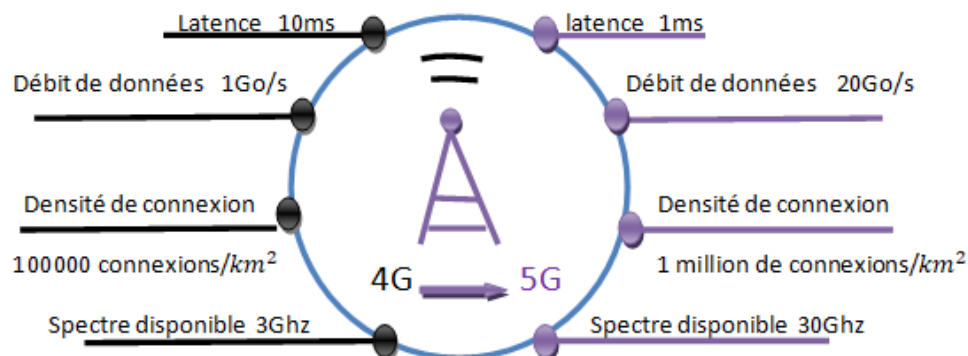


FIGURE 1.3 – Comparaison entre la 4G et la 5G

1.5 La cinquième génération

Bien que les technologies 2G, 3G et 4G, aujourd'hui largement déployées, aient introduit de nombreuses fonctionnalités innovantes dans les réseaux de communication, la 5G représente la dernière génération d'accès radio, développée par le 3GPP en 2020. Elle est destinée à devenir la nouvelle norme pour l'interface radio et à répondre aux exigences les plus avancées des fournisseurs de services de communication dans les années à venir.

La 5G apporte une multitude d'innovations technologiques, bouleversant complètement la conception traditionnelle que nous avons des smartphones. Elle ouvre la

voie à de nouveaux usages, tels que la réalité virtuelle, les véhicules autonomes et connectés, les villes intelligentes (gestion du trafic, optimisation énergétique), ainsi que l'industrie du futur (pilotage à distance des équipements industriels, connectivité des machines, etc.).

Parmi les principaux avantages de la 5G, on retrouve : un accès ultra-rapide à Internet, une fiabilité de connexion exceptionnelle, une latence extrêmement faible, et la capacité à prendre en charge un grand nombre d'utilisateurs aux besoins variés en matière de qualité de service. La vitesse de transmission des données via la 5G devrait atteindre des débits allant de 1 à 20 Gbit/s, tout en garantissant des temps de réponse très courts.

Enfin, l'un des atouts majeurs de la 5G réside dans l'amélioration significative de la gestion du trafic télécom, notamment grâce au *network slicing*, tout en permettant une réduction des coûts par rapport aux générations cellulaires précédentes [2].

1.6 Architecture générale d'un réseau 5G

L'architecture réseau de la technologie mobile 5G représente une amélioration significative par rapport aux générations précédentes. Elle repose sur trois composantes essentielles : le réseau d'accès radio (RAN), le cœur de réseau (Core Network) et les équipements utilisateurs (UE).



FIGURE 1.4 – Architecture générale

1.6.1 Équipements utilisateurs (UE)

Les UE (User Equipments) englobent tous les dispositifs qui se connectent au réseau 5G pour accéder à ses services et applications, tels que les smartphones, les tablettes, les ordinateurs portables, les objets connectés (IoT), les véhicules connectés, et d'autres dispositifs compatibles avec la technologie 5G.

Ces équipements établissent des connexions avec les stations de base du réseau 5G (gNB) afin d'accéder aux services disponibles. Ils peuvent également interagir avec

d'autres éléments du réseau, tels que les points d'accès Wi-Fi, les passerelles, les serveurs de contenu et les systèmes de gestion.

1.6.2 Le réseau d'accès radio 5G (RAN)

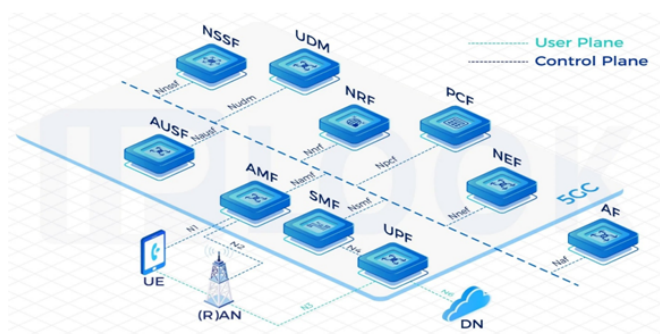
Le réseau d'accès radio 5G est constitué de stations de base de nouvelle génération, qui forment le nœud de connexion entre les équipements mobiles et le cœur du réseau 5G (5GC).

Les équipements utilisateurs (UE) communiquent avec ces stations de base soit par un lien radio 5G, soit par un lien radio 4G. Si la communication s'effectue en 5G, la station de base est appelée gNB (Next Generation Node B). Si la communication utilise la 4G, il s'agit d'une station de base 4G évoluée, adaptée pour s'interconnecter avec le cœur de réseau 5G ; elle est alors désignée par le terme ng-eNB (Next Generation evolved Node B).

1.6.3 Le cœur de réseau 5G

Le cœur de réseau de la 5G repose sur une architecture orientée services (Service-Based Architecture ou SBA), alignée sur le modèle de l'informatique en nuage. Cette approche offre une flexibilité, une évolutivité et une efficacité accrues dans la fourniture des services.

Le 5GC (5G Core) prend en charge des fonctions essentielles telles que l'authentification des utilisateurs, l'acheminement des appels, la sécurité des données, la gestion des sessions, ainsi que l'agrégation du trafic provenant des appareils connectés[3].



- **UPF** : La fonction de plan utilisateur gère la transmission des données (tunnels NG-U), la qualité de service (QoS), l'application des politiques de trafic et le routage des paquets.
- **AUSF** : Le serveur d'authentification garantit la sécurité en authentifiant les utilisateurs et leurs équipements.
- **NSSF** : La fonction de sélection de tranche de réseau choisit l'instance de tranche la plus appropriée pour chaque UE, ainsi que l'AMF adapté.
- **UDM** : Le gestionnaire unifié des données stocke les informations liées aux utilisateurs (identifiants, AMF, SMF). Il centralise les données de configuration et intègre les fonctions du HSS de la 4G.
- **NRF** : La fonction de registre réseau permet la découverte des fonctions réseau (NF) et la coordination des services lors de la connexion initiale de l'utilisateur.
- **PCF** : La fonction de contrôle des politiques gère les règles de qualité de service (QoS) et les politiques d'utilisation du réseau.
- **NEF** : La fonction d'exposition du réseau agit comme point d'entrée pour les prestataires de services externes, tout en contrôlant l'accès aux fonctions réseau.
- **AF** : La fonction applicative agit comme un serveur d'applications, servant d'interface entre les applications et le réseau.

1.7 Les modes de déploiement du réseau 5G

Les réseaux 5G peuvent être déployés selon deux modèles : le modèle non-standalone (NSA) et le modèle standalone (SA).

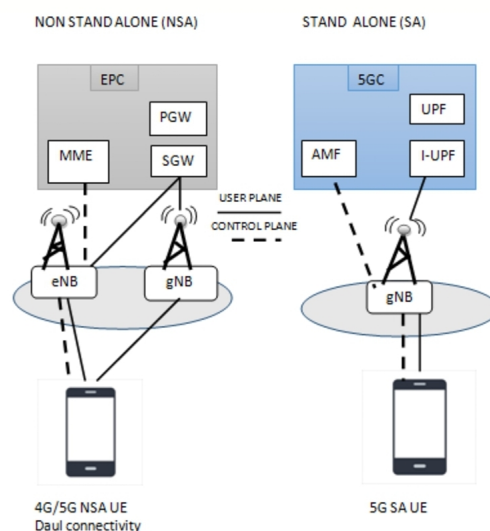


FIGURE 1.6 – Déploiements NSA et SA

Le mode SA (Standalone) est une version complète de la 5G, qui fonctionne indépendamment de la 4G. Il utilise uniquement les antennes 5G (NR) et un cœur de réseau entièrement 5G (5GC). Ce mode permet de profiter pleinement des avantages suivants :

- Très haut débit,
- Faible latence,
- Connexion simultanée possible pour un grand nombre d'appareils.

Le mode NSA (Non-Standalone) est une version partielle de la 5G, qui repose encore sur le réseau 4G (antennes et cœur de réseau). La 5G y est ajoutée progressivement grâce à de nouvelles antennes (5G NR), mais la 4G reste indispensable, notamment pour la gestion du réseau. Ce mode permet un déploiement plus rapide et à moindre coût. Pour plus de détails sur les modes de déploiement de la 5G,

1.8 Technique d'accès multiple

Pour que les réseaux sans fil fonctionnent mieux, on utilise différentes méthodes pour partager les fréquences entre les utilisateurs. Parmi ces méthodes, on trouve l'OFDMA, le SC-FDMA, le TDMA . Chacune a ses avantages :

- L'OFDMA permet d'économiser de l'énergie et rend l'envoi de données plus facile, surtout quand c'est le téléphone qui envoie des informations vers le réseau.
- Le SC-FDMA convient bien aux téléphones portables car il utilise peu d'énergie et gère bien les différentes fréquences.
- Le TDMA est moins pratique quand il y a beaucoup de monde connecté, car il a besoin d'une bonne organisation et de réglages précis pour bien marcher.

Pour améliorer les réseaux sans fil, surtout avec la 5G, on utilise des technologies comme le massive MIMO, le beamforming et le NOMA.

1.8.1 Massive MIMO

L'adoption du massive MIMO représente l'une des dernières avancées majeures de la 5G. Grâce au grand nombre d'antennes utilisées, M antennes peuvent se connecter à K appareils, avec M étant bien supérieur à K . Cette technologie est jusqu'à 100 à 1000 fois plus efficace que les approches 4G. L'objectif est d'utiliser les mêmes ressources temps-fréquence pour de nombreuses communications simultanées. Ainsi, cette méthode permet d'augmenter considérablement l'efficacité spectrale [5].

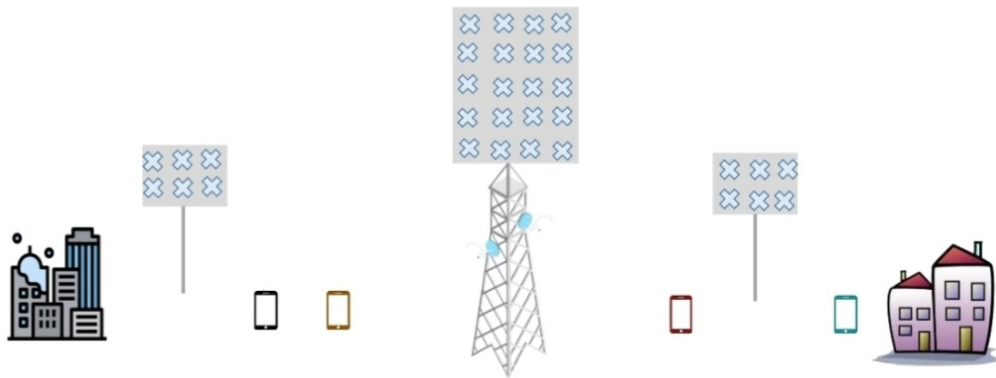


FIGURE 1.7 – Massive MIMO

1.8.2 Beamforming

Le beamforming est une méthode efficace pour améliorer les performances des réseaux mobiles. Cette technique permet d'obtenir une meilleure efficacité spectrale, ce qui augmente considérablement la capacité des stations de base existantes. De plus, le beamforming peut étendre la couverture et améliorer les performances des liaisons. Bien que cette technique soit reconnue depuis longtemps dans la recherche académique, elle a été intégrée dans les spécifications 5G [6].

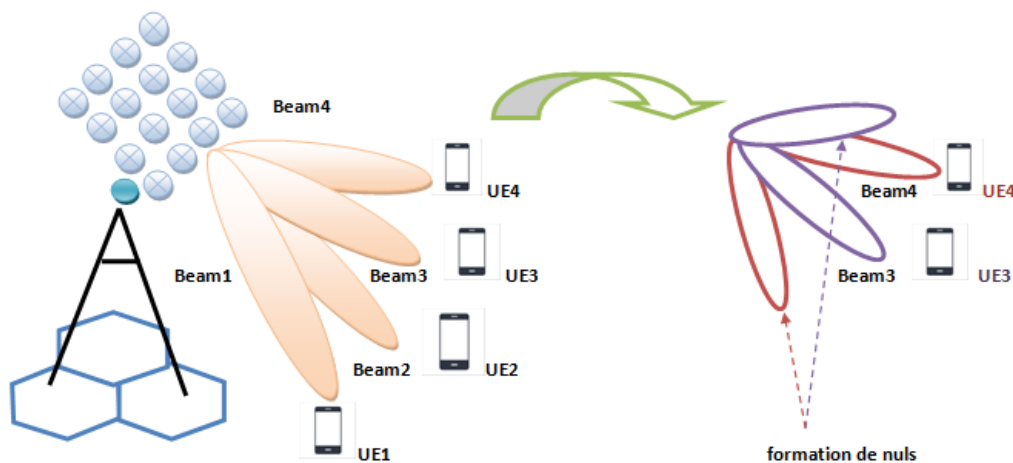


FIGURE 1.8 – Beamforming

1.8.3 La technique Space Division Multiple Access

La technique SDMA permet à plusieurs utilisateurs de se connecter en même temps, en utilisant la même fréquence et le même moment, mais en les séparant dans l'espace. Grâce à des antennes spéciales qui envoient le signal dans une direction précise (beamforming), chaque utilisateur reçoit un signal qui lui est dédié, sans trop

de perturbations. Cette méthode est très utile dans les réseaux 5G, surtout dans les endroits où il y a beaucoup de monde ou d'appareils, comme les ports, les usines ou les stades. Elle permet de mieux utiliser les fréquences, d'augmenter le nombre de connexions possibles et d'améliorer la qualité de la communication. Cependant, cela demande des technologies avancées et peut être moins efficace si les utilisateurs sont très proches les uns des autres.

1.8.4 La technique RSMA (Rate-Splitting Multiple Access)

La technique RSMA est un schéma d'accès multiple avancé employé dans les réseaux 5G et les générations futures pour transmettre simultanément des données à de multiples utilisateurs de manière plus efficace. Elle opère en scindant chaque flux d'information en deux composantes : une composante commune, diffusée à l'ensemble des utilisateurs, et une composante privée, dédiée à chaque utilisateur. Ce mécanisme permet d'optimiser la gestion des interférences inter-utilisateurs, même lorsque le canal radio est instable ou sujet à des variations. À la différence d'autres techniques telles que le SDMA ou le NOMA, le RSMA présente une capacité d'adaptation dynamique aux conditions réelles du canal, ce qui contribue à améliorer la robustesse, le débit global et l'équité entre les terminaux. Grâce à cette flexibilité, il est particulièrement pertinent dans les environnements à forte densité d'usagers, tels que les zones portuaires ou les milieux urbains denses, et constitue une solution prometteuse pour les futurs réseaux 6G.

1.8.5 La technique NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access)

Le NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) est une méthode d'accès multiple qui permet à plusieurs utilisateurs de partager les mêmes ressources spectrales (temps et fréquence) en utilisant différentes puissances de signal. Contrairement à des techniques comme l'OFDM, où chaque utilisateur utilise une ressource distincte, le NOMA superpose les signaux des utilisateurs, ce qui permet une meilleure utilisation du spectre. Le NOMA offre une grande efficacité spectrale, ce qui signifie qu'il permet de transmettre plus de données avec moins de bande passante. Il améliore aussi l'équité entre les utilisateurs, en permettant même à ceux avec des signaux faibles de recevoir une part équitable du spectre. C'est une solution idéale pour les environnements densément peuplés, où de nombreux utilisateurs doivent partager les ressources limitées du réseau [7].

1.9 Structure de la trame

La conception des trames est essentielle pour assurer une transmission efficace des données dans le réseau 5G. La 5G utilise des techniques avancées pour maximiser l'utilisation des ressources en temps et en fréquence, afin d'offrir de bonnes

performances. Dansst ensuite découpée en créneaux, dont le nombre dépend de l'espacement des sous-porteuses utilisées pour transmettre les données. En outre, un créneau est composé de 14 symboles consécutifs. Cette structure permet de gérer efficacement les transmissions et d'organiser les données de manière optimale [8].

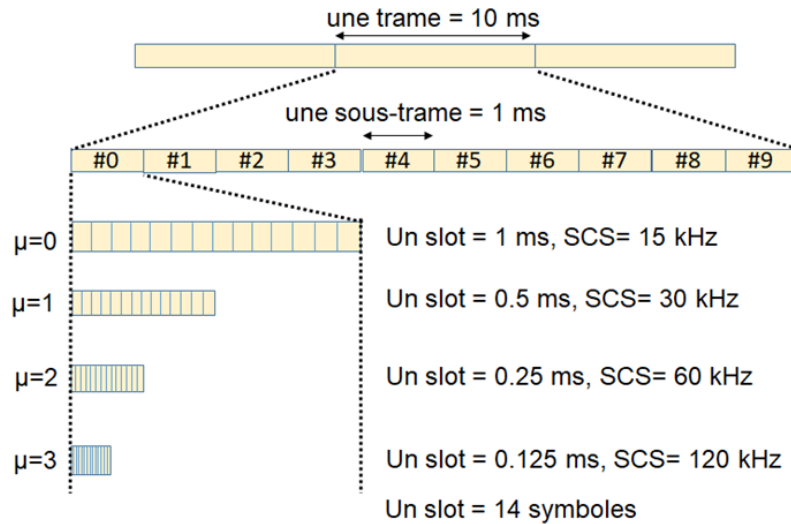


FIGURE 1.9 – Structure de la trame 5G[8]

1.10 Modèle des canaux

1.10.1 Les canaux physiques

Les canaux physiques sont les véritables moyens de transmission des données via l'interface radio. Ils sont directement connectés à la couche physique (PHY) et sont utilisés pour transmettre des informations de contrôle et des bits de données. Les principaux canaux physiques sont les suivants :

- **PDSCH (Physical Downlink Shared Channel)** : Ce canal est utilisé pour envoyer des données de liaison descendante. Les ressources en temps et en fréquence sont partagées par tous les utilisateurs. Les canaux de transport DL-SCH et PCH sont envoyés via le canal physique PDSCH.
- **PUCCH (Physical Uplink Control Channel)** : La structure du PUCCH peut être courte (Short PUCCH) ou longue (Long PUCCH). Le Short PUCCH est transmis sur le dernier symbole ou les deux derniers symboles de l'OFDM, tandis que le Long PUCCH est transmis sur une ou plusieurs PRB (Physical Resource Block) et sur une séquence de symboles dans une trame.
- **PDCCH (Physical Downlink Control Channel)** : Ce canal envoie des informations de contrôle pour un ou plusieurs mobiles. Il permet de définir l'allocation des ressources, la modulation et le schéma de codage pour les données contenues dans les canaux PUSCH et PDSCH. La puissance de transmission des canaux PUCCH et

PUSCH peut aussi être contrôlée. Le PDCCH est transmis dans une collection de ressources temps-fréquence connue sous le nom de CORESET (un ensemble d'éléments de canal de contrôle, CCE, pour chaque sous-trame).

- **PUSCH (Physical Uplink Shared Channel)** : Le PUSCH permet aux appareils mobiles de transmettre des données à la station de base. Bien que la transmission de données utilisateur en amont soit son usage principal, il peut aussi transporter d'autres types de messages ou informations, comme les demandes de ressources ou la signalisation [8].

1.10.2 Canaux de transport

Les canaux de transport servent d'interface entre les canaux physiques et les couches supérieures. Ils définissent comment les données sont transmises sur l'interface radio. Utilisés par la couche MAC (Medium Access Control), ils permettent de mapper les canaux logiques sur les canaux physiques. Les canaux de transport sont caractérisés par leur mode de transmission (par exemple, partagé, dédié, diffusé).

- **DL-SCH (Downlink Shared Channel)** : Ce canal de transport contient des systèmes d'information et des données spécifiques du terminal UE, comme les paquets IP unicast (données de trafic) et les données de contrôle (RRC, contrôle des ressources radio). Il existe sous la forme d'un ou deux blocs de transport.

- **UL-SCH (Uplink Shared Channel)** : Ce canal de transport est l'équivalent du DL-SCH, mais pour la liaison montante. Il contient des informations et des données en liaison montante.

- **PCH (Paging Channel)** : Le canal de transport PCH contient les données de contrôle RRC correspondant au message de pagination [8].

1.10.3 Canal logique

Les canaux logiques se situent au niveau supérieur de l'architecture des couches protocolaires, plus précisément au niveau de la couche MAC. Ils définissent le type de données transportées et sont indépendants de la manière dont ces données sont transmises physiquement. Leur rôle principal est de séparer les différents types de données et de signalisation en fonction de leur nature et de leur destination.

- **CCE (Control Channel Element)** : est une unité de l'espace de recherche pour le décodage à l'aveugle des informations de contrôle DCI [8].

1.11 Conclusion

Ce premier chapitre nous a permis de comprendre comment les réseaux mobiles ont évolué, de la 1G jusqu'à la 5G. Chaque génération a apporté des améliorations importantes, comme une connexion plus rapide, plus stable et capable de gérer un plus grand nombre d'appareils. La 5G, en particulier, offre de hautes performances et ouvre la voie à de nouvelles utilisations dans divers domaines.

Dans le chapitre suivant, nous commencerons par présenter le port de Béjaïa. Ensuite, nous étudierons le réseau 4G actuellement utilisé dans ce port, en expliquant ses limites et les problèmes qu'il pose. Enfin, nous verrons pourquoi la 5G constitue une meilleure solution pour améliorer la communication, les opérations et la modernisation du port.

Chapitre 2

Présentation de l'entreprise Portuaire de Béjaïa (BMT)

2.1 Introduction

Dans un monde en constante évolution, les ports jouent un rôle stratégique dans le développement économique et les échanges internationaux.

Le port de Béjaïa, grâce à sa position géographique privilégiée sur la côte méditerranéenne de l'Algérie, constitue une plateforme logistique majeure pour le commerce régional.

Ce chapitre s'intéresse particulièrement à la société BMT (Bejaia Méditerranéen Terminal), acteur clé dans la gestion des terminaux portuaires, et met en lumière l'impact des technologies de communication, notamment les réseaux 4G et 5G, sur l'efficacité des opérations.

Nous analyserons successivement la structure du port, l'organisation interne de BMT, l'infrastructure de connectivité existante, les limites rencontrées avec le réseau 4G ainsi que les perspectives offertes par l'introduction du réseau 5G.

2.2 Présentation du port de Béjaïa

Le port de Béjaïa occupe une position stratégique en Méditerranée occidentale, au cœur de la côte algérienne, ce qui en fait un acteur clé des échanges maritimes régionaux. Protégé par l'une des rades naturelles les plus sûres, il dispose d'infrastructures multimodales (routières, ferroviaires et aériennes) assurant une connexion efficace avec l'ensemble du pays. Son hinterland, dynamique et étendu sur 250 km, englobe 12 millions d'habitants répartis sur 10 wilayas, et abrite de grandes zones industrielles telles que l'Algérois, les Hauts Plateaux et la vallée de la Soummam, soutenant ainsi une économie diversifiée. Grâce à des limites bien définies (RN9, jetées et zone industrielle), le port de Béjaïa se positionne comme un pôle logistique national, offrant à la fois sécurité, connectivité et un fort potentiel de croissance, en phase avec les projets de développement économique de l'Algérie.

2.3 Présentation de BMT

Le BMT (Bejaia Méditerranéen Terminal) – SPA est une coentreprise stratégique entre l'Entreprise Portuaire de Béjaïa (EPB) et Portek International Limited, un opérateur portuaire singapourien de renommée mondiale. Spécialisé dans la gestion et l'exploitation du terminal à conteneurs du port de Béjaïa, BMT met en œuvre des technologies de pointe et des systèmes informatiques avancés afin de garantir des opérations rapides, sécurisées et efficaces. Axée sur l'intégrité, la productivité et l'innovation, la société s'engage à fournir des services de qualité supérieure tout en répondant aux besoins spécifiques de ses clients, avec pour objectif une performance optimale et une rentabilité durable.



FIGURE 2.1 – BMT

2.3.1 Organisation de BMT et ses différentes structures

La société portuaire de Béjaïa (BMT) est structurée en plusieurs directions, chacune jouant un rôle clé dans la gestion et le fonctionnement du terminal.

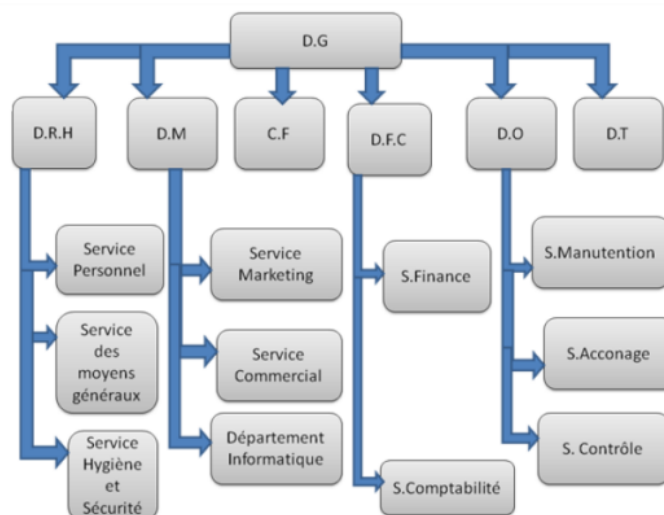


FIGURE 2.2 – Organigramme de BMT

Lors de notre stage pratique au sein de BMT, nous avons approfondi nos connaissances sur les technologies de communication, notamment les réseaux 4G et 5G. Nous avons eu l'opportunité d'échanger avec la Direction Générale, qui a partagé sa vision sur la modernisation des infrastructures numériques et l'amélioration des systèmes de connectivité. Cette analyse a mis en évidence une solution clé : l'adoption de la technologie 5G comme levier stratégique pour optimiser les opérations portuaires. Grâce à sa vitesse élevée et à sa faible latence, la 5G permettrait une transmis-

sion rapide et sécurisée des données, une meilleure coordination en temps réel, ainsi qu'une automatisation plus efficace des tâches critiques. La 5G s'impose ainsi comme une réponse concrète et innovante aux défis de performance, de digitalisation et de compétitivité du port.

2.4 Réseau utilisé dans le port

Dans le cadre de sa modernisation, Bejaia Mediterranean Terminal (BMT) a déployé un réseau 4G afin d'améliorer les opérations techniques, logistiques et administratives du terminal à conteneurs. Une antenne principale est installée dans la zone portuaire pour connecter les appareils mobiles, les systèmes informatiques et le personnel.

Cette couverture 4G couvre des zones clés telles que les quais de chargement et de déchargement, les postes de contrôle, les bureaux, certaines zones de stockage proches des quais, ainsi que les véhicules de manutention équipés de systèmes de communication.

Grâce à cette infrastructure, plusieurs services sont assurés : échange rapide et sécurisé des données, localisation en temps réel des conteneurs, accès mobile aux logiciels de gestion portuaire, communication facilitée entre les équipes sur le terrain, contrôle à distance de certains équipements et suivi GPS des engins mobiles.

Cependant, malgré cette couverture, certaines zones restent mal desservies, notamment les espaces éloignés ou encombrés, ce qui peut engendrer des problèmes de connexion.

2.4.1 Les limites et critiques du réseau 4G

Bien que le réseau 4G déployé par la BMT soit essentiel pour les opérations portuaires, il présente encore plusieurs limites techniques qui affectent son efficacité. Les principaux problèmes rencontrés sont les suivants :

- **Zones sans couverture** : Certaines parties du port, notamment les zones éloignées ou entourées de structures métalliques, reçoivent un signal 4G faible voire inexistant.
- **Connexion instable** : La qualité du réseau varie fréquemment, surtout lors des pics d'activité, ce qui ralentit les échanges d'informations et nuit à la fluidité des opérations.
- **Interférences** : Les machines et équipements lourds présents dans le port génèrent des interférences qui perturbent le signal, provoquant parfois des coupures de connexion.
- **Dépendance à une seule antenne** : Le réseau s'appuie sur une antenne principale unique. En cas de panne ou de perturbation de cette antenne, la couverture et la communication dans tout le terminal peuvent être gravement affectées.

2.4.2 Limites de couverture dans la zone des conteneurs

Un problème important et récurrent est observé dans la zone du parc réservée au déchargement des conteneurs. Cette zone est fréquemment utilisée par les agents chargés de vérifier et contrôler les marchandises. Cependant, le signal 4G y est très faible, voire totalement absent, en raison de la portée limitée de l'antenne principale (BTS).

Cette mauvaise couverture entraîne plusieurs conséquences :

- Les agents sur place rencontrent des difficultés à communiquer ou à transmettre des données en temps réel.
- Les opérations de contrôle subissent des retards.
- Les agents ne peuvent pas accéder aux outils numériques nécessaires pour suivre les marchandises ou envoyer leurs rapports immédiatement.

Ce manque de connexion dans une zone aussi stratégique affecte fortement l'efficacité des opérations logistiques et souligne la nécessité d'améliorer le réseau, comme cela sera développé dans la section suivante.

2.5 Solutions pour améliorer la couverture réseau

Pour résoudre les problèmes de mauvaise connexion dans certaines zones du port, comme celle réservée aux conteneurs, plusieurs solutions peuvent être envisagées :

2.5.1 Utiliser des relais temporaires

Les relais sont de petits appareils qui renforcent le signal du réseau (4G ou 5G) dans une zone précise. Ils sont faciles à installer et à déplacer, ce qui les rend très pratiques pour une utilisation temporaire. Par exemple, si la zone des conteneurs connaît une forte activité à un moment donné, des relais peuvent être rapidement déployés pour améliorer la connexion. Une fois la période de forte activité terminée, ces relais peuvent être déplacés ailleurs selon les besoins. C'est une solution flexible et peu coûteuse pour renforcer le réseau sans nécessiter de grands travaux.

2.5.2 Utiliser des drones comme relais

Les drones équipés d'antennes représentent une solution innovante pour améliorer le signal dans les zones difficiles d'accès ou mal couvertes. Ces drones peuvent survoler les conteneurs et transmettre un signal fort en temps réel, là où les antennes classiques ne suffisent pas. Ils sont particulièrement utiles en cas d'urgence, par exemple lorsqu'un relais fixe ne fonctionne plus ou qu'il faut couvrir rapidement une nouvelle zone. Les drones sont aussi efficaces lors d'événements particuliers ou de pics d'activité. Bien qu'ils soient plus coûteux, ils offrent une grande mobilité et une réponse rapide aux problèmes de connexion.

2.5.3 Installer une antenne 5G dédiée

Installer une antenne 5G directement dans la zone des conteneurs permet de résoudre durablement le problème de mauvaise couverture. Cette antenne fournirait un signal puissant et stable en continu, ce qui est essentiel pour le bon fonctionnement des équipements connectés, comme les tablettes, scanners ou capteurs utilisés par les agents. Grâce à la 5G, les données peuvent être transmises plus rapidement, sans coupure, même lorsque plusieurs appareils sont connectés simultanément. C'est une solution fiable à long terme, adaptée aux besoins actuels et futurs du port.

2.5.4 La solution par satellite

La solution par satellite permet de fournir une connexion Internet dans les zones isolées du port, sans dépendre des réseaux terrestres classiques. Elle repose sur une antenne parabolique installée au sol, qui communique directement avec un satellite en orbite. Ce satellite transmet ensuite les données à un centre connecté à Internet. Contrairement aux antennes 5G, qui nécessitent un réseau terrestre existant, cette solution fonctionne de manière autonome grâce à la liaison directe avec le satellite. Les satellites en orbite basse, comme ceux de Starlink, assurent une connexion rapide avec une faible latence. Cette technologie est particulièrement adaptée aux endroits difficiles d'accès ou coûteux à équiper en infrastructure.

2.6 Les avantages de la 5G pour le port

Le passage de la 4G à la 5G dans le port améliore significativement les conditions de travail et résout plusieurs problèmes liés à l'ancien réseau. La 5G est beaucoup plus rapide, ce qui permet d'envoyer et de recevoir des données sans coupure. Cela est particulièrement utile pour le suivi des conteneurs, le contrôle à distance des machines, comme les grues de levage, et l'assistance aux agents utilisant des tablettes ou des téléphones. De plus, la 5G peut gérer un grand nombre d'appareils connectés simultanément sans ralentissement, même en période de forte activité. Elle offre une couverture plus étendue et une latence réduite, rendant les opérations plus précises et réactives.

Avec cette connexion améliorée, il est possible d'exploiter pleinement l'Internet des objets (IoT), notamment des capteurs, caméras ou balises, pour surveiller en temps réel ce qui se passe dans le port. Ces objets collectent des informations précieuses qui permettent d'optimiser l'organisation du travail et de renforcer la sécurité. Les données recueillies sont ensuite analysées par des systèmes d'intelligence artificielle (IA), capables de détecter des anomalies, proposer des solutions, et aider à mieux planifier les déplacements ainsi que la maintenance des équipements.

La 5G améliore également la communication entre tous les systèmes du port, facilitant ainsi la coordination, réduisant les erreurs, et accélérant les opérations tout en garantissant une meilleure sécurité. Grâce à cette technologie, le port peut facilement intégrer des solutions modernes telles que les véhicules autonomes, la maintenance

à distance, l'IoT et l'IA. En résumé, la 5G rend le port plus efficace, plus sûr et pleinement prêt pour les défis futurs.

2.7 Conclusion

Le réseau 4G de la BMT présente des dysfonctionnements dans certaines zones du port, notamment à cause d'un signal faible et d'une connexion instable. De plus, sa dépendance à une seule antenne principale constitue un risque important. Pour remédier à ces problèmes, il est nécessaire d'installer une antenne 5G plus performante et de déployer des relais ou des drones afin d'assurer une couverture optimale sur l'ensemble du site.

Grâce à la 5G, le port bénéficiera d'une connexion plus rapide, plus sécurisée et mieux organisée. La circulation des données sera améliorée, ce qui rendra les opérations plus efficaces. Cette évolution permettra également l'intégration de nouvelles technologies innovantes.

Dans le chapitre suivant, nous détaillerons les étapes nécessaires à la préparation et au déploiement du réseau 5G, en mettant l'accent sur le choix des zones à couvrir, la sélection des équipements appropriés, ainsi que la résolution des défis techniques liés à cette transition.

Chapitre 3

Dimensionnement et planification d'un réseau 5G pour la BMT

3.1 Introduction

Dans un contexte où les technologies traditionnelles de gestion ne répondent plus aux exigences croissantes de rapidité, de fiabilité et de connectivité, l'installation d'un réseau gNodeB au sein de BMT devient une priorité stratégique.

Chaque jour, les activités portuaires dépendent de plus en plus d'une connexion stable et à haut débit, notamment pour le suivi des conteneurs, la gestion des données logistiques et l'intégration d'outils intelligents.

Ce chapitre s'intéresse à la solution d'implanter une antenne gNodeB directement sur le site de BMT, en tenant compte des besoins quotidiens en connectivité. Nous explorerons les étapes clés du dimensionnement et de la planification d'un tel réseau, en nous appuyant sur les spécificités techniques du site, les exigences opérationnelles et les contraintes environnementales. L'objectif est de concevoir une infrastructure robuste et adaptée, capable de soutenir les technologies avancées telles que l'Internet des Objets (IoT) et l'Intelligence Artificielle (IA), tout en garantissant une couverture optimale pour l'ensemble des activités du terminal.

3.2 Dimensionnement de la couverture

Le dimensionnement d'un réseau gNodeB consiste à analyser la couverture radio pour déterminer le nombre de composants nécessaires, comme les gNodeB et les cellules. Cette étape dépend de plusieurs facteurs importants :

- Les caractéristiques de la zone à couvrir.
- L'atténuation maximale du signal (MAPL), calculée à l'aide du bilan de liaison.
- Le choix d'un modèle de propagation adapté.

Une couverture insuffisante peut entraîner des coupures de communication et des échecs d'accès au réseau. C'est pourquoi il est essentiel de calculer correctement le bilan de liaison, de choisir un modèle de propagation adapté et d'estimer le nombre de sites nécessaires pour assurer une couverture optimale [9].

3.3 Bilan de liaison

Le bilan de liaison est la somme des gains et des pertes du système, utilisée pour déterminer le niveau du signal reçu (RxSL) au niveau du récepteur (UE). Pour évaluer si l'état du canal est « Pass » ou « Fail », le niveau du signal reçu est comparé à la sensibilité du récepteur (RxS).

Si le niveau du signal reçu (RxSL) dépasse la sensibilité de réception (RxS), l'état du canal est « Pass », sinon il est considéré comme « Fail ». Quelques valeurs d'exemple sont présentées dans la figure ci-dessous pour illustrer les différents paramètres d'entrée utilisés dans le calcul du bilan de liaison [10].

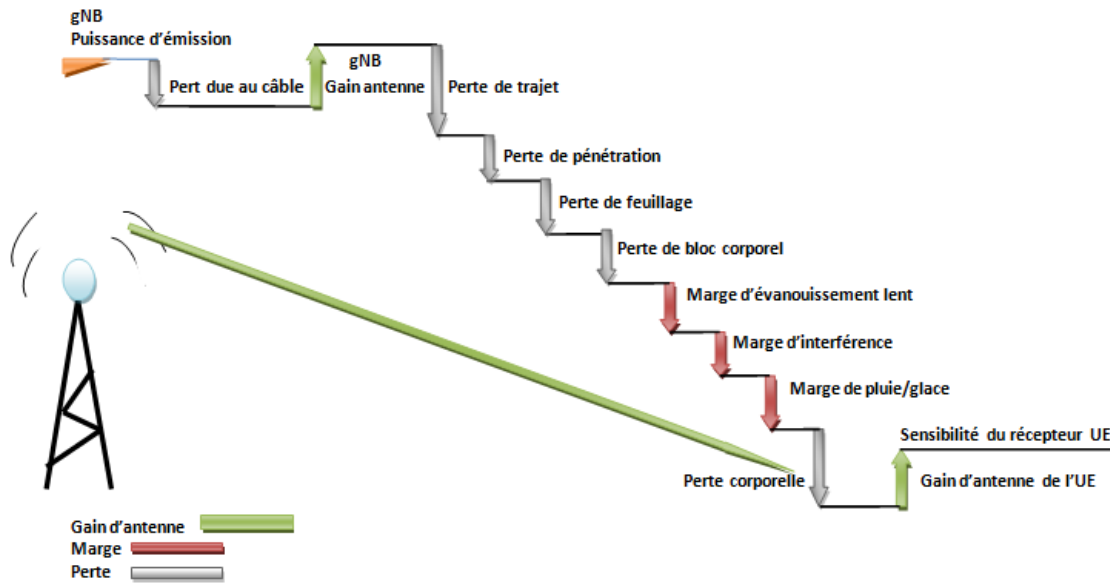


FIGURE 3.1 – Bilan de liaison gNodeB

- **Pertes dans les câbles : feeder, jumper, connecteur** Le feeder est un câble rigide, et il perd un peu du signal selon sa longueur, son type et la fréquence utilisée.

Le jumper est un petit câble souple qu'on met aux extrémités du feeder. Il perd un peu plus de signal que le feeder.

Les connecteurs, qui servent à raccorder les câbles entre eux, font aussi perdre un peu de signal[15].

- **Pertes causées par le corps humain** Quand une personne téléphone, sa tête bloque une partie du signal. Cela fait perdre un peu de puissance au signal.

Pour les appels classiques, on estime cette perte à environ 3 dB (selon la norme GSM 03.30).

Pour la visiophonie (appels vidéo) ou les services de données (comme Internet), on considère qu'il n'y a pas de perte liée à la tête, donc 0 dB[11].

- **pertes de pénétration** Ce sont les pertes de signal causées quand celui-ci doit traverser des murs, des vitres ou d'autres obstacles solides. Il faut en tenir compte si l'on veut que le réseau fonctionne bien à l'intérieur des bâtiments ou des voitures[11].

- **Marge d'interférence** Quand on vérifie si le signal est assez bon pour qu'un téléphone fonctionne, on calcule ce qu'on appelle un bilan de liaison.

Ce calcul prend en compte le bruit (comme des petites perturbations normales dans l'air). Mais parfois, le signal est aussi gêné par d'autres antennes qui utilisent la même fréquence. C'est ce qu'on appelle l'interférence co-canal.

Pour être sûr que le signal reste utilisable même avec ces perturbations, on ajoute une marge d'interférence (une petite "réserve" de sécurité).

Dans les réseaux GSM, eNodeB ou gNodeB, on utilise souvent une valeur standard de 3 dB, ou on fait des simulations pour estimer plus précisément cette marge.

Dans les réseaux UMTS (3G), c'est différent : l'interférence dépend du nombre d'utilisateurs connectés dans la même cellule. Plus il y a de trafic, plus l'interférence est grande[11].

●**La perte de feuillage** désigne l'atténuation du signal radio causée par la végétation (arbres, feuilles) dans un bilan de liaison. Elle dépend de la fréquence (plus élevée, plus la perte est importante), de la densité du feuillage, et de la distance traversée.

●**La perte de trajet** correspond à l'affaiblissement du signal lors de sa transmission entre l'émetteur et le récepteur. Elle dépend de la distance, de la fréquence et de l'environnement. En gNodeB, elle est plus importante à cause des hautes fréquences et des obstacles.

●**Les marges pluie et glace** sont des réserves ajoutées dans le bilan de liaison pour tenir compte des pertes causées par le mauvais temps. La pluie peut affaiblir le signal, surtout à haute fréquence, et la glace peut réduire l'efficacité des antennes. Ces marges permettent de garder une bonne qualité de communication même en cas de mauvais climat.

●**La marge d'évanouissement lent** sert à compenser les pertes de signal causées par des obstacles comme les bâtiments ou les arbres. Ces pertes changent lentement quand on bouge. Cette marge aide à garder une bonne connexion même si quelque chose bloque un peu le signal.

La formule suivante est utilisée pour calculer le niveau de signal reçu du bilan de liaison gNB (RxSL)[10] :

$$P_r = P_e - 10 \log_{10}(N_{sp}) + G_{gNB} - P_{cab} - P_{fs} - P_{pen} - P_{feu} - P_{corp} - M_{int} - M_{pg} - M_l + G_{UE} \quad (3.1)$$

- P_r : Puissance reçue (dBm)
- P_e : Puissance d'émission (dBm)
- N_{sp} : La puissance du nombre de sous-porteuses
- G_{gNB} : Gain antenne gNodeB (dBi)
- P_{cab} : Perte de câble (dB)
- P_{fs} : Perte de trajet (free space loss) (dB)
- P_{pen} : Perte de pénétration (dB)
- P_{feu} : Perte de feuillage (dB)
- P_{corp} : Perte due au corps humain (dB)
- M_{int} : Marge d'interférence (dB)
- M_{pg} : Marge pluie/glace (dB)
- M_l : Marge d'évanouissement lent (dB)
- G_{UE} : Gain antenne de l'UE (dB)

Pour calculer la perte de trajet, il est nécessaire d'utiliser un modèle de propagation approprié à la 5G (utilisant des modèles de propagation en trois dimensions (3D), définis dans la norme 3GPP 36.873, tels que UMa (Urban Macro), UMi (Urban Micro) et RMa (Rural Macro))[10].

3.4 Choix du modèle de propagation

Pour obtenir un bon équilibre entre précision et rapidité des calculs, le modèle de propagation estime la distance parcourue par un signal radio en tenant compte

de plusieurs éléments. Le type d'environnement influence la manière dont le signal se propage.

En fonction de différents facteurs tels que le type de terrain, la hauteur des antennes, la fréquence, la distance, le nombre de bâtiments, les matériaux présents, et même la saison, le modèle utilise une formule pour décrire comment le signal se propage de l'émetteur au récepteur.

3.4.1 Modèle de perte en espace libre (Free Space Path Loss - FSPL) :

Dans le domaine des télécommunications, la perte en espace libre (FSPL) correspond à la diminution de puissance d'un signal radio entre deux antennes lorsqu'il se propage dans un environnement sans obstacle. Cette perte est due à la distance entre les antennes et à la dispersion du signal dans l'espace. En espace libre, l'affaiblissement du signal dépend uniquement de la fréquence utilisée et de la distance séparant les deux points de transmission [12].

$$L_0(f, d) = \left(\frac{4\pi df}{c} \right)^2 \quad (3.2)$$

en dB :

$$L_0(\text{dB}) = 32,45 + 20 \log(d) + 20 \log(f) \quad (3.3)$$

Avec :

d : distance entre deux antennes dans l'espace libre (m)

f : la fréquence utilisée

c : la vitesse de la lumière dans le vide

3.4.2 Modèle COST 231-Hata :

Le modèle COST 231-Hata est une méthode couramment utilisée pour estimer la couverture d'un réseau sans fil dans les environnements urbains. Il s'agit d'une extension améliorée du modèle Hata-Okumura, adaptée aux fréquences plus élevées, allant jusqu'à 2 GHz. Ce modèle prend en compte le type de terrain ainsi que la présence d'obstacles tels que les bâtiments ou les collines, afin de calculer la perte de signal de manière plus précise. L'équation de l'affaiblissement de trajectoire est formulée comme suit [13] :

$$L_{\text{dB}} = 46.3 + 33.9 \log(f) - 13.82 \log(H_b) + A(H_m) + (44.9 - 6.55 \log(H_b)) \log(d) + C \quad (3.4)$$

Avec :

f : fréquence (en MHz)

d : distance en km entre l'émetteur et le récepteur

H_b : hauteur en mètres de l'émetteur

H_m : hauteur en mètres du récepteur

$A(H_m)$: facteur de correction selon la hauteur du récepteur

Petites et moyennes villes : $C_M = 0$ dB

Grandes villes : $C_M = 3$ dB

3.4.3 Modèle Okumura-Hata :

Le modèle Okumura-Hata est une méthode simple et pratique permettant d'estimer la perte de signal dans les réseaux mobiles. Il prend en compte plusieurs paramètres tels que la fréquence utilisée, la distance entre l'antenne et l'utilisateur, la hauteur des antennes, ainsi que le type d'environnement (urbain, rural ou suburbain) [14].

- Pour un environnement urbain, l'affaiblissement de parcours est défini comme suit [12] :

$$L_0 = 69.55 + 26.16 \log(f) - 13.82 \log(H_b) - A(H_m) + (44.9 - 6.55 \log(H_b)) \log(d) \quad (3.5)$$

et le Facteur de correction est :

Type de zone	Facteur de correction $A(H_m)$
Ville de petite et moyenne taille	$A(H_m) = (1.1 \log(f) - 7.0) \cdot H - (1.56 \cdot \log(f) - 8.0)$
Ville de grande taille, $f < 200$ MHz	$A(H_m) = 8.29 (\log(1.54(H_m)))^2 - 1.1$
Ville de grande taille, $f > 200$ MHz	$A(H_m) = 3.2 (\log(11.75))^2 - 4.97$

TABLE 3.1 – Facteurs de correction selon le type de zone et la fréquence

- Pour les zones suburbaines :

$$L_{su} = L_u - 2 \log(f/28)^2 - 5.4 \quad (3.6)$$

- Pour les zones rurales très dégagées :

$$L_r = L_u - 4.78 \log(f)^2 + 18.33 \log(f) - 40.94 \quad (3.7)$$

Avec :

f : fréquence (en MHz)

d : distance en km entre l'émetteur et le récepteur

H_b : hauteur en mètres de l'émetteur

H_m : hauteur en mètres du récepteur

$A(H_m)$: facteur de correction selon la hauteur du récepteur

3.4.4 Le modèle Urban Macro (UMa)

Le modèle UMa est utilisé pour décrire la propagation du signal radio en milieu urbain lorsque l'antenne est installée en hauteur, comme sur le toit d'un bâtiment. Cette position permet au signal de rencontrer moins d'obstacles (comme des immeubles), ce qui améliore sa portée et sa qualité.

Il existe plusieurs versions de ce modèle : TR 36.873 (utilisé avec les stations eNodeB, pour les fréquences inférieures à 6 GHz), TR 38.900 et TR 38.901 (utilisés avec les stations gNodeB dans les réseaux 5G). Fait intéressant, en condition de ligne de vue directe (LOS), la version TR 38.901 pour gNodeB réutilise le modèle TR 36.873 initialement développé pour les eNodeB, sans fournir d'explication particulière.

En absence de ligne de vue (NLOS), c'est généralement le modèle ABG qui est utilisé, bien que le modèle CI soit aussi applicable. Des projets comme 5GCM ont évalué les modèles CI, CIF et ABG, et ont montré que les pertes de signal sont généralement plus faibles en environnement UMa qu'en UMi, en raison de la plus grande hauteur des antennes. Le projet METIS a également utilisé le modèle TR 36.873 (développé pour eNodeB) pour les fréquences inférieures à 6 GHz dans les simulations pour gNodeB [15].

La perte de trajet dans ce modèle est calculée à l'aide de la formule suivante :

- Pour le cas LOS dans le modèle 3GPP TR 38.901 :

$$PL_{UMa} - LOS = \begin{cases} PL_1, & \text{si } 10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq d'_{BP} \\ PL_2, & \text{si } d'_{BP} < d_{2D} \leq 5 \text{ km} \end{cases} \quad (3.8)$$

$$PL_1 = 28 + 22 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) \quad (3.9)$$

$$PL_2 = 28 + 40 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 9 \log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UE})^2) \quad (3.10)$$

- Pour 3GPP TR 38.901 NLOS :

$$PL = \max(PL_{UMa} - LOS(d_{3D}), PL_{UMa} - NLOS(d_{3D})) \quad (3.11)$$

$$PL_{UMa} - NLOS = 13.54 + 39.08 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 0.6(h_{UE} - 1.5) \quad (3.12)$$

Avec :

h'_{BS} : Hauteur de l'antenne de la station de base égale 25m

h'_{UE} : Hauteur de l'antenne de l'utilisateur, $0.5 < f_c < 100 \text{ GHz}$

f_c : Fréquence

d'_{BP} : la distance de breakpoint

$$d'_{BP} = \frac{4h'_{BS}h'_{UE}f_c \times 10^9}{c} \quad (3.13)$$

3.4.5 Le modèle Urban Micro (UMi)

Le modèle UMi est utilisé pour modéliser la propagation du signal dans les petites zones urbaines, avec des distances relativement courtes (généralement inférieures à 500 mètres). Ce modèle est adapté aux environnements denses où les stations de base, qu'elles soient de type eNodeB ou gNodeB, sont installées à une faible hauteur.

Pour calculer la perte de signal, deux modèles sont principalement utilisés : le modèle ABG (Alpha-Beta-Gamma) et le modèle CI (Close-In). En conditions de ligne de vue (LOS), le modèle CI est souvent préféré, avec un facteur d'atténuation proche de 2, ce qui reflète un comportement de propagation en espace libre.

Bien que le modèle UMi permette d'introduire une notion de distance de rupture (qui dépend de la hauteur des antennes et de la fréquence), cette notion est ici jugée non pertinente. En effet, cette distance est généralement plus grande que le rayon typique de la cellule (500 m), même lorsque les antennes sont positionnées très bas. Par conséquent, dans ce contexte, on ne tient pas compte de la hauteur des antennes ni de la distance de rupture.

Les calculs de perte de signal se basent donc uniquement sur des modèles simples comme le CI ou le ABG. Le projet mmMAGIC utilise également le modèle ABG, mais avec des paramètres légèrement différents selon les environnements simulés [15].

3.4.6 Le modèle Rural Macro (RMa)

Le scénario Rural Macrocell (RMa) est utilisé pour simuler la propagation du signal dans les zones rurales, où il y a peu d'obstacles comme des bâtiments. Cela permet de représenter des conditions de propagation plus ouvertes [16] :

fréquence du signal jusqu'à 150 GHz,

hauteur de la station de base (gNodeB) à 35 m,

distances de propagation comprises entre 10 et 1000 m.

3.5 Calcul du nombre de sites

Pour estimer le nombre de sites nécessaires dans un réseau mobile, il est important de connaître le rayon de couverture de chaque cellule. Ce rayon dépend de plusieurs facteurs, comme la fréquence utilisée, la puissance d'émission, les pertes dues à l'environnement (bâtiments, obstacles), ainsi que la sensibilité des équipements.

Une fois le rayon de couverture estimé, on peut calculer la surface couverte par une cellule. Il suffit ensuite de diviser la surface totale de la zone à couvrir par la surface d'une cellule pour obtenir une première estimation du nombre de sites nécessaires. Ce calcul permet d'avoir une idée générale du dimensionnement du réseau, même si d'autres paramètres plus précis peuvent être pris en compte dans des études plus avancées.

La surface d'une cellule est donnée par la relation suivante [17] :

$$S = 1.95 \times R^2 \quad (3.14)$$

Le nombre de sites nécessaires est estimé par la formule suivante :

$$N = \frac{S_{\text{totale}}}{S} \quad (3.15)$$

3.6 Processus de dimensionnement

- En partant d'un débit physique cible à la limite de la cellule en liaison montante, nous utilisons les résultats de la simulation du lien physique pour relier ce débit physique à un SINR cible et à une bande passante allouée à l'utilisateur.
- Nous déterminons le rayon de la cellule R en établissant un équilibre sur le chemin de montée. La surface totale de la cellule est ensuite divisée en surfaces élémentaires, qui, ensemble, constituent la cellule.
- En conséquence, une probabilité est attribuée à chaque surface élémentaire, représentant le pourcentage de cette petite surface par rapport à la surface totale de la cellule.
- Un modèle de propagation, dépendant de l'environnement considéré, est utilisé pour calculer l'atténuation du signal pour chaque surface élémentaire.
- Le SINR est alors calculé en utilisant un budget de liaison sur la liaison descendante.
- Chaque SINR se voit attribuer un débit physique via une fonction d'estimation du débit.
- En fonction de la charge de la cellule, les débits de données moyens par utilisateur sont déterminés à l'aide d'un modèle de trafic de données [11].

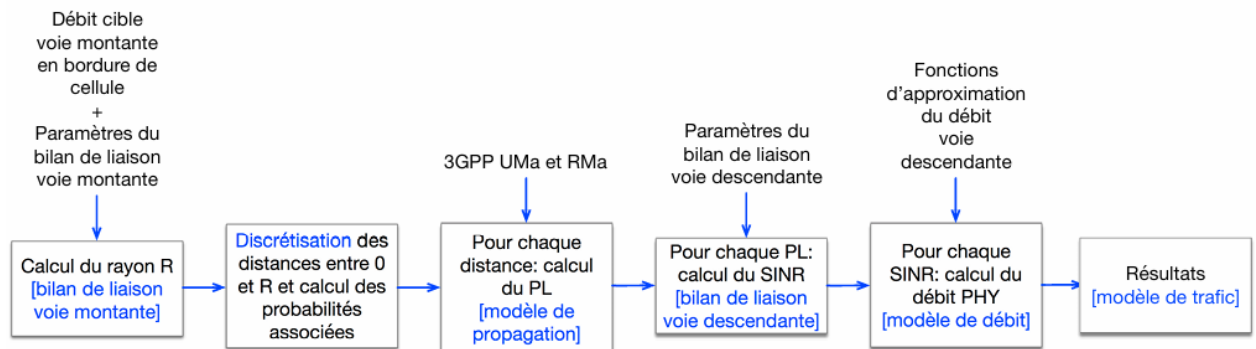


FIGURE 3.2 – Processus de dimensionnement

Le SINR (rapport signal sur bruit et interférences) indique à quel point votre signal est bon par rapport :

- aux parasites venant des antennes autour de vous

- au bruit naturel du système

Pour un utilisateur donné (qu'on appellera n) qui reçoit des données (voie descendante), on peut calculer ce SINR avec la formule suivante[18] :

$$\text{SINR}_i^n = \frac{P_{\text{received},i}^n}{\sigma^2 + p_I^n}, \quad \text{pour } i = 1, 2, \dots, M \quad (3.16)$$

où :

$P_{\text{received},i}^n$ est la puissance reçue par le terminal de l'utilisateur n du réseau N_i ,

σ^2 est la puissance de bruit thermique

P_I^n est l'interférence reçue à partir des différentes sources d'interférence (principalement l'interférence inter-cellulaire) par l'utilisateur.

La puissance reçue par le MT (Mobile Terminal) de l'utilisateur n du réseau N_i peut être donnée par :

$$P_{\text{received},i}^n = P_i^{\text{max}} - P_l(\text{dB}) \quad (3.17)$$

où :

P_i^{max} : puissance maximale transmise par la station de base (BS) ou le point d'accès (AP) du réseau N_i , avec $1 \leq i \leq M$.

M : nombre maximal de réseaux.

P_l : atténuation du canal en raison de l'affaiblissement sur le trajet entre l'utilisateur n et la station de base du réseau N_i , avec $1 \leq i \leq M$.

Le SINR est un paramètre très important dans les réseaux sans fil. Il indique la qualité du signal que reçoit un utilisateur par rapport au bruit et aux interférences venant d'autres antennes. Plus le SINR est élevé, meilleure est la qualité de la connexion. Cela permet au réseau d'utiliser des techniques de transmission plus rapides, ce qui donne un débit plus élevé et une connexion plus stable. En revanche, si le SINR est faible, il faut utiliser des techniques plus simples et plus lentes, ce qui réduit le débit et peut rendre la communication instable ou même impossible. C'est pourquoi le SINR est essentiel lors de la planification d'un réseau : il faut s'assurer que les utilisateurs aient un SINR suffisant pour avoir une bonne qualité de service. Le tableau suivant montre comment le niveau de SINR influence les performances de la liaison :

Valeur du SINR (dB)	Effet sur le débit	Qualité de la liaison
$\text{SINR} \gg 0$	Débit élevé (modulation rapide)	Connexion rapide et stable
$\text{SINR} \approx 0$	Débit moyen (modulation plus simple)	Connexion possible mais moins fiable
$\text{SINR} < 0$	Débit faible (modulation de base)	Connexion lente ou souvent interrompue

TABLE 3.2 – Impact du SINR sur le débit et la qualité de la liaison

3.7 Planification d'un réseau mobile

La planification du réseau gNodeB à l'aide de MATLAB permet d'optimiser la couverture, la capacité et la qualité de service, en déterminant l'emplacement et la configuration des sites. Cette approche repose sur des simulations utilisant des modèles de propagation tels que Urban Macro (UMa), en intégrant les scénarios de visibilité LoS (Line of Sight) et NLoS (Non Line of Sight), afin d'anticiper les performances du réseau et de garantir un déploiement efficace.

3.8 Objectif de la planification

La planification du réseau mobile est un processus clé dans la mise en place d'un réseau de communication efficace et performant. Elle consiste à déterminer la disposition optimale des antennes, des stations de base et des autres composants du réseau, afin d'assurer une couverture étendue, une capacité suffisante et une qualité de service élevée, répondant aux besoins croissants des utilisateurs.

Ce processus repose sur une analyse rigoureuse permettant de prendre des décisions techniques et économiques pertinentes. En pratique, la planification vise à atteindre trois objectifs essentiels :

- Déterminer le nombre minimum de sites nécessaires pour assurer une couverture complète ;
- Identifier les emplacements optimaux pour le déploiement de ces sites ;
- Définir la configuration initiale requise (paramètres radio, fréquences, puissance, etc.) pour chaque site, afin de garantir une performance optimale dès le démarrage.

3.9 Processus de planification

Le processus de planification d'un réseau cellulaire est composé de cinq étapes principales, dont quatre sont réalisées avant le lancement du réseau, tandis que la dernière intervient après sa mise en service [11].

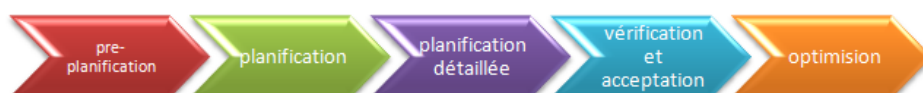


FIGURE 3.3 – Etape de planification d'un réseau cellulaire

3.9.1 Pré-planification

La pré-planification constitue une étape essentielle qui précède la planification opérationnelle du réseau mobile. Elle a pour objectif de rassembler toutes les informations nécessaires à une conception efficace du réseau. Cette phase comprend principalement la collecte de données relatives à la zone de déploiement, notamment :

- Des informations techniques sur les équipements, en particulier le gNB (station de base gNodeB) et l'UE (utilisateur final).
- Des données sur les caractéristiques de la zone ciblée : superficie, densité de population, aspects démographiques et conditions météorologiques.
- Des données géographiques telles que les cartes topographiques, la répartition des habitants, la surface à couvrir et le taux de pénétration des abonnés (trafic estimé, services demandés, etc.)[19].

Une identification précise des emplacements potentiels pour l'installation des stations de base gNB.

- Dans notre cas d'étude, la zone analysée correspond au site BMT du port de la wilaya de Bejaïa, dont la superficie s'étend sur 4,6050 km².

Paramètres	Valeurs
Zone	BMT
Superficie	4,6050 km ²
Antenne	Massive MIMO 5G
Modèle de propagation	UMa(LoS/NLoS)
Fréquence	28 GHz
Portée estimée	$r = 500$ m
Distance au sol	$d = 227,05$ m
Longueur d'onde	$\lambda = 1,071$ cm

TABLE 3.3 – Les paramètres de la BMT

3.9.2 Planification

La phase de planification consiste à utiliser les données de dimensionnement et de configuration initiale pour définir la couverture et la capacité du réseau mobile. Cette étape s'appuie sur un outil spécialisé pour simuler et analyser le comportement du réseau. Le plan nominal permet d'estimer les emplacements et les distances entre les sites, sans toutefois fixer leurs positions exactes sur le terrain.

3.9.3 Planification détaillée

Après avoir défini les emplacements des sites et leurs configurations lors de la phase de planification initiale, on passe à la planification détaillée. Cette étape vise à optimiser le fonctionnement du réseau en planifiant les fréquences, les relations

d'adjacence entre cellules, ainsi que les paramètres techniques tels que la puissance d'émission, l'orientation des antennes et la configuration des porteuses. L'objectif est d'assurer une couverture efficace et une capacité suffisante pour répondre aux besoins des utilisateurs.

3.9.4 Vérification et Acceptation

Une fois l'installation terminée, une phase de vérification est réalisée afin d'identifier d'éventuels défauts ou dysfonctionnements. Avant le lancement officiel du réseau, une première optimisation est effectuée en se concentrant sur les éléments essentiels pour garantir un fonctionnement de base. Après le lancement, une optimisation plus approfondie est mise en œuvre pour améliorer la qualité du service et les performances globales du réseau.

3.9.5 Optimisation

L'optimisation est une étape essentielle et continue dans le cycle de vie d'un réseau. Elle consiste à surveiller en permanence l'état du réseau, en s'appuyant sur des informations telles que les statistiques, les alarmes et le trafic. Ces données permettent de détecter d'éventuels problèmes et d'ajuster les paramètres pour améliorer les performances du réseau. Après avoir exploré la partie théorique dans les chapitres 1 et 2, ainsi que les étapes de planification, nous passons maintenant à la phase pratique, qui constitue le cœur de notre projet.

3.10 Conclusion

La planification et le dimensionnement d'un réseau gNodeB sont essentiels pour garantir un déploiement efficace et performant. Dans ce chapitre, nous avons présenté les principales étapes de ce processus, permettant de concevoir un réseau adapté aux besoins des utilisateurs tout en prenant en compte les contraintes liées au terrain et à la technologie.

Dans le chapitre suivant, nous appliquerons ces concepts théoriques à travers des simulations portant sur un cas réel : la BMT située dans le port de Béjaïa.

Chapitre 4

Simulation et Discussion des Résultats

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons les différentes étapes de la simulation du réseau gNodeB réalisée à l'aide du logiciel MATLAB, version R2024b. Ces simulations s'appuient sur les fondements théoriques développés dans les chapitres précédents, notamment les principes de la technologie gNodeB, le fonctionnement des antennes Massive MIMO, ainsi que l'intégration de la technique de beamforming, permettant la formation de faisceaux radio dirigés vers les utilisateurs.

L'objectif de cette simulation est de concevoir un réseau gNodeB performant visant à optimiser la couverture du site BTM. Pour ce faire, nous analysons la portée et la qualité des faisceaux émis par une antenne Massive MIMO, en nous appuyant sur le modèle de propagation UMA (Urban Macrocell) défini par la norme 3GPP TR 38.901. Ce modèle permet d'appliquer des pertes spécifiques (LoS/NLoS).

Cette approche vise à valider la configuration retenue et à optimiser le positionnement des faisceaux, afin de répondre efficacement aux exigences de connectivité du site étudié.

4.2 Analyse de cas du port de Bejaïa et importation de la carte géographique

Dans le cadre de l'optimisation de la couverture gNodeB, une étude a été menée afin de déterminer l'emplacement optimal d'une antenne Massive MIMO. L'objectif est de maximiser la qualité de service en exploitant la technique de beamforming, qui permet de concentrer les faisceaux radio vers les utilisateurs tout en réduisant les interférences intercellulaires.

Pour modéliser la propagation du signal radio, le modèle UMA (Urban Macrocell), défini par la norme 3GPP, a été utilisé. Ce modèle repose sur deux scénarios de perte de propagation :

- LoS (Line-of-Sight) : le signal radio entre l'émetteur et le récepteur se propage sans obstacle, assurant une transmission directe.
 - NLoS (Non-Line-of-Sight) : la ligne de visée directe est obstruée, ce qui contraint le signal à atteindre le récepteur par des réflexions, des diffractions ou des diffusions.
- Afin de garantir des résultats de simulation fiables et exempts de perturbations externes, le réseau eNodeB existant a été temporairement désactivé dans la zone d'étude. Cette mesure vise à éviter les chevauchements de fréquences et à limiter les interférences, assurant ainsi une couverture gNodeB plus homogène, stable et performante. La zone d'analyse correspond à la zone portuaire de Bejaïa, située aux coordonnées géographiques suivantes : 36.7460° de latitude et 5.0850° de longitude.

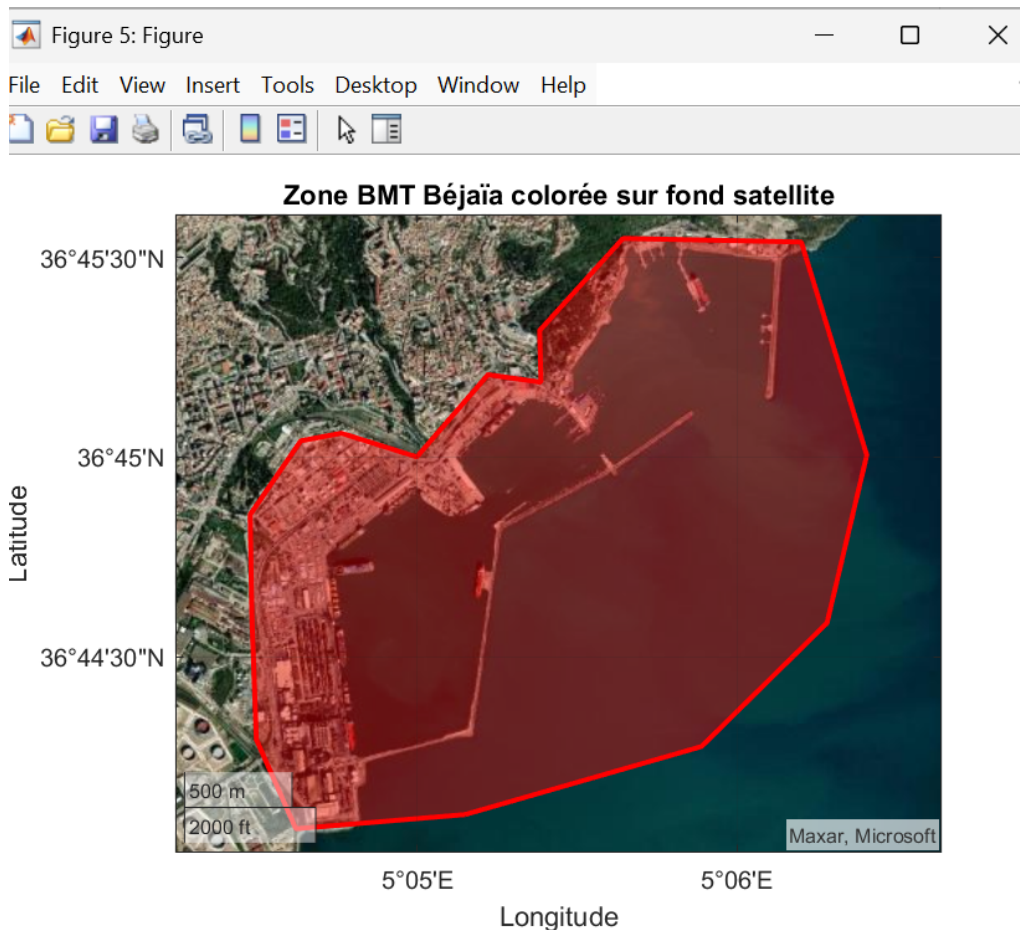


FIGURE 4.1 – Le port de Bajaia

4.2.1 Description de l'importation de la carte

Pour représenter une zone géographique spécifique dans MATLAB, une méthode efficace consiste à utiliser Google My Maps pour créer une carte personnalisée. Grâce à l'outil « Ajouter une ligne ou une forme », l'utilisateur peut dessiner avec précision les contours de la zone d'intérêt (par exemple, un port, un quartier ou un site industriel). Cet outil facilite ainsi la délimitation visuelle de la zone ciblée, selon des besoins spécifiques.

Une fois la zone dessinée, elle peut être exportée au format KML (Keyhole Markup Language), un format standardisé pour le stockage de données géospatiales. Le fichier .kml obtenu peut ensuite être importé dans MATLAB à l'aide des fonctions `kmlread` (pour les anciennes versions) ou `readgeotable` (dans les versions récentes).

Cette importation permet de récupérer les coordonnées géographiques des formes dessinées, qui peuvent ensuite être affichées dans MATLAB via des fonctions telles que `geoaxes`, `geoplot` ou `geopolyshape`. Cette méthode offre ainsi la possibilité de visualiser, d'analyser et de superposer des données techniques (telles que les lobes de couverture ou la position des utilisateurs) directement sur une carte satellite précise, intégrée à l'environnement de simulation MATLAB.

4.3 Étude de l'existence du réseau actuel

La zone du terminal BMT (Bejaïa Mediterranean Terminal) est actuellement desservie par un réseau mobile eNodeB, dont l'antenne principale est centrée autour des coordonnées géographiques 36.74005° N de latitude et 5.07813° E de longitude. Toutefois, plusieurs limitations ont été constatées en matière de couverture et de qualité de service, notamment dans la zone du parc à conteneurs, où la connectivité devient instable ou insuffisante lors des opérations logistiques.

Dans l'objectif de remédier à ces insuffisances, une zone d'étude a été délimitée autour de cette partie critique du site. Cette zone servira de base pour la planification et l'optimisation du futur réseau gNodeB, en vue d'assurer une connectivité fiable et continue, notamment pour les tâches sensibles telles que le contrôle et le suivi des marchandises.

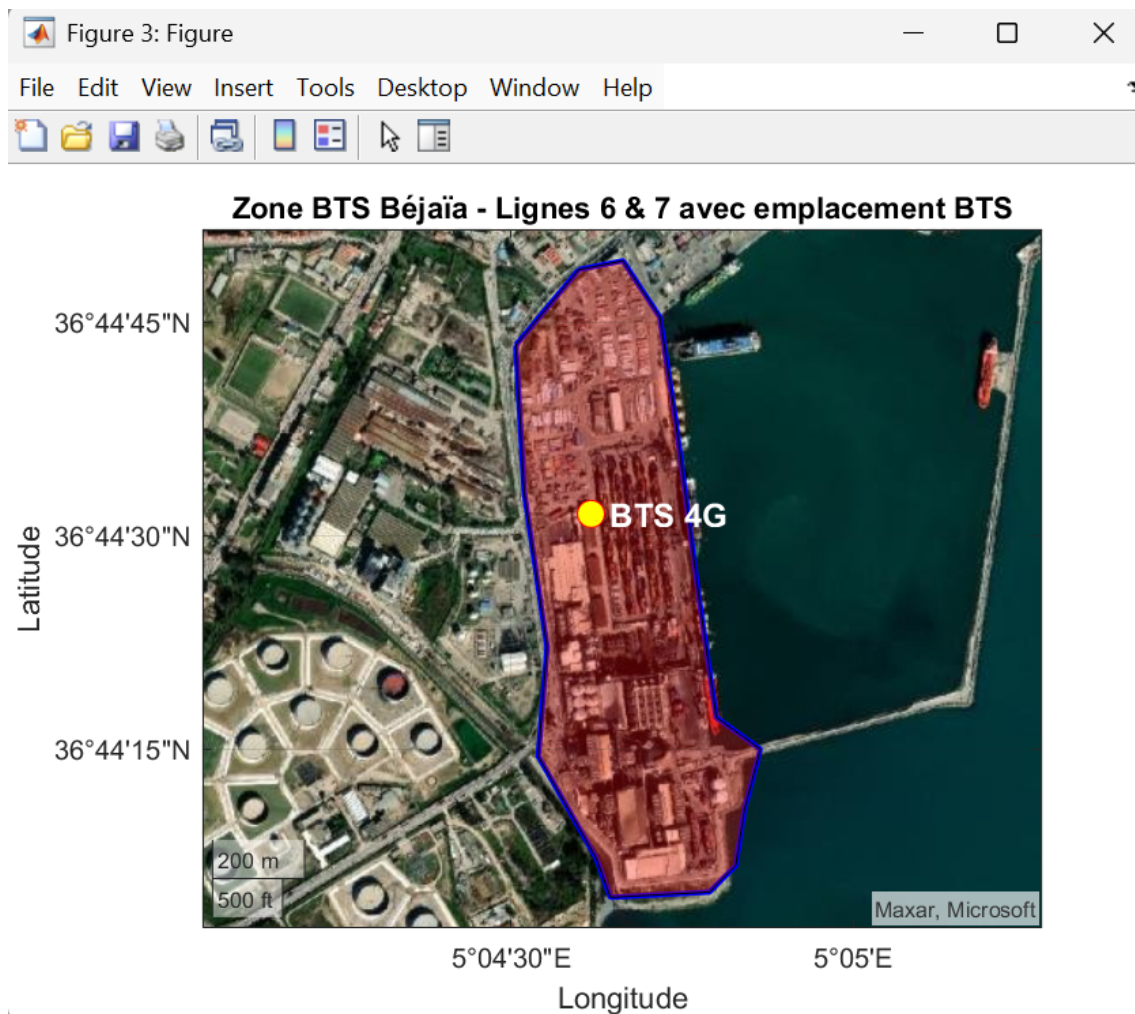


FIGURE 4.2 – L'emplacement de la station de base eNodeB

4.3.1 La couverture de l'eNodeB

Le réseau actuellement installé au niveau du BMT est un réseau eNodeB. Cependant, son emplacement géographique ne permet pas une couverture optimale, notamment en direction de la zone de travail. Cette situation engendre une faible qualité de signal et peut provoquer des problèmes de connectivité pour les utilisateurs présents dans cette zone.

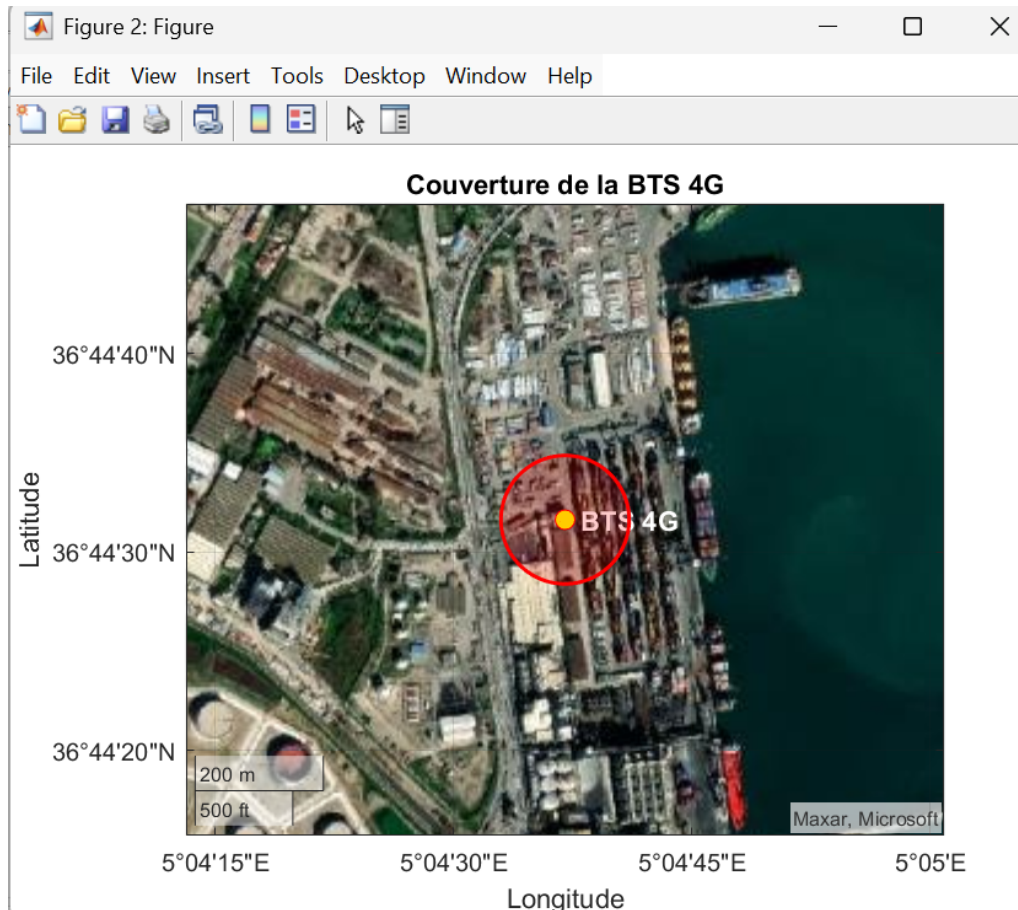


FIGURE 4.3 – La couverture de l'eNodeB

4.4 Installation de réseau gNodeB

Pour améliorer la couverture gNodeB, une étude approfondie a été menée afin de déterminer l'emplacement optimal pour l'installation d'une antenne Massive MIMO. L'objectif principal est d'assurer une qualité de service optimale grâce à la technique de beamforming, qui concentre les faisceaux radio vers les utilisateurs tout en réduisant les interférences intercellulaires.

La modélisation de la propagation du signal radio repose sur le modèle UMA (Urban Macrocell), défini par la norme 3GPP. Ce modèle distingue deux scénarios de perte de propagation :

LoS (Line-of-Sight) : le signal radio se propage directement entre l'émetteur et le

récepteur, sans obstacle.

NLoS (Non-Line-of-Sight) : la ligne de visée directe est bloquée, obligeant le signal à atteindre le récepteur par réflexion, diffraction ou diffusion.

Afin de garantir des résultats de simulation fiables et exempts de perturbations externes, le réseau eNodeB existant a été temporairement désactivé dans la zone d'étude. Cette mesure vise à éviter tout chevauchement de fréquences et à réduire les interférences, assurant ainsi une couverture gNodeB plus homogène, stable et performante.

L'installation d'une antenne Massive MIMO s'est imposée comme une solution pertinente pour répondre aux besoins de couverture de la zone étudiée. Son emplacement a été défini en tenant compte des contraintes topographiques ainsi que des besoins spécifiques du site, et a été fixé aux coordonnées géographiques 36.7397° N (latitude) et 5.07819° E (longitude). Cette configuration optimise la couverture réseau et garantit une qualité de signal homogène sur l'ensemble de la zone ciblée.

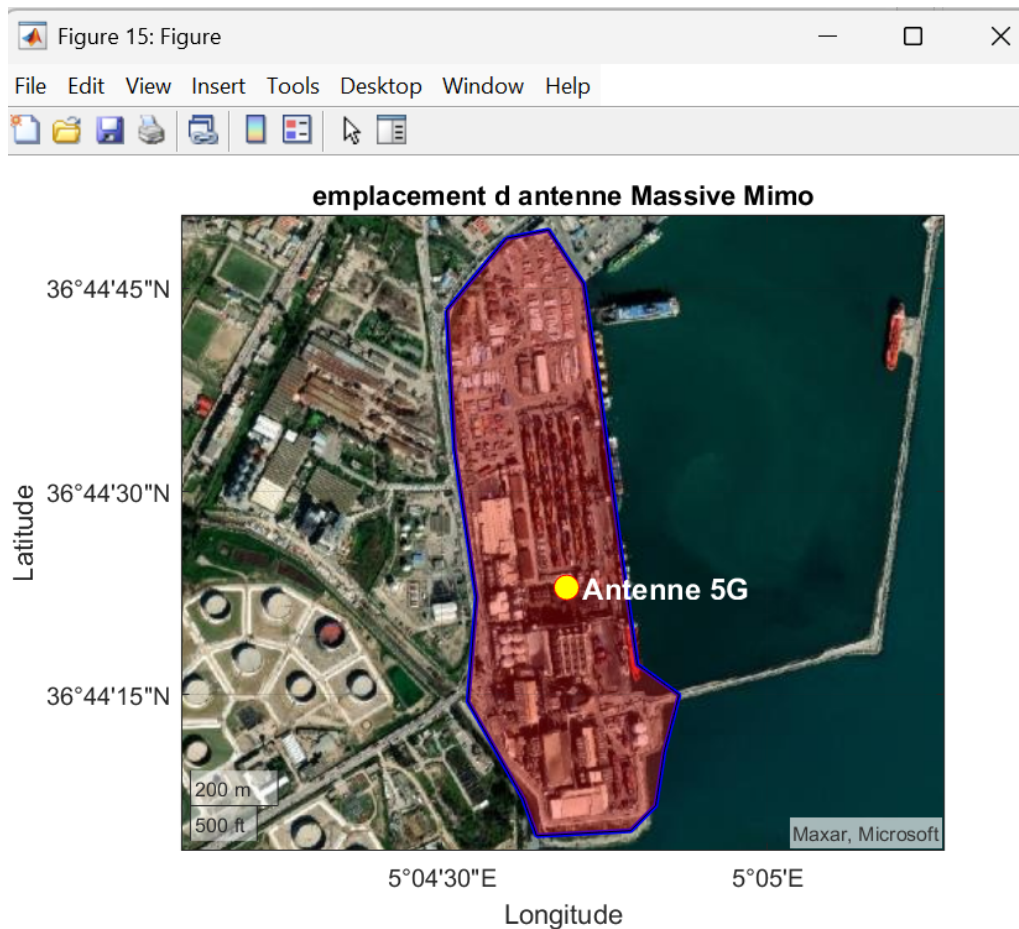


FIGURE 4.4 – Emplacement antenne massive MIMO gNodeB

4.4.1 Antenne Massive MIMO gNodeB

L'antenne Massive MIMO gNodeB joue un rôle clé dans une zone portuaire en assurant une connectivité rapide, stable et simultanée pour un grand nombre d'équi-

pements et d'utilisateurs. Grâce à ses nombreuses antennes, la technique de beamforming permet de diriger le signal de façon ciblée vers les terminaux, optimisant ainsi la couverture, la capacité et la qualité du service, même dans un environnement complexe comme un port, où les obstacles métalliques, les conteneurs. Cette technologie est donc indispensable pour les opérations logistiques, la surveillance, l'automatisation et les communications en temps réel. Pour évaluer la couverture et les performances, le modèle de propagation UMA a été utilisé, tenant compte des pertes liées à la distance et aux spécificités de l'environnement portuaire. En complément, la technique d'accès SDMA permet à plusieurs utilisateurs de partager les mêmes ressources spectrales en les séparant spatialement. Cette séparation est rendue possible grâce à Massive MIMO, qui utilise le beamforming pour former des faisceaux dirigés vers chaque utilisateur. Ensemble, SDMA, Massive MIMO et beamforming améliorent l'efficacité spectrale tout en réduisant les interférences inter-utilisateurs.

4.4.2 Le choix des paramètres de l'antenne Massive MIMO

Dans ce projet, une antenne Massive MIMO de configuration 32×32 a été déployée, totalisant 1024 éléments rayonnants. Cette configuration permet de générer jusqu'à 1024 faisceaux simultanés dans le cadre d'un traitement numérique complet, assurant ainsi une couverture étendue tout en minimisant les interférences entre éléments.

La bande de fréquence de 28 GHz a été sélectionnée en raison de sa capacité à offrir des débits élevés et à gérer efficacement un grand nombre d'utilisateurs simultanés. L'adoption d'une répartition uniforme des lobes permet de diffuser le signal de manière équilibrée sur l'ensemble de la zone à couvrir. Cette approche garantit une couverture homogène, réduit les zones d'ombre et simplifie la gestion des interférences entre faisceaux. Elle est particulièrement adaptée aux environnements ouverts tels que les zones portuaires, où une couverture continue est essentielle pour maintenir la connectivité de l'ensemble des équipements et utilisateurs.

Le tableau ci-dessous présente les paramètres essentiels retenus pour le déploiement de l'antenne Massive MIMO gNodeB (station de base).

Paramètre	Valeur utilisée	Signification
Configuration MIMO	$32 \times 32 = 1024$ antennes	Nombre total d'éléments rayonnants permettant de former jusqu'à 1024 faisceaux simultanés dirigés vers les utilisateurs.
Fréquence	28 GHz	Fréquence millimétrique (mmWave) offrant un débit élevé mais une portée plus courte.
Longueur d'onde	$\lambda = \frac{C}{f} = \frac{3 \times 10^8}{28 \times 10^9} \approx 1.071$ cm	Taille approximative de l'onde électromagnétique à 28 GHz.
Bande passante	400 MHz	Largeur de spectre disponible pour la transmission des données.
Hauteur station de base	30 m	Hauteur de l'antenne émettrice, favorisant une portée accrue du signal.
Hauteur utilisateur	1.5 m	Hauteur moyenne d'un terminal utilisateur (téléphone, capteur, etc.).

TABLE 4.1 – Paramètres d'antenne Massive MIMO

4.5 Simulation de la couverture d'une antenne Massive MIMO dotée de 16 faisceaux

Dans cette simulation, une antenne Massive MIMO est configurée avec 16 faisceaux de rayonnement répartis de façon uniforme sur l'ensemble des 360° . Chaque faisceau est orienté dans une direction spécifique, assurant une couverture équilibrée et ciblée de la zone géographique d'étude. Cette configuration optimise la distribution du signal et garantit une qualité de service homogène.

Grâce à l'utilisation de la modulation 64QAM, chaque utilisateur connecté bénéficie d'un débit stable et fiable. Le nombre d'utilisateurs pouvant être desservis simultanément dépend principalement du nombre de faisceaux disponibles et de la bande passante attribuée à chaque utilisateur.

Pour assurer une couverture optimale de la zone étudiée, des calculs préalables ont été effectués afin de définir la répartition angulaire et la portée de chaque faisceau émis par l'antenne Massive MIMO. Ces calculs permettent de simuler avec précision la propagation du signal et d'ajuster l'orientation des faisceaux, afin de garantir une couverture complète et homogène de la zone cible.

- Débit par faisceau : la quantité de données transmises par seconde à travers un seul lobe (ou faisceau) d'une antenne.

$$D = BP \times \log_{10}(M) \times r \quad (4.1)$$

Donc :

$$D = 400 \times 10^6 \times \log_{10}(64) \times \frac{3}{4} \approx 1.8 Gbps$$

•Débit total : la somme des débits transmis par l'ensemble des lobes (ou faisceaux) d'une antenne.

$$D_{\text{total}} = D \times N = 1.8 \times 16 = 28.8 \text{ Gbps} \quad (4.2)$$

•Débit par utilisateur : la quantité de données qu'un utilisateur peut envoyer ou recevoir chaque seconde. Dans notre cas, une bande passante de 20 Mbps est allouée à chaque utilisateur.

$$D_{\text{utilisateur}} = BP_{\text{utilisateur}} \times \log_{10}(M) \times r = 20 \times 10^6 \times \log_{10}(64) \times \frac{3}{4} \approx 90 \text{ Mbps} \quad (4.3)$$

•Nombre d'utilisateurs simultanés : représente le nombre d'utilisateurs pouvant être connectés et servis en même temps par l'antenne.

$$N_{\text{utilisateur}} = \frac{BP}{BP_{\text{utilisateur}}} = \frac{400}{20} = 20 \text{ utilisateur/faisceau} \quad (4.4)$$

Donc :

$$20 \times N = 20 \times 16 = 320 \text{ utilisateurs simultanés}$$

•Largeur angulaire : représente l'angle couvert par un lobe de rayonnement d'antenne sur un cercle complet de 360°.

$$\theta = \frac{2 \times \lambda}{N \times d} = \frac{2 \times \lambda}{N \times \frac{\lambda}{2}} = \frac{4}{N} = 0.25 \text{ rad} = 14.32^\circ \quad (4.5)$$

•Espacement angulaire : c'est l'angle entre les directions centrales de deux lobes successifs.

$$\Delta\theta = \frac{360^\circ}{N} = \frac{360^\circ}{16} = 22.5^\circ \quad (4.6)$$

où N est le nombre de lobes.

Le tableau suivant récapitule les principales grandeurs physiques dans le cadre de l'analyse des lobes d'antenne, pour une configuration à 16 faisceaux.

Paramètres	Valeurs
Bande passante par utilisateur	20 MHz
Débit total	28.8 Gbps
Débit par utilisateur	90 Mbps
Débit par faisceau	1.8 Gbps
Nombre d'utilisateurs simultanés	320 utilisateurs
Nombre d'utilisateurs par faisceau	20 utilisateurs/faisceau
Largeur angulaire	14.32°
Espacement angulaire	22.5°

TABLE 4.2 – Paramètres clés des lobes d'antenne pour 16 faisceaux

La figure ci-dessous illustre la propagation d'une antenne Massive MIMO configurée avec 16 faisceaux dans la zone étudiée. Cette configuration vise à couvrir l'ensemble du périmètre, en réduisant les zones mortes et en assurant une répartition homogène du signal grâce à l'orientation précise de chaque faisceau.

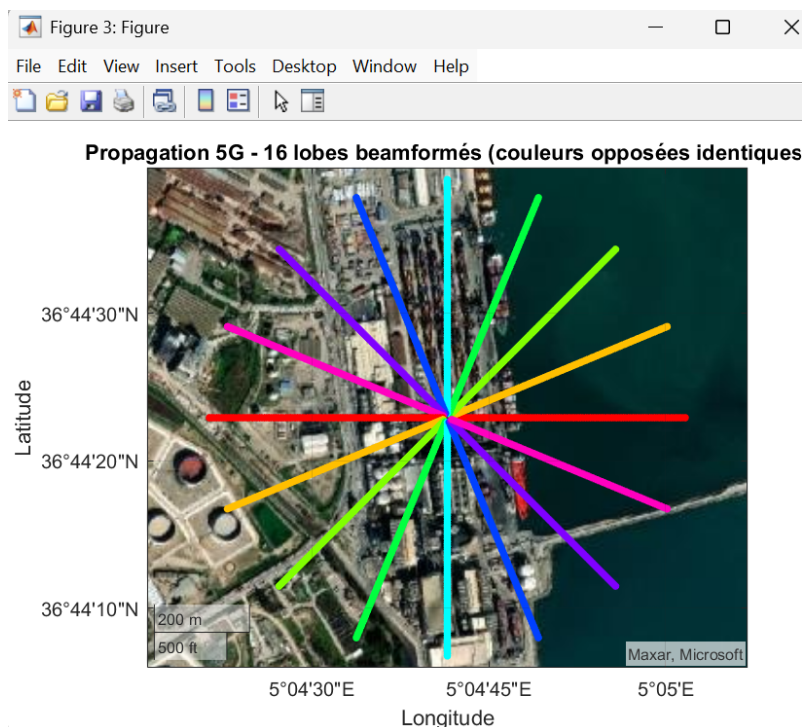


FIGURE 4.5 – Propagation d'une antenne Massive MIMO à 16 faisceaux

4.5.1 Simulation de la couverture d'une antenne Massive MIMO dotée de 32 faisceaux

Dans le cadre de cette simulation, une antenne Massive MIMO est configurée pour émettre 32 faisceaux de rayonnement, répartis de manière homogène sur 360° autour de l'antenne. L'augmentation du nombre de faisceaux vise à améliorer la couverture de la zone d'étude et à réduire les zones mortes, tout en assurant une répartition plus équilibrée des utilisateurs sur chaque faisceau.

La modulation 256QAM est utilisée afin d'offrir des débits élevés et une qualité de service adaptée aux besoins des utilisateurs les plus exigeants. Cette configuration permet d'optimiser la capacité du système et de réduire les interférences entre les faisceaux adjacents.

Grâce à des techniques avancées de beamforming, chaque faisceau est orienté de manière précise et dynamique, garantissant une couverture uniforme et ciblée, même dans des environnements denses et complexes, tels que les ports ou les zones industrielles. Cette simulation permet ainsi d'évaluer de façon réaliste les performances de l'antenne Massive MIMO et de valider son efficacité en termes de débit et de fiabilité.

Dans notre système de communication reposant sur une antenne Massive MIMO à 32 lobes, l'augmentation du nombre de faisceaux permet de diviser la couverture spatiale de manière plus fine, améliorant ainsi la couverture des zones mortes et offrant une connectivité plus fiable, même dans des environnements denses ou obscurés.

Cette configuration assure un débit total élevé de 76,8 Gbps, grâce à l'utilisation de la modulation 256QAM et d'une bande passante de 20 MHz par utilisateur. Elle

permet à chaque faisceau de fournir un débit de 2,4 Gbps, et à chaque utilisateur de bénéficier d'un débit de 120 Mbps.

Cependant, l'augmentation du nombre de lobes entraîne un espacement angulaire plus réduit, ce qui nécessite un contrôle rigoureux des interférences inter-faisceaux, afin de garantir des communications fiables et de haute qualité.

Paramètres	Valeurs
Bande passante par utilisateur	20 MHz
Débit total	76.8 Gbps
Débit par utilisateur	120 Mbps
Débit par faisceau	2.4 Gbps
Nombre d'utilisateurs simultanés	640 utilisateurs
Nombre d'utilisateurs par faisceau	20 utilisateurs / faisceau
Largeur angulaire	7.16°
Espacement angulaire	11.25°

TABLE 4.3 – Paramètres clés des lobes d'antenne pour 32 faisceaux

La figure suivante, issue des résultats calculés, valide les valeurs du tableau 4.3 tout en simulant la propagation des lobes dans la zone étudiée.

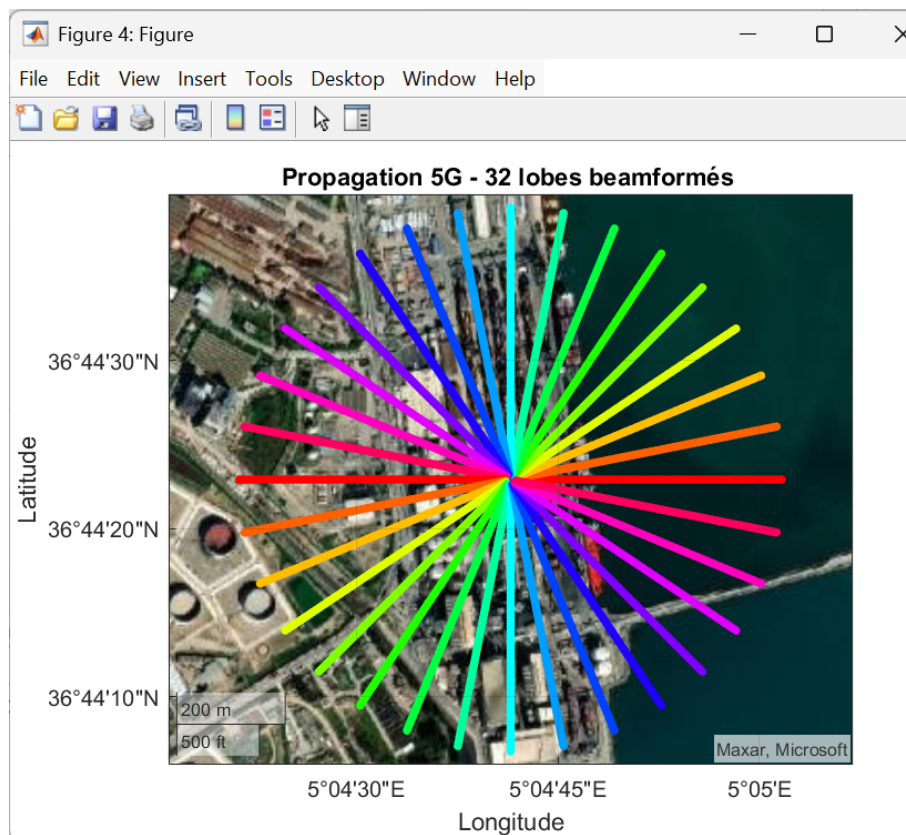


FIGURE 4.6 – Propagation d'antenne massive MIMO à 32 faisceaux

4.6 Analyse du SINR en fonction de la distance

Dans le cas LoS (ligne de vue), le signal va directement de l'émetteur au récepteur sans obstacle, donc il s'affaiblit surtout à cause de la distance. Le SINR est assez élevé : environ 105 dB à 50 mètres, puis il baisse doucement à 36 dB avec une antenne à 16 lobes et 34 dB avec 32 lobes à 2000 mètres. On remarque que le SINR baisse un peu plus quand il y a plus de lobes, peut-être à cause d'interférences autour.

Pour le cas NLoS (pas de ligne de vue), des obstacles bloquent le signal, qui arrive donc par des réflexions ou diffractions. Cela fait que le SINR est plus faible. À 50 mètres, il est encore à 80 dB avec 16 lobes et 75 dB avec 32 lobes, mais il chute très vite à 5 dB (16 lobes) et 3 dB (32 lobes) à 2000 mètres.

Le nombre de lobes influence aussi les performances. En LoS, les antennes à 16 lobes couvrent mieux les longues distances. En NLoS, les antennes à 32 lobes, qui sont plus précises, ont plus de mal à capter les signaux indirects, donc elles fonctionnent moins bien dans des zones avec des obstacles.

Comme on le voit dans la figure (4.7), ces différences de SINR montrent clairement l'impact des obstacles et du nombre de lobes sur la qualité du signal selon la distance.

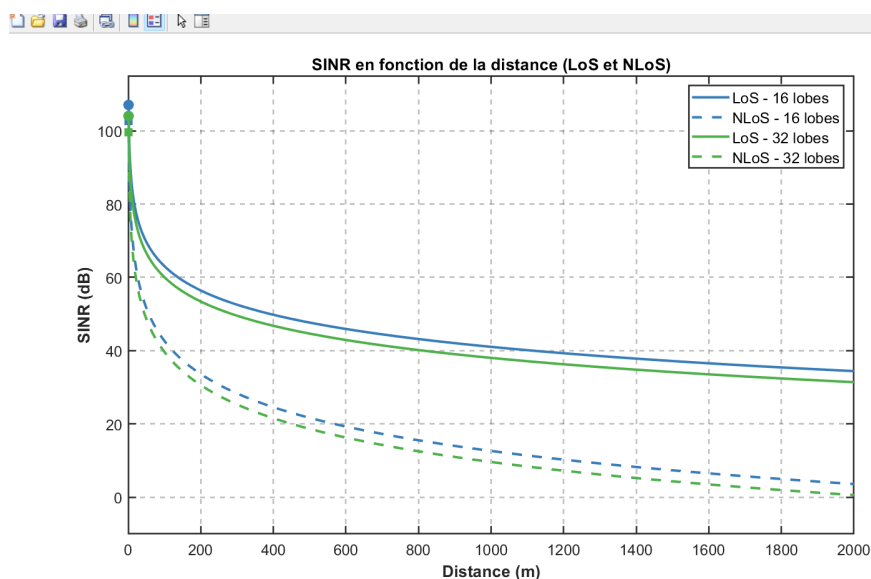


FIGURE 4.7 – Variation du SINR en fonction de la distance dans les contextes LoS et NLoS

4.7 Débit en fonction de la distance

Le débit dans un réseau sans fil comme la gNodeB baisse quand la distance augmente, à cause de la perte du signal et des interférences qui réduisent la qualité du signal (SINR).

Selon la figure 4.8, en situation LoS (ligne de vue), le signal direct permet de garder un débit élevé, même sur de longues distances. À 50 mètres, une antenne à 32 lobes peut atteindre environ 78 Gbps, contre 30 Gbps pour une antenne à 16 lobes. À

2000 mètres, le débit baisse à 28 Gbps avec 32 lobes et à 10 Gbps avec 16 lobes. En NLoS (sans ligne de vue), les obstacles font que le signal arrive par réflexion ou diffraction, ce qui réduit beaucoup les performances. À longue distance, le débit tombe à environ 3 Gbps avec 32 lobes et 2 Gbps avec 16 lobes. Les antennes à 32 lobes fonctionnent mieux en LoS grâce à leur capacité à concentrer le signal, tandis que celles à 16 lobes sont plus adaptées aux environnements NLoS car elles couvrent une plus grande zone et captent mieux les signaux réfléchis.

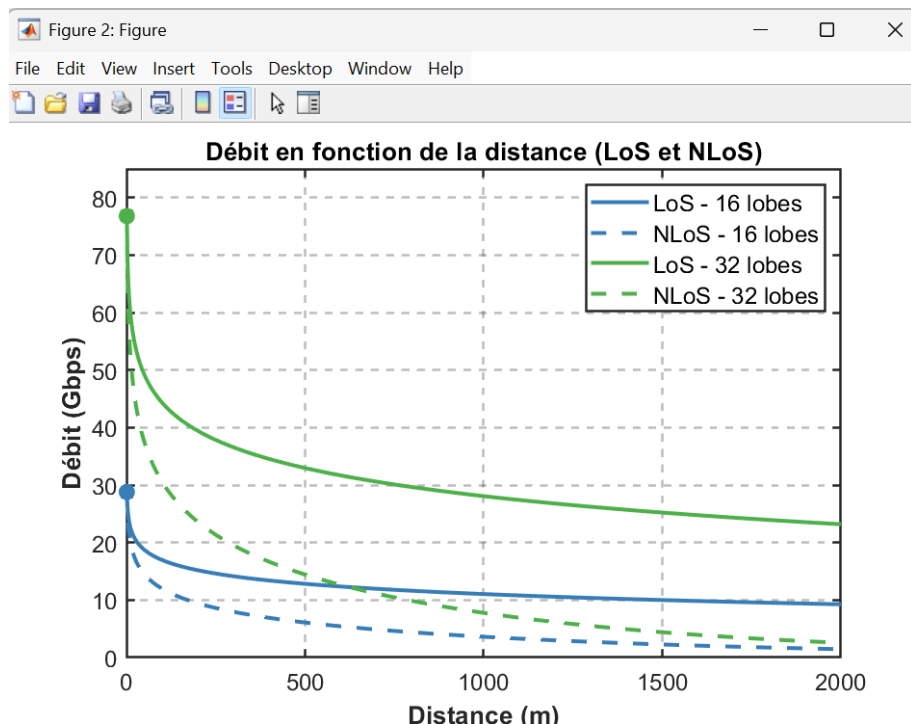


FIGURE 4.8 – Étude comparative du débit en fonction de la distance dans les contextes LoS et NLoS

Le débit dépend du type de modulation utilisé pendant la transmission. Pour avoir un débit élevé, le système utilise une modulation plus avancée comme le 256-QAM, qui permet d'envoyer plus d'informations à la fois. Mais quand les conditions deviennent mauvaises, surtout quand la distance augmente, le système utilise des modulations plus simples comme le 64-QAM, le 16-QAM ou même le QPSK. Ces modulations sont plus stables, mais donnent un débit plus faible.

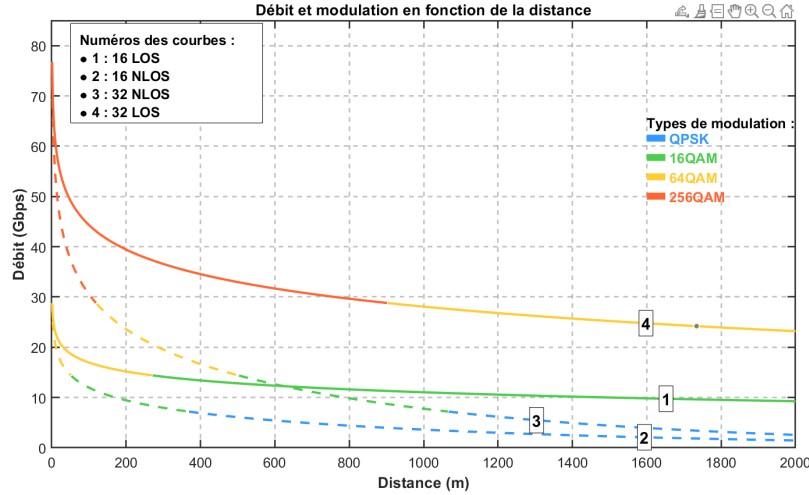


FIGURE 4.9 – Influence de la distance sur le débit et le choix de la modulation

Comme on le voit dans la figure 4.9, le type de modulation change selon la distance et la qualité du signal. Par exemple, en LoS avec une antenne à 32 lobes (courbe 4), la modulation reste en 256-QAM jusqu'à 500 mètres, ce qui permet d'avoir un débit au-dessus de 50 Gbps. Après cette distance, le système passe au 64-QAM, puis au 16-QAM, et le débit diminue jusqu'à environ 28 Gbps à 2000 mètres. En revanche, en NLoS avec une antenne à 16 lobes (courbe 2), le débit baisse plus vite. La modulation passe au QPSK avant 1000 mètres, et le débit tombe en dessous de 5 Gbps vers 1800 mètres.

Les tableaux présentés plus haut montrent bien quel type de modulation est utilisé dans chaque situation, selon les débits mesurés pendant la transmission.

Distance (m)	16 lobes - LoS	32 lobes - LoS
0	28.8 Gbps (64-QAM) / 106 dB	76.8 Gbps (256-QAM) / 102 dB
500	13.5 Gbps (16-QAM) / 55 dB	34.0 Gbps (256-QAM) / 51 dB
1000	9.0 Gbps (16-QAM) / 42 dB	26.0 Gbps (64-QAM) / 40 dB
1500	5.2 Gbps (16-QAM) / 32 dB	19.5 Gbps (64-QAM) / 30 dB
2000	3.5 Gbps (16-QAM) / 25 dB	13.2 Gbps (64-QAM) / 22 dB

TABLE 4.4 – Débit, modulation et SINR en fonction de la distance pour scénarios LoS

La figure 4.9 montre comment le débit change avec la distance selon le type de modulation utilisé (QPSK, 16-QAM, 64-QAM et 256-QAM), dans les cas LoS et NLoS. Elle met en évidence que le système adapte automatiquement la modulation en fonction de la qualité du signal radio.

4.8 Étude des pertes de propagation

L'évolution des pertes de propagation en fonction de la distance varie selon que le signal est en visibilité directe (LoS) ou non (NLoS). Plus la distance augmente, plus

Distance (m)	16 lobes - NLoS	32 lobes - NLoS
0	28.8 Gbps (64-QAM) / 85 dB	76.8 Gbps (256-QAM) / 82 dB
500	7.5 Gbps (QPSK) / 25 dB	19.0 Gbps (16-QAM) / 22 dB
1000	4.0 Gbps (QPSK) / 15 dB	10.0 Gbps (16-QAM) / 12 dB
1500	2.1 Gbps (QPSK) / 9 dB	6.2 Gbps (QPSK) / 7 dB
2000	1.2 Gbps (QPSK) / 5 dB	3.5 Gbps (QPSK) / 4 dB

TABLE 4.5 – Débit, modulation et SINR en fonction de la distance pour scénarios NLoS

les pertes deviennent importantes, surtout lorsque le signal rencontre des obstacles. Cette différence entre les deux cas est clairement visible grâce aux résultats obtenus. D'après le Tableau 4.6 ci-dessous, une synthèse comparative des valeurs obtenues à différentes distances est présentée. Pour une courte distance de 100 m, la perte en scénario LoS est d'environ 85 dB, tandis qu'en NLoS, elle atteint 110 dB. Les pertes augmentent avec la distance, atteignant 130 dB en LoS et 160 dB en NLoS à 2000 m.

Distance (m)	Perte de propagation LoS (dB)	Perte de propagation NLoS (dB)
100	~ 85	~ 110
500	~ 110	~ 140
1000	~ 120	~ 150
1500	~ 125	~ 155
2000	~ 130	~ 160

TABLE 4.6 – Comparaison des pertes de propagation en fonction de la distance pour les scénarios LoS et NLoS

Ces résultats, représentés par la Figure 4.10, montrent que dans le cas LoS, le signal se propage plus facilement, avec moins de pertes. En revanche, en NLoS, le signal est affaibli par les obstacles (réflexions, diffractions, diffusions), ce qui provoque une forte diminution de la qualité. Cette analyse confirme l'importance de prendre en compte ces deux situations lors de la planification d'un réseau 5G, en particulier dans un environnement portuaire où les obstacles sont nombreux. L'utilisation d'un modèle adapté permet ainsi d'assurer une couverture efficace et fiable.

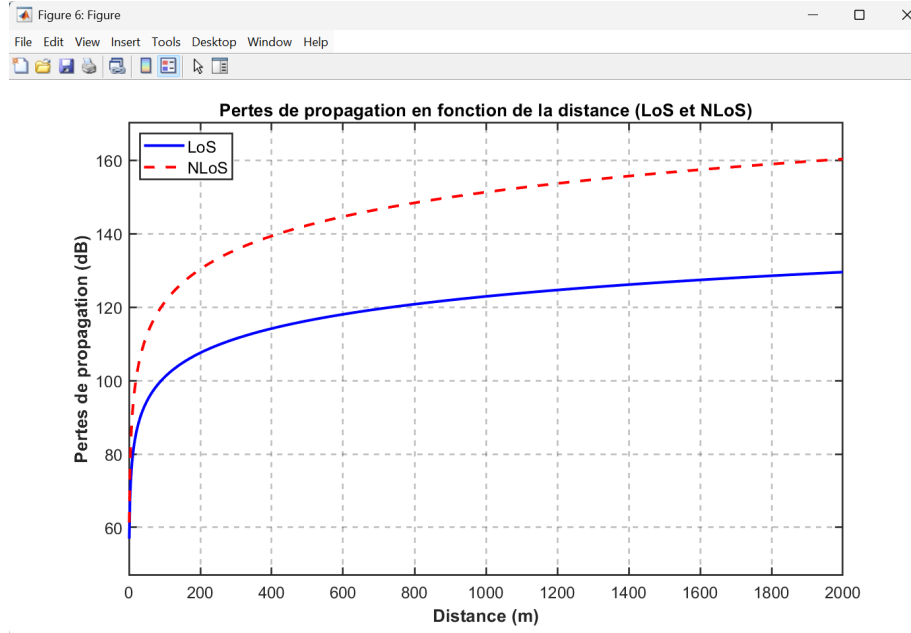


FIGURE 4.10 – Influence de la distance sur le débit et le choix de la modulation

4.9 Amélioration du modèle UMA par l'intégration de la probabilité de visibilité (LoS/NLoS)

Le modèle de propagation UMA amélioré que nous avons adopté prend en compte la probabilité de visibilité directe (LoS — Line of Sight) en fonction de la distance entre la station de base et l'utilisateur. Contrairement aux approches classiques qui considèrent séparément les scénarios LoS et NLoS, ce modèle utilise une pondération dynamique basée sur la probabilité de LoS définie par le 3GPP TR 38.901, permettant ainsi de simuler plus fidèlement les conditions de propagation réelles. Dans un environnement urbain macrocellulaire (UMa), la probabilité de LoS standard est donnée par[20] :

$$p_{\text{LoS}}(d) = \min\left(\frac{d_1}{d}, 1\right) (1 - e^{-d/d_2}) + e^{-d/d_2} \quad (4.7)$$

où :

- d est la distance en mètres .
- $d_1 = 18$ m et $d_2 = 63$ m sont des coefficients issus de mesures empiriques, selon les recommandations du 3GPP pour les environnements urbains de type UMa.
- Pour capturer les variations de visibilité dans des milieux complexes comme les zones portuaires (présence de conteneurs, grues, navires), un modèle composite à deux zones est introduit. Il distingue deux régimes de probabilité :
- $p_{\text{LoS}}^{(1)}(d)$: probabilité de LoS dans la **zone proche**, souvent dégagée, proche de la station de base ;
- $p_{\text{LoS}}^{(2)}(d)$: probabilité de LoS dans la **zone lointaine**, généralement plus encombrée (bâtiments, obstacles).

La probabilité globale de LoS est alors modélisée comme une combinaison des deux, pondérée par une fonction de transition qui tient compte de la densité ou de la hauteur des obstacles[20] :

$$p_{\text{LoS}}(d) = f(x) \cdot p_{\text{LoS}}^{(1)}(d) + [1 - f(x)] \cdot p_{\text{LoS}}^{(2)}(d) \quad (4.8)$$

La fonction $f(x)$ traduit la probabilité qu'un lien soit en zone dégagée à la position x , en fonction de la distribution statistique de la hauteur des obstacles, supposée gaussienne :

$$f(x) = 1 - \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{h(x) - \mu_h}{\sqrt{2} \sigma_h} \right) \right] \quad (4.9)$$

où :

- $h(x)$: hauteur de l'obstacle à la position x ,
- μ_h : hauteur moyenne des obstacles,
- σ_h : écart-type des hauteurs,
- erf : fonction d'erreur associée à la loi normale.

Cette approche probabiliste hybride permet de mieux représenter la visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur, en tenant compte de la distance et de l'environnement (urbain ou portuaire). Elle améliore l'estimation des pertes de propagation et des performances du réseau gNodeB. La figure ci-dessous illustre l'évolution de la probabilité de LoS en fonction de la distance.

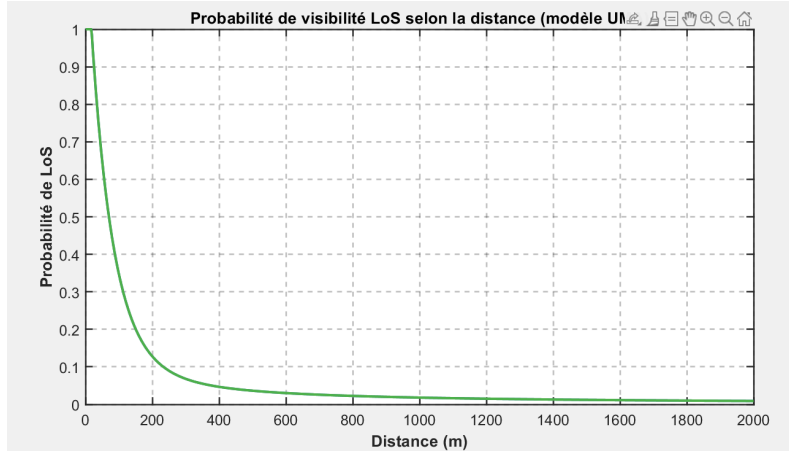


FIGURE 4.11 – Les pertes de probabilité de LOS en fonction de la distance

La figure suivante illustre l'évolution du débit en fonction de la distance entre l'utilisateur et la station de base, en intégrant la probabilité de visibilité directe (LoS) selon le modèle UMA. Cette approche permet de simuler de manière plus réaliste les performances du réseau gNodeB dans un environnement portuaire.

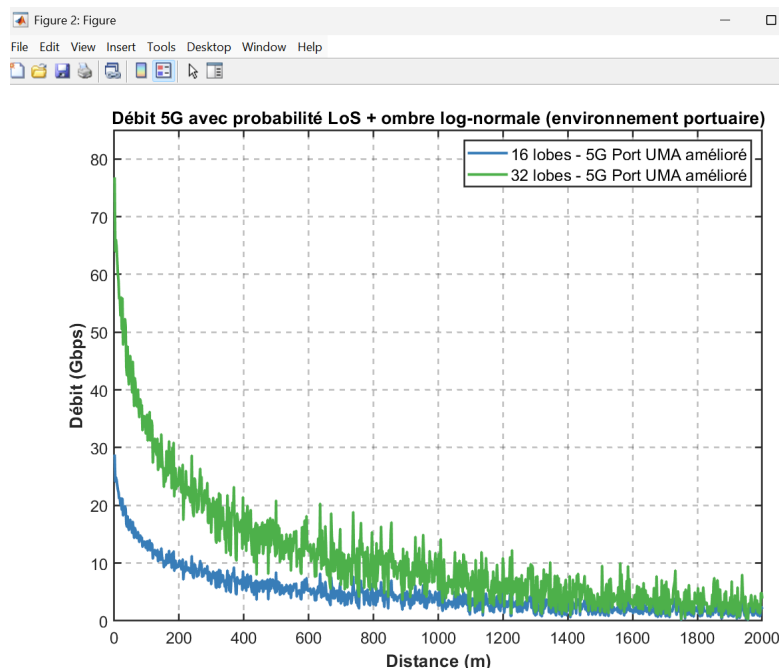


FIGURE 4.12 – Débit en fonction de la distance intégrant la probabilité de visibilité LoS selon le modèle UMA amélioré

4.10 Conclusion

À l'issue de ce travail, nous avons démontré l'importance du déploiement d'un réseau gNodeB optimisé dans la zone portuaire grâce à l'intégration d'antennes massives MIMO et à la technique de beamforming, afin d'assurer une couverture plus efficace et ciblée. Après avoir étudié et comparé les scénarios de propagation LoS et NLoS selon le modèle UMA, nous avons pu identifier l'impact des obstacles sur la qualité de service et la couverture du réseau.

L'analyse des résultats en termes de SINR, de débit et de pertes de propagation a permis de valider la pertinence de nos choix technologiques, notamment l'utilisation de lobes multiples (16 et 32) pour adapter le réseau aux spécificités de l'environnement portuaire. Enfin, l'introduction de la probabilité de LoS/NLoS dans notre modèle UMA constitue une amélioration significative, permettant de mieux prendre en compte la variabilité des conditions réelles de propagation et d'affiner la planification du réseau gNodeB.

Ce travail ouvre ainsi la voie à des déploiements plus performants et à une meilleure qualité de service pour les utilisateurs.

Conclusion générale

Ce mémoire a permis d'examiner en profondeur l'évolution des réseaux mobiles jusqu'à l'émergence de la 5G, en mettant en lumière ses principes fondamentaux, son architecture avancée, ainsi que les innovations technologiques qu'elle introduit, telles que le Massive MIMO, le beamforming et les techniques d'accès multiples comme le SDMA et le RSMA. À travers l'étude du port de Béjaïa et de ses infrastructures, les limites du réseau 4G existant ont été identifiées, notamment en termes de couverture et de capacité, en particulier dans des zones spécifiques comme celle des cotonnières. L'intégration d'un réseau 5G, notamment par l'installation d'antennes Massive MIMO, apparaît comme une solution pertinente pour surmonter ces contraintes. Grâce à un dimensionnement rigoureux, une planification stratégique et une simulation des performances, il a été démontré que la 5G peut non seulement améliorer la couverture, mais aussi offrir un débit plus élevé, une latence réduite et une meilleure fiabilité de connexion.

Les résultats des simulations montrent une amélioration des performances, notamment au niveau du SINR et du débit en fonction de la distance. Par exemple, dans le cas de visibilité directe (LoS), à 500 mètres, le débit atteint 13,5 Gbps avec une modulation 16-QAM (SINR de 55 dB), et peut aller jusqu'à 34,0 Gbps avec une modulation 256-QAM (SINR de 51 dB). Dans un scénario sans visibilité directe (NLoS), à la même distance, le débit est de 7,5 Gbps avec une modulation QPSK (SINR de 25 dB), et peut atteindre 19,0 Gbps avec une modulation 16-QAM (SINR de 22 dB). Ces résultats confirment que la visibilité a un impact important sur les performances, notamment en termes de débit et de qualité du signal. Cette étude a également souligné l'importance d'une planification réseau structurée, allant de l'analyse de terrain à l'optimisation post-déploiement.

Ce travail a ainsi renforcé la compréhension des réseaux mobiles de nouvelle génération, tout en mettant en lumière les enjeux techniques et stratégiques liés à leur déploiement dans un environnement industriel tel qu'un port. Il ouvre la voie à une transformation numérique des infrastructures, essentielle pour renforcer la compétitivité, améliorer la connectivité et optimiser la gestion opérationnelle.

Ce mémoire a montré que mettre en place un réseau 5G au port de Béjaïa est possible et utile. Cela crée une bonne base pour commencer le déploiement. À l'avenir, il est possible d'ajouter des techniques avancées comme le SDMA, le RSMA ou l'optimisation de l'énergie pour rendre la 5G encore plus efficace. Un projet simple pourrait être de suivre en temps réel les équipements du port grâce à la 5G. Cela aiderait à mieux gérer le port et à renforcer la sécurité. Ce projet constituerait une première étape concrète vers l'amélioration des opérations portuaires.

Annexe A

A.1 Le mode non-standalone (NSA) :

Le mode Non-Standalone (NSA) représente un modèle de déploiement transitoire de la 5G, dans lequel l'architecture repose sur l'infrastructure d'accès radio LTE existante ainsi que sur le cœur de réseau 4G, appelé EPC (Evolved Packet Core). Dans ce scénario, la 5G est partiellement introduite grâce à l'utilisation des radios 5G (New Radio, NR) interconnectées au cœur de réseau LTE, permettant ainsi une amélioration des performances tout en s'appuyant sur les équipements 4G déjà en place. Ce type de déploiement facilite une transition progressive vers une architecture 5G complète, tout en limitant les coûts liés à une refonte immédiate du réseau.

•**Option 3** : L'option NSA 3 repose sur la réutilisation du cœur de réseau 4G, également connu sous le nom d'EPC (Evolved Packet Core). Dans ce modèle, l'interconnexion entre les composants du réseau s'effectue selon l'une des trois sous-options définies : 3, 3A et 3X. Chacune de ces variantes spécifie une configuration particulière pour l'intégration de la nouvelle radio 5G (NR) avec les infrastructures LTE existantes, permettant ainsi une cohabitation optimisée des deux générations technologiques dans un cadre de déploiement non autonome.

Option 3	Option 3A	Option 3X
L'eNodeB LTE agit comme point d'ancrage principal, assurant la liaison entre l'utilisateur et le réseau. Le trafic de données transite par la station LTE, même lorsqu'il est généré via la 5G NR, avant d'atteindre le cœur de réseau 4G (EPC).	L'eNodeB (LTE) et le gNodeB (5G NR) sont connectés séparément au cœur de réseau 4G (EPC). Le terminal peut recevoir des données simultanément des deux stations, sans passer par un nœud d'ancrage unique. Cette approche permet un partage de trafic plus équilibré et améliore les performances globales.	L'option 3X est une extension optimisée de l'option 3, dans laquelle le eNodeB LTE reste le nœud d'ancrage, mais une partie du trafic peut être directement gérée par le gNodeB 5G, selon les besoins. Cette solution offre une meilleure efficacité du réseau tout en conservant l'architecture existante.

TABLE 7 – les trois sous- options de l'option 3

•**Option 4** : L'option NSA 4 met en œuvre une connectivité double dans laquelle le gNodeB 5G joue le rôle de nœud maître, tandis que l'eNodeB LTE amélioré agit comme nœud secondaire, le tout reposant sur un cœur de réseau 5G (5GC). Le plan

de contrôle est centralisé via la station 5G, et cette option comprend deux variantes : 4 et 4a, qui diffèrent selon la gestion du trafic entre les nœuds.

Option 4	Option 4A
le gNodeB (5G NR) assume le rôle de nœud maître et prend en charge le plan de contrôle, tandis que l'eNodeB LTE amélioré agit comme nœud secondaire. Le réseau repose sur le cœur 5G (5GC), permettant une intégration progressive de la 5G tout en conservant l'appui des infrastructures LTE existantes.	il permet le transfert des données utilisateur via le gNodeB ou l'eNodeB, tout en maintenant le plan de contrôle entièrement pris en charge par le gNodeB connecté au cœur 5G. Cette configuration offre une flexibilité accrue en combinant les avantages des réseaux LTE et 5G.

TABLE 8 – les deux sous- options de l'Option 4

•**Option 7** : L'option 7 représente une évolution de l'option NSA 3, avec la migration du cœur de réseau 4G (EPC) vers le cœur de réseau 5G (5GC). L'eNodeB est mis à niveau en eLTE eNodeB pour assurer l'interconnexion avec le 5GC. Le plan de contrôle reste géré par l'élément LTE, tandis que la séparation du plan utilisateur se fait via la station de base LTE améliorée. L'option 7 se décline en trois variantes : 7, 7a et 7x, qui diffèrent selon la répartition et l'emplacement des données.

Option 7	Option 7A	Option 7X
L'eNodeB LTE amélioré reste le nœud maître, assurant le plan de contrôle, tandis que le plan utilisateur est partagé entre l'eNodeB et le gNodeB. Cette configuration utilise le cœur 5G (5GC), facilitant une transition progressive vers une architecture 5G tout en maintenant la gestion LTE.	L'option 7A est similaire à l'option 7, mais avec le plan utilisateur qui transite uniquement par le gNodeB, tandis que le plan de contrôle reste géré par l'eNodeB. Cette configuration optimise les performances 5G en termes de débit et de latence, tout en maintenant la gestion des connexions LTE.	L'option 7X est une version plus flexible de l'option 7, permettant une répartition dynamique du trafic utilisateur entre l'eNodeB et le gNodeB, selon les conditions du réseau et les besoins spécifiques. Cette approche optimise les performances du réseau sans une configuration rigide.

TABLE 9 – les trois sous- options de l'option 7

A.2 Le mode standalone (SA) :

Le mode standalone (SA) constitue un modèle de déploiement dans lequel la technologie 5G est utilisée de manière autonome, fournissant un réseau de bout en bout entièrement basé sur l'architecture 5G. Ce type d'implémentation repose sur deux composantes clés : la nouvelle radio 5G (NR) et le cœur de réseau 5G (5G Core Network ou 5GC). Contrairement au mode non autonome (NSA), qui s'appuie

partiellement sur les infrastructures 4G existantes, le mode SA représente une architecture 5G pure, dans laquelle les fonctions de contrôle et de transmission des données sont entièrement prises en charge par les technologies 5G. Cette approche permet de tirer pleinement parti des performances et des capacités offertes par la 5G, notamment en termes de latence réduite, de débit élevé et de prise en charge d'un grand nombre d'appareils connectés.

- **Option 1 :** L'option SA 1 correspond à une architecture réseau reposant exclusivement sur la technologie 4G LTE en mode autonome. Elle s'appuie sur le cœur de réseau EPC (Evolved Packet Core), également désigné sous l'appellation de système EPC connecté. Cette configuration ne dépend d'aucune composante 5G et représente ainsi une mise en œuvre typique d'un réseau 4G complet.

- **Option 2 :** L'option SA 2 décrit un scénario de déploiement dans lequel la station de base gNodeB est directement connectée au cœur de réseau 5G (5GC). Cette configuration est particulièrement avantageuse pour les opérateurs souhaitant mettre en œuvre la nouvelle radio 5G (5G NR) sans dépendance à l'infrastructure 4G existante. Toutefois, cette architecture requiert l'installation de nouvelles stations de base ainsi que la mise en place d'un cœur de réseau 5G dédié, ce qui engendre des coûts d'investissement élevés. En contrepartie, cette option permet de tirer pleinement parti des capacités de la 5G, en prenant en charge l'ensemble des cas d'usage définis, notamment le haut débit mobile amélioré (enhanced Mobile Broadband, eMBB), les communications massives de type machine (massive Machine Type Communications, mMTC), et les communications ultra-fiables à faible latence (Ultra-Reliable Low Latency Communications, URLLC).

- **Option 5 :** Dans le cadre de l'option SA 5, l'eNodeB (station de base évoluée) est mis à niveau vers une version de nouvelle génération, lui permettant de se connecter directement au cœur de réseau 5G. Cette approche permet aux stations de base 4G existantes de continuer à prendre en charge les équipements hérités, tout en assurant une interconnexion avec le cœur 5G, offrant ainsi aux opérateurs la possibilité d'éliminer progressivement le cœur de réseau 4G EPC (Evolved Packet Core). Cependant, bien que cette solution favorise une certaine continuité technologique, elle présente des limites notables en matière de performances. En effet, les stations de base 4G améliorées peuvent ne pas être en mesure de répondre pleinement aux exigences de la 5G, notamment en termes de débit maximal, de latence ultra-faible et de capacité élevée. Par conséquent, les perspectives d'adoption de cette architecture restent limitées.

Annexe B

B.1 Organisation de BMT et ses différentes structure La société portuaire de Bejaia (BMT) est structurée en diverses directions, chacune ayant des missions précises :

- Direction Générale (DG) : Elle est responsable de la conduite de l'entreprise et de la prise des décisions majeures. Elle est en charge de l'Audit interne, du département HSE (Santé, Sécurité et Environnement), ainsi que du secteur de l'Informatique.

- Direction des Ressources Humaines (DRH) : Responsable du recrutement, de la formation et de la rétention du personnel. Elle englobe les services des ressources humaines, des achats et des projets généraux, ainsi que la gestion du patrimoine.

- Direction des Opérations (D0) : Responsable de la coordination de la planification des escales, de l'administration des parcs à conteneurs et des ressources. Elle gère les opérations de maintenance des navires et des conteneurs, ainsi que la logistique.

- Direction Marketing (DM) : Responsable des relations avec la clientèle et de la promotion de l'identité d'entreprise. Elle englobe les départements Marketing et Commercial.

- Direction des Finances et de la Comptabilité (DFC) : Consigne les transactions financières. Elle regroupe les départements de la comptabilité, des finances et du budget.

- Direction Technique (DT) : Se charge de l'entretien des équipements. Cela comprend les services de machines .

Bibliographie

- [1] Salah Eddine HAJRI. « L'amélioration des performances des systèmes sans fil 5G par groupements adaptatifs des utilisateurs ». Thèse de doct. Université Paris Saclay (COMUE), 2018.
- [2] H Joo LEE et al. « Importance of a 5G network for construction sites : limitation of WLAN in 3D sensing applications ». In : t. 39. IAARC Publications. 2022, p. 391-398.
- [3] Xavier LAGRANGE. « Principes du réseau cœur 5G ». In : *Techniques de l'ingénieur Réseaux Télécommunications* (2022).
- [4] Vivek JAIN et al. « L25gc : a low latency 5g core network based on high-performance nfv platforms ». In : 2022, p. 143-157.
- [5] Guy PUJOLLE. *Réseaux logiciels : Du Cloud Networking à la 5G-2e édition revue et augmentée*. T. 1. ISTE Group, 2020.
- [6] Harri HOLMA, Antti TOSKALA et Takehiro NAKAMURA. *5G technology : 3GPP evolution to 5G-advanced*. John Wiley & Sons, 2024.
- [7] Yifei YUAN, Changqing YANG et Zhifeng YUAN. *5G new radio non-orthogonal multiple access*. CRC Press, 2022.
- [8] Frédéric LAUNAY. *NG-RAN et 5G-NR : L'accès radio 5G et l'interface radio-électrique*. ISTE Group, 2021.
- [9] ANDRIANAIVORAVELO Nantenaina FRÉDÉRIC. « Planification d'un réseau WiMAX avec prise en compte des contraintes de qualité de service et de capacité ». In : ().
- [11] Marceau COUPECHOUX. « 'Bilans de liaison : De la 2G à la 5G ». In : *Telecom Paris, Institut Polytechnique de Paris, Paris-Saclay, France, Tech. Rep* (2021).
- [12] Alexandre BOYER. « BE Dimensionnement d'interface radio pour réseau cellulaire ». In : ().
- [13] Abraham DEME, Danjuma DAJAB et Davou Choji NYAP. « Computer analysis of the COST 231 Hata model and least squares approximation for path loss estimation at 900MHz on the mountain terrains of the Jos-Plateau, Nigeria ». In : 4.9 (2013), p. 39-48.
- [14] Magdy F ISKANDER et Zhengqing YUN. « Propagation prediction models for wireless communication systems ». In : 50.3 (2002), p. 662-673.

- [15] Mushtaq TALIB et al. « Comprehensive overview on millimeter wave communications for 5G networks concentrating on propagation models for different urban environments ». In : t. 2322. 1. IOP Publishing. 2022, p. 012095.
- [16] Valentina TIRȘU, Lilia SAVA et Corina PETRUȘCA. « Simulating the performance of 6g networks in urban and rural scenarios by using nyusim 4.0 ». In : (2024), p. 51-56.
- [17] Sujeet Kumar JHA et al. « LTE network : Coverage and capacity planning—4G cellular network planning around Banepa ». In : IEEE. 2017, p. 180-185.
- [18] Ahmad JABBAN. « Optimisation et analyse des réseaux intelligents et des réseaux hétérogènes ». Thèse de doct. INSA de Rennes, 2013.
- [19] Marwa Elbagir MOHAMMED et Khalid Hamid BILAL. « Coverage and QoS Analysis of LTE Radio Network Planning Considering Khartoum City ». In : (2014), p. 1465-1468.
- [20] Rimvydas ALEKSIEJUNAS. « Statistical Approximations of LOS/NLOS Probability in Urban Environment ». In : *arXiv preprint arXiv :2001.11813* (2020).

Webographie

- [10] Rachid LAMALI. *5G Network RF Planning – Link Budget Basics*. Online. 2021.

Résumé

La 5G est une nouvelle génération de réseaux mobiles qui apporte des améliorations importantes pour beaucoup de secteurs, y compris les ports. Ce mémoire étudie comment la 5G peut être utilisée au port de Béjaïa (BMT) pour mieux couvrir le réseau et améliorer la qualité des communications.

Nous commençons par expliquer les bases des réseaux mobiles et leur évolution jusqu'à la 5G. Ensuite, nous présentons les nouvelles technologies de la 5G, comme le Massive MIMO, le Beamforming et les techniques d'accès multiples telles que le SDMA et le RSMA, qui rendent le réseau plus rapide, plus stable et de meilleure qualité.

Puis, nous analysons le réseau actuel au port de Béjaïa, en montrant ses problèmes, notamment dans certaines zones où la couverture est faible. Nous proposons des solutions pour améliorer cela, comme l'installation de relais, l'utilisation de drones, ou la mise en place d'antennes 5G.

Enfin, nous réalisons une étude pour dimensionner le réseau 5G du port, c'est-à-dire calculer le nombre d'antennes nécessaires, choisir un modèle pour la propagation du signal, et planifier le déploiement.

Les résultats montrent que la 5G peut répondre aux besoins croissants du port de Béjaïa, en rendant ses opérations plus efficaces, rapides et modernes.

Mots clés : 5G, réseau mobile, port de Béjaïa, couverture, dimensionnement, antenne, planification.

Abstract

5G is a new generation of mobile networks that brings significant improvements to many sectors, including ports. This thesis explores how 5G can be used at the Port of Béjaïa (BMT) to enhance network coverage and improve communication quality. We start by explaining the fundamentals of mobile networks and their evolution up to 5G. Then, we introduce the new technologies of 5G, such as Massive MIMO, Beamforming, and advanced multiple access techniques like SDMA and RSMA, which make the network faster, more stable, and of higher quality.

Next, we analyze the current network at the Port of Béjaïa, highlighting its issues, particularly in areas with weak coverage. We propose solutions to address these problems, such as installing relays, using drones, or deploying 5G antennas. Finally, we conduct a study to design the 5G network for the port, including calculating the required number of antennas, selecting a suitable signal propagation model, and planning the deployment.

The results show that 5G can meet the growing needs of the Port of Béjaïa, making its operations more efficient, faster, and modern.

Keywords : 5G, mobile network, Port of Béjaïa, coverage, network design, antennas, deployment planning