République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Saad Dahleb Blida -01-

Institut D'Aéronautique Et Etudes Spatiales

MÉMOIRE DE MASTER

Spécialité : Télécommunication Spatiales

Thème :

Etude et besoin d'un réseau transmission E2E D'un opérateur mobile pour la 5G

Présenté par:

Mme. Haoua Maria

Encadrée par :

M. Makhloufi Mohamed

Mme. Azine Houria

Juin 2025

Résumé :

Ce projet de fin d'études porte sur la conception et l'analyse d'un réseau de transmission E2E (End-to-End) pour un opérateur de téléphonie mobile, dans le contexte du déploiement de la 5G en Algérie. En s'appuyant sur les sites 4G existants, l'objectif est de planifier des liaisons faisceaux hertziens (MW) fiables et à haut débit, répondant aux exigences de la 5G en termes de disponibilité, de faible latence et de capacité. Une étude de cas réelle a été menée dans la commune de Bordj El Bahri à l'aide du logiciel Pathloss, avec la simulation de liaisons en bande E (80 GHz) selon différentes configurations techniques, incluant des technologies d'amélioration telles que XPIC et SDB. Les résultats ont démontré la faisabilité technique de la migration vers une architecture de transport 5G, en valorisant l'infrastructure existante. Cette étude contribue à une meilleure compréhension de la planification d'un réseau 5G efficace et évolutif.

Mots-clés : 5G, Réseau de transmission, Faisceaux hertziens, E-band, Pathloss, XPIC, SDB, Sites 4G, Propagation RF, Architecture E2E, Planification, Algérie.

Abstract:

This final-year project focuses on the design and analysis of an End-to-End (E2E) transmission network for a mobile operator in the context of 5G deployment in Algeria. Based on existing 4G infrastructure, the objective is to plan reliable, high-capacity microwave (MW) links that meet the 5G requirements for availability, low latency, and throughput. A practical case study was conducted in Bordj El Bahri using Pathloss software, with E-band (80 GHz) link simulations under various configurations, including optimization technologies such as XPIC and SDB. The results confirmed the technical feasibility of migrating to a 5G-ready transport network, leveraging current assets. This study contributes to a better understanding of efficient and scalable 5G network planning.

Keywords: 5G, Transmission network, Microwave links, E-band, Pathloss, XPIC, SDB, 4G site reuse, RF propagation, E2E architecture, Planning, Algeria

ملخص

يركز هذا المشروع على تصميم وتحليل شبكة نقل من طرف إلى طرف (E2E) لمشغل للهاتف المحمول، في سياق نشر تقنية الجيل الخامس (5G) في الجزائر. تم الاعتماد على البنية التحتية الحالية لشبكة الجيل الرابع (4G) من أجل تخطيط روابط ميكروويف (MW) موثوقة وعالية السعة، تلبي متطلبات G5 من حيث التوفر، وانخفاض الكمون، وسرعة النقل. تم تنفيذ دراسة حالة فعلية في بلدية برج البحري باستخدام برنامجPathloss ، حيث تم محاكاة روابط في نطاق E (80 غيغاهرتز) وفقًا لتكوينات تقنية متعددة، بما في ذلك تقنيات تحسين مثل XPIC و .SDBأظهرت النتائج إمكانية الانتقال تقنيًا إلى بنية نقل متوافقة مع (5G) مع الاستفادة من المواقع القائمة. تساهم هذه الدراسة في فهم أفضل لتخطيط شبكة (5G) فعالة وقابلة للتطور.

الكلمات المفتاحية :الجيل الخامس، شبكة النقل، روابط ميكروويف، نطاقE ، برنامجPathloss ، XPIC، SDB، مواقع 4G ، انتشار الموجات، بنيةE2E ، التخطيط، الجزائر .

Remerciements

En préambule à ce travail,
Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Allah de m’avoir donné la force, la volonté et le courage afin d’accomplir ce modeste travail.

Je veux remercier mon encadreur **M. Makhloufi Mohamed** pour son soutien constant, ses précieux conseils et sa disponibilité. Sa guidance a grandement contribué à l'aboutissement de ce travail.

J’exprime mes sincères remerciements à ma promotrice **Mme Azine Houria** pour sa disponibilité, ses conseils avisés et son accompagnement constant tout au long de cette aventure. Son expertise et sa bienveillance ont été d’un soutien précieux à chaque étape.

Mes profonds remerciements vont également aux membres du jury pour leur intérêt soutenu envers mon travail et leurs remarques pertinentes et enrichissantes. Leur temps, leur expertise et leur contribution sont inestimables.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes, de près ou de loin, qui ont contribué à la réussite de ce projet de fin d’études, qui fut pour moi une expérience à la fois formatrice et enrichissante

Dédicaces

Je dédie ce mémoire :

À mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

À mon mari, mon pilier, mon soutien moral et ma source de bonheur, pour l'encouragement et l'aide qu'il m'a toujours apportés.

À mes précieuses sœurs **Marwa**, **Safaa**, **Chaima**, **Zohor** et **Ikhlas**, ainsi qu'à mes chers frères **Sid Ahmed** et **Adem**, pour leur affection et leur présence constante.

À ma deuxième famille **Dairi**, pour leur soutien et leur bienveillance.

Et enfin, à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Table des matières

Liste des figures xi

Liste des tableaux xv

Liste des acronymes xvi

Introduction générale 1

1. Fondements technologiques, organisationnels et réglementaires des réseaux mobiles 3

1.1. Introduction 3

1.2. Présentation générale de l'opérateur Djezzy 3

1.2.1. Missions de l'opérateur Djezzy 4

1.2.2. Organisation de l'opérateur Djezzy 4

1.3. Évolution des réseaux mobiles 6

1.3.1. La limitation de la 4G 7

1.3.2. La cinquième génération -5G- 7

1.4. Réglementation nationale et internationale des réseaux mobiles 12

1.4.1. Règlementation Internationale 12

1.4.2. Cadre réglementaire national (Algérie) 13

1.5. Organisation technique et fonctionnalités avancées des réseaux mobiles 13

1.5.1. La qualité de service (QoS) dans les réseaux mobiles 13

1.5.2. La synchronisation dans les réseaux mobiles 15

1.5.3. Les Topologies des réseaux mobiles 16

1.6. Les modèles de propagation RF 20

1.7. Conclusion 23

2. Architecture E2E d'un réseau 5G NSA 24

2.1. Introduction 24

2.2. Définition 24

2.2.1. La couche d'accès radio 25

2.2.2. La couche de transport 27

2.2.3. La couche du cœur de réseau EPC 35

2.3. Architecture E2E d'un réseau transmission 5G 38

2.4. Technologies d'amélioration 40

2.4.1. Les technologies d'accès radio 40

2.4.2. Les technologies de Transport 44

2.4.3. Les technologies de cœur réseau 46
2.5. Gestion de la qualité de service 47
2.5.1. Gestion de la QoS dans le cœur EPC 47
2.5.2. Gestion de la QoS dans le RAN (gNodeB/eNodeB) 48
2.5.3. Gestion de la QoS dans le réseau de transport (IP/MPLS) 48
2.5.4. Cas d'usage typiques et services impactés 48
2.6. Synchronisation et gestion du spectre 48
2.6.1. Besoin de synchronisation dans le réseau 5G NSA 49
2.6.2. Gestion du spectre dans la bande n78 49
2.6.3. Impacts de la synchronisation pour le réseau 49
2.7. Conclusion 50
3. Étude de cas et simulation via Pathloss 51
3.1. Introduction 51
3.2. Présentation de logiciel Pathlos 51
3.3. Etude de cas la commune de Bordj El Bahri 52
3.3.1. La présentation de la zone et du Node d'agrégation (GNE) 5G choisi 52
3.3.2. La description des sites retenus pour la simulation 54
3.3.3. L'organisation topologique des liaisons 54
3.3.4. La simulation technique détaillée de chaque lien à l'aide du logiciel Pathloss 55
3.4. Conclusion 68
Conclusion générale 69
Références 71

Liste des figures

Figure 1.1 Oganisation de l'opérateur Djezzy 4
Figure 1.2 Organisation de la direction technique 5
Figure 1.3 Cycles des generations de telephone mobile 7
Figure 1.4 Categories d'usages de 5G 9
Figure 1.5 Scenarios NSA-options 3,4 et 7 10
Figure 1.6 Architecture NSA vs SA comparison des plans de contrôle et de données 11
Figure 1.7 Illustration du full -duplex ,comparè au FDD et TDD 18
Figure 1.8 Les types des interfaces 19
Figure 2.1 Les couches de l'architecteure E2E 24
Figure 2.2 La couche d'accès Radio 25
Figure 2.3 Les composants de la couche de transport 28
Figure 2.4 Bilan de liaison 30
Figure 2.5 La couche du couer reseau EPC 36
Figure 2.6 Architecture de transmission E2E d'un reseau 5G NSA 39
Figure 2.7 Les technologies d'amiloration de la couche d'accès radio 40
Figure 2.8 Mode de fonctionnment de la liaison montante de l'UE avec EN-DC 41
Figure 2.9 Types d'agrégation de porteuses. 42
Figure 2.10 Illustration du beamforming 3D 43
Figure 2.11 Les technologies d'amèlioration de transport 44
Figure 3.1 Le GNE 5G proposé sur le logiciel Pathloss 53
Figure 3.2 Le GNE 5G proposé via Google Earth 53
Figure 3.3 Les principaux sites 5G raccordés au GNE 54
Figure 3.4 Topologie du réseau de transmission 5G via Pathloss 55
Figure 3.5 Couche de liaison entre A16X1611 et A16X1264 59
Figure 3.6 Configuration des antennes 59
Figure 3.7 Configuration de la radio 59
Figure 3.8 Simulation de l'effet de la pluie 60
Figure 3.9 la configuration de la liaison A16X1611 → A16X1264 60
Figure 3.10 Résultats de la configuration de la liaison A16X1611 → A16X1264 61
Figure 3.11 configuration de liaison A16X1264 → A16X712 62
Figure 3.12 Résultats de la configuration de la liaison A16X1264 → A16X712 62

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Evolution des reseaux mobiles 6
Tableau 1.2 Les technologies de synchronisation 16
Tableau 1.3 Rôle des interfaces 20
Tableau 1.4 Catégories de modèle de propagation 21
Tableau 2.1 Une comparaison synthétique entre le CDWDM et DWDM 34
Tableau 2.5 Exemple de bilan de liaison 43
Tableau 3.1 Les deux Profils de configuration selon le type de site 57
Tableau 3.2 les paramètres techniques utiliser dans pathloss 58
Tableau 3.3 Tableau des configurations des sites 63
Tableau 3.4 Les résultats de configuration des sites 65

Liste des acronymes

1G	Première génération de réseaux mobiles
2G	Deuxième génération de réseaux mobiles
3G	Troisième génération de réseaux mobiles
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	Quatrième génération de réseaux mobiles
5G	Cinquième génération de réseaux mobiles
AMF	Access and Mobility Management Function
ARPCE	Autorité de Régulation de la Poste et des Communications Électroniques
CA	Carrier Aggregation
CCIC	Cross-Carrier Interference Cancellation
CDMA	Code Division Multiple Access
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DL	Downlink
eNB / eNodeB	Evolved Node B
EMBB	Enhanced Mobile Broadband
E2E	End To End
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
FDD	Frequency Division Duplex
FR1	Frequency Range 1
GNSS	Global Navigation Satellite System
GNE	Gateway Network Element
GPS	Global Positioning System
GRE	Generic Routing Encapsulation
gNB / gNodeB	Next Generation Node B
HSS	Home Subscriber Server
I-UPF	Intermediate User Plane Function
IEEE 1588v2	Precision Time Protocol
IMS	IP Multimedia Subsystem
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IntServ	Integrated Services
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IP/MPLS	Internet Protocol / Multiprotocol Label Switching
IPSec	Internet Protocol Security
ITU	International Telecommunication Union
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	LTE Advanced

MBB	Mobile Broadband
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
mMTC	Massive Machine Type Communication
MSISDN	Mobile Station International Subscriber Directory Number
MW	Microwave
NEF	Network Exposure Function
NFV	Network Function Virtualization
NMS	Network Management System
NR	New Radio
NSA	Non-Standalone
OSS	Operation Support System
Pathloss	Logiciel de simulation radio
PCRF	Policy and Charging Rules Function
PGW	Packet Data Network Gateway
PRX	Puissance Reçue
PTX	Puissance Transmise
PTP	Precision Time Protocol
QCI	QoS Class Identifier
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
SA	Standalone
SBI	Service-Based Interface
SCP	Service Communication Proxy
SDN	Software Defined Networking
SGW	Serving Gateway
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SyncE	Synchronous Ethernet
TDD	Time Division Duplex
UE	User Equipment
UPF	User Plane Function
URLLC	Ultra-Reliable Low Latency Communication
VNF	Virtual Network Function
VoIP	Voice over IP
VoLTE	Voice over LTE
VoNR	Voice over New Radio
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
XPIC	Cross Polarization Interference Canceller

Introduction générale

L'avènement de la cinquième génération de réseaux mobiles (5G) constitue une rupture technologique majeure dans le domaine des télécommunications. Conçue pour répondre à une explosion des besoins en débit, en faible latence, en connectivité massive et en fiabilité, la 5G s'impose comme l'épine dorsale des futures applications numériques : Internet des objets (IoT), véhicules autonomes, villes intelligentes, téléchirurgie, ou encore réalité augmentée. Pour accompagner cette révolution, l'ensemble de l'architecture réseau doit être repensé, en particulier la couche de transmission, qui assure le lien entre les équipements d'accès radio, les nœuds d'agrégation et le cœur du réseau.

Dans ce contexte, le réseau de transmission End-to-End (E2E) joue un rôle stratégique. Il garantit non seulement l'acheminement des flux de données à très haut débit, mais aussi leur stabilité, leur synchronisation temporelle, et leur qualité de service (QoS). Les solutions techniques adoptées – telles que la fibre optique, les faisceaux hertziens multi-gigabit (notamment en bande E), ou encore les architectures IP/MPLS – doivent répondre à des critères stricts de résilience, d'évolutivité et d'intégration avec l'existant. En Algérie, où l'infrastructure 4G est déjà déployée à grande échelle, la transition vers une architecture 5G repose en grande partie sur l'optimisation du transport et la réutilisation intelligente des sites existants.

C'est dans cette perspective que s'inscrit ce mémoire. En prenant pour cas d'étude l'opérateur mobile Djezzy**,** il vise à analyser les besoins de transmission pour le déploiement 5G, à modéliser une architecture E2E hybride (fibre et MW), et à simuler la faisabilité de liaisons hertziennes dans une zone réelle — la commune de Bordj El Bahri — à l'aide du logiciel Pathloss**.** Cette démarche permet d'évaluer techniquement la migration vers un réseau de transport 5G performant, tout en intégrant les contraintes topographiques, climatiques et technologiques spécifiques au contexte algérien.

Structure du mémoire :

Ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux :

- **Chapitre 1 – Fondements technologiques, organisationnels et réglementaires des réseaux mobiles :**
  il présente l'évolution des générations mobiles, les enjeux de la 5G, les exigences réglementaires, ainsi que les concepts de QoS, synchronisation et propagation radio.

Chapitre 2 – Architecture du réseau de transmission E2E pour la 5G :
ce chapitre détaille les différentes couches fonctionnelles du réseau (accès radio, transport, cœur EPC), en mettant l'accent sur les technologies utilisées pour assurer un transport 5G fiable.

- **Chapitre 3 – Étude de cas et simulation via Pathloss** :
  cette partie applique les principes précédents à un cas réel. Elle comprend la définition du périmètre d'étude, la configuration des liaisons MW, le calcul des bilans de liaison et l'interprétation des résultats techniques.

Enfin, ce travail s'achève par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et propose des recommandations pour la mise en œuvre d'un réseau de transmission 5G efficace. Des perspectives futures sont également suggérées, notamment en ce qui concerne l'intégration de la fibre optique, les liens hybrides, et l'adoption de solutions à haute disponibilité dans d'autres wilayas.

Objectif du projet

L'objectif principal de ce travail est de définir une architecture de transport 5G efficace, évolutive et économiquement viable, en s'appuyant sur une analyse rigoureuse des contraintes opérationnelles et des performances réelles des liaisons MW. Grâce à la simulation via Pathloss, ce mémoire permet de formuler des recommandations concrètes pour accompagner le déploiement national de la 5G, tout en valorisant les infrastructures 4G existantes.

Chapitre 1

Fondements technologiques, organisationnels et réglementaires des réseaux mobiles

1.1. Introduction

Dans un monde où la connectivité représente un levier fondamental du développement économique et social, les réseaux mobiles de télécommunications représentent une infrastructure stratégique incontournable. L'évolution rapide des technologies, du GSM à la 5G, reflète une exigence croissante en matière de performance, de flexibilité et de couverture à grande échelle. En Algérie, l'opérateur Djezzy incarne cette dynamique d'innovation, en investissant continuellement dans des solutions technologiques avancées pour accompagner la transition numérique du pays.

Ce chapitre vise à établir les fondements conceptuels, technologiques et organisationnels nécessaires à la compréhension du projet. Il débute par une présentation de l'opérateur Djezzy, mettant en lumière son rôle, son positionnement stratégique et son organisation interne. Ensuite, une rétrospective de l'évolution des réseaux mobiles, de la 1G à la 5G, est proposée afin de contextualiser les enjeux technologiques actuels.

La suite du chapitre s'articule autour de l'analyse du cadre réglementaire, aussi bien à l'échelle nationale qu'internationale, et s'intéresse aux topologies réseau, aux exigences en matière de qualité de service (QoS), ainsi qu'aux mécanismes de synchronisation et de duplexage. Enfin, une attention particulière est portée aux modèles de propagation radioélectrique, indispensables à la planification, à la couverture et à l'optimisation des réseaux mobiles.

1.2. Présentation générale de l'opérateur Djezzy

Djezzy représente la dénomination commerciale de la société Optimum Telecom Algérie, opérateur de téléphonie mobile fondé en 2001. L'entreprise a entamé ses activités commerciales en février 2002 et s'est rapidement positionnée en tant que leader sur le marché algérien des télécommunications mobiles.

Depuis, Djezzy est majoritairement détenue par le Fonds National d'Investissement (FNI), ce qui lui confère le statut d'entreprise stratégique nationale.

Grâce à une infrastructure réseau étendue et à une offre de services diversifiée, Djezzy couvre l'ensemble du territoire algérien et dessert aujourd'hui plus de 16 millions d'abonnés à travers le pays.

1.2.1. Missions de l'opérateur Djezzy

La mission de Djezzy repose sur plusieurs axes fondamentaux :

- Fournir des services de téléphonie et d'Internet mobile accessible, performants et innovants.
- Contribuer à l'inclusion numérique et au développement économique nationale.
- Promouvoir la transformation digitale à travers des solutions technologiques avancées.
- Se préparer à l'intégration des technologies de demain, notamment dans 5G.
- Assurer la qualité du service et la satisfaction des clients via une couverture optimale et un réseau fiable.

1.2.2. Organisation de l'opérateur Djezzy

L'organisation de l'opérateur Djezzy repose sur un modèle hiérarchique intégré, structuré autour de plusieurs grandes directions. Chacune de ces directions supervise des départements opérationnels spécialisés, en fonction des domaines d'expertise et des missions stratégiques qui leur sont attribuées.

La figure 1.1 ci-dessous illustre la structure organisationnelle de Djezzy, en mettant en évidence les principales directions de l'entreprise, à savoir :

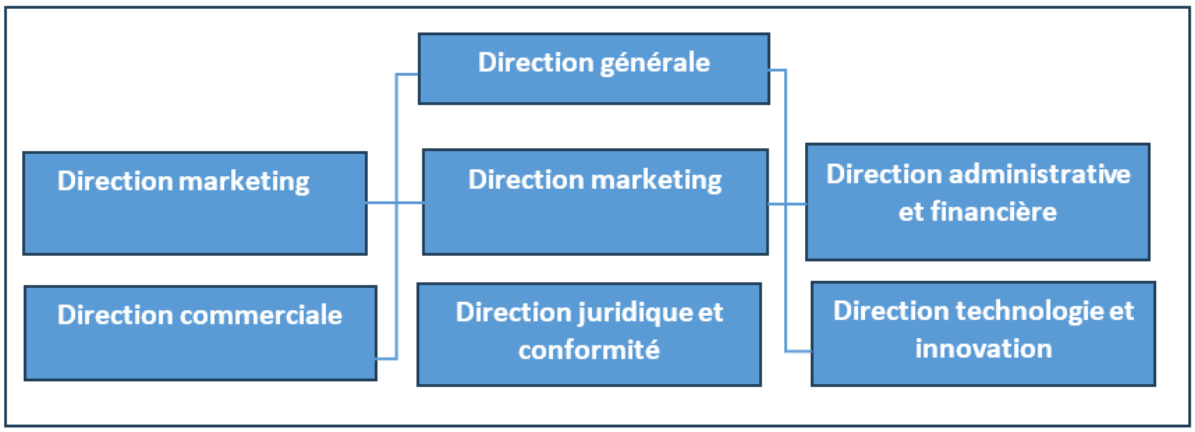


Figure 1.1 : Organisation de l'opérateur Djezzy

Chaque direction dispose de ses propres objectifs et indicateurs de performance, en lien avec la stratégie globale de l'entreprise.

1.2.2.1. La direction technique et innovation :

La direction technique est un pilier central de l'organisation de l'opérateur Djezzy elle a la charge de l'architecture, du déploiement, de l'exploitation et de l'évolution du réseau de télécommunication. Cette direction est responsable de garantir la disponibilité,

La performance et la sécurité des infrastructures techniques. Elle comprend

Plusieurs sous-divisions comme illustre La figure 1.2 ci-dessous :

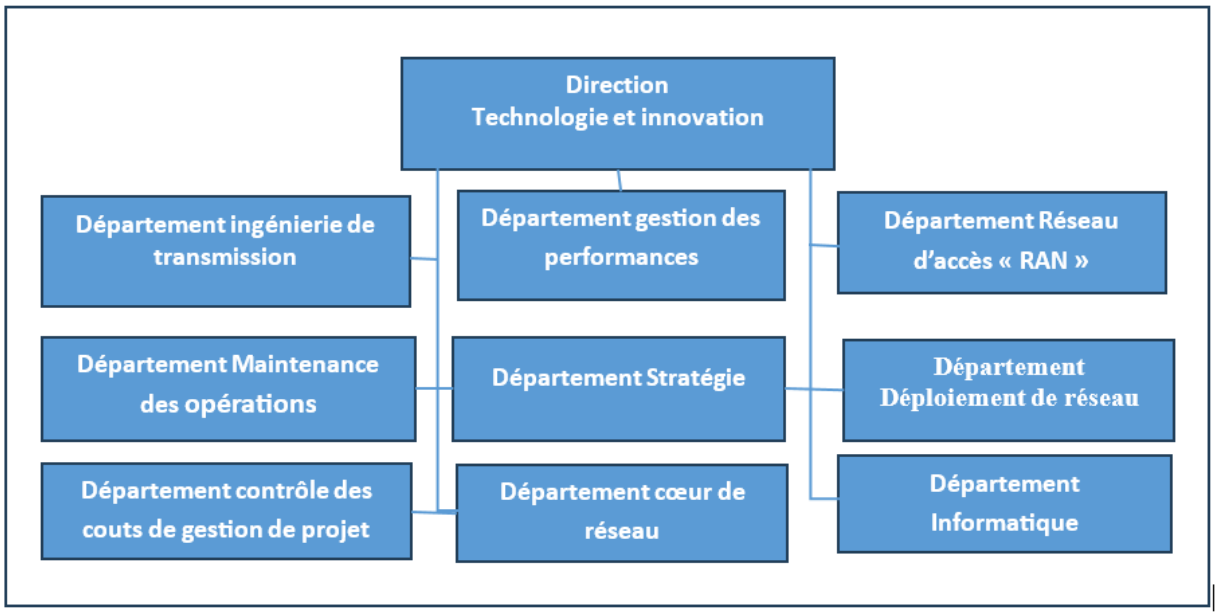


Figure 1.2: Organisation de la direction technique et innovation

1.2.2.1.1. Département Transmission :

Le département transmission fait partie intégrante de la direction technologie et innovation. Sa mission est de garantir la connectivité entre les différents nœuds du réseau, notamment les sites radio, les nœuds d'agrégation et le cœur de réseau est chargé :

- Concevoir les topologique de transport (backaul (MW), backbone (fibre optique et en faisceaux hertzien (MW))
- Assurer la Résilience et la redondance du réseau via des architectures en anneaux ou en mailles,
- Surveiller les performances et la disponibilité des liens via des outils de monitoring avancés
- Optimiser la capacité de transmission en fonction de la croissance du trafic data
- Accompagner les populations vers la 5G avec des architecture IP/ MPLS évolutives

Département transmission est donc un maillon stratégique, garant de la stabilité, de la performance et de l'évolution de réseau de l'opérateur Djezzy.

1.3. Évolution des réseaux mobiles :

Les réseaux mobiles sont des réseaux sans fil dans lesquels au moins deux terminaux peuvent communiquer sans liaisons filaires. Grace à ce type de réseau, un utilisateur (abonné) a la possibilité de rester connecté au réseau tout en se déplaçant dans un périmètre géographique plus ou moins étendu, c'est la raison pour laquelle on parle de mobilité. Ces réseaux sont basés sur une liaison utilisant des ondes radioélectriques et utilisent l'interface radio comme support de transmission [1].

Le tableau 1.1 ci-dessous illustre les déférentes génération et leur caractéristique :

Spécification	Période d'introduction	Norme principale	Technologie d'accès radio	Debit	Latance	Type de service
1G	Années 1980	AMPS, TACS	Analogique FDMA	~2,4 kbps	> 500 ms	Téléphonie vocale analogique uniquement
2G	Années 1990	GSM	Numérique (TDMA , CDMA)	9.6 - 64 kbps	300-1000 ms	Voix, SMS
3G	Années 2000	UMTS, HSPA	CDMA, WCDMA	384 kbps à 2 Mbps	100 - 500 ms	Voix, SMS, données
4G	Dès 2010	LTE ,LTE Advanced	OFDMA	Jusqu' à 1Gbps	30 - 50 ms	MBB
5G	À partir de 2019	5G NR	OFDMA, Massive MIMO , beamforming	Jusqu' à 10Gbps	1 ms	MBB, mMTC et URLLC

Tableau 1.1 : Évolution des réseaux mobiles

L'évolution des réseaux mobiles s'est effectuée en différentes phases comme c'est illustré sur la figure 1.3 ci-dessous :

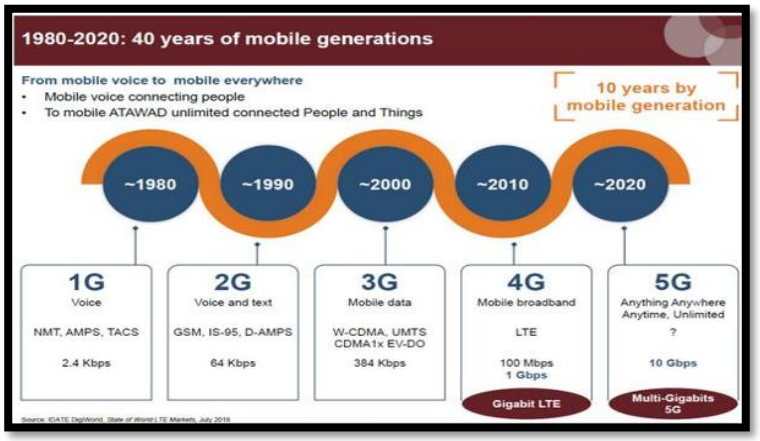


Figure 1.3 : Cycles des générations de téléphonie mobile

1.3.1. La limitation de la 4G :

Bien que le réseau 4G, fondé sur la norme LTE (long terme évolution), ait apporté des avancées significatives en matière de débit et de Bande passante par rapport aux générations précédentes, il atteint aujourd'hui certaines limites. Grâce à l'adoption de la technologie IP, la 4G permet une expérience de navigation fluide sur divers terminaux tels que les smartphones, les tablettes ou les ordinateurs portables. Toutefois, le spectre de fréquence sur lequel elle repose est désormais fortement solliciter, ce qui limite sa capacité à répondre efficacement à les l'essor des objets connectés, dont les usages sont de plus en plus variés et exigeants.

Dans son contexte, la 5G apparaît comme une évolution Incontournable. Ce nouveau standard des télécommunications mobiles a été conçu non seulement pour pallier les insuffisances de réseau 4G, mais aussi pour anticiper les besoins futurs, en offrant des performances accrues en termes de débit, de la latence, de fiabilité et de densité de connexion.

1.3.2. La cinquième génération -5G :

La cinquième génération des réseaux mobiles, ou 5G, consiste l'une des innovations les plus marquantes dans le domaine de la communication sans fil. Elle s'inscrit dans la continuité de l'évolution des technologies mobiles, en apparent des améliorations majeures en matière de débit, de diversité des services et de réactivité de réseau.

La 5G (réseaux mobiles ou systèmes sans fil de 5eme génération) englobe un ensemble de technologies qui constituent la prochaine grande phase des normes de télécommunications mobiles à partir de l'évolution des normes actuelles 4G LTE (évolution à long terme). Le réseau 5G est validé par l'ITU (International Télécommunication Union) et le consortium 3GPP (3rd Génération Partner hip Project). [2]

1.3.2.1. Domaine d'application pour la 5G :

L'Union internationale des télécommunications (UIT) prévoit trois domaines d'utilisation pour la 5G :

- **Communications massives de type machine (mMTC : Massive Machine-Type Communications)**
  - Ce domaine d'utilisation se caractérise par un vaste réseau d'appareils interconnectés (internet des objets (IoT)), qui ont tendance à transmettre une quantité limitée (quelques octets) de données non sensibles temporelles (par exemple, les compteurs d'eau).
  - Les appareils doivent être avantageux et posséder une autonomie considérable (durée de vie des batteries pouvant atteindre 10 ans).

- **Large bande mobile améliorée (eMBB : Enhanced Mobile Broadband)**
  - Des débits de données importants et fluctuants (pouvant atteindre 20 Gbit/s),
  - Une forte concentration d'utilisateurs et une mobilité importante (par exemple, les trains à grande vitesse).
  - L'amélioration de l'accès mobile à large bande garantit une transition fluide entre le réseau fixe et le réseau mobile.
- **La communication ultra-fiable avec un temps de latence (URLLC : Reliable and Low Latency Communications)**
  - Ce domaine est caractérisé par des connexions fiables et/ou sensibles au temps avec des vitesses de transmission garanties.
  - Temps de latence assurés de quelques millisecondes et une probabilité de défaillance définie.

Figure 1.4 ci-dessous illustre les Catégories d'usages de 5G :

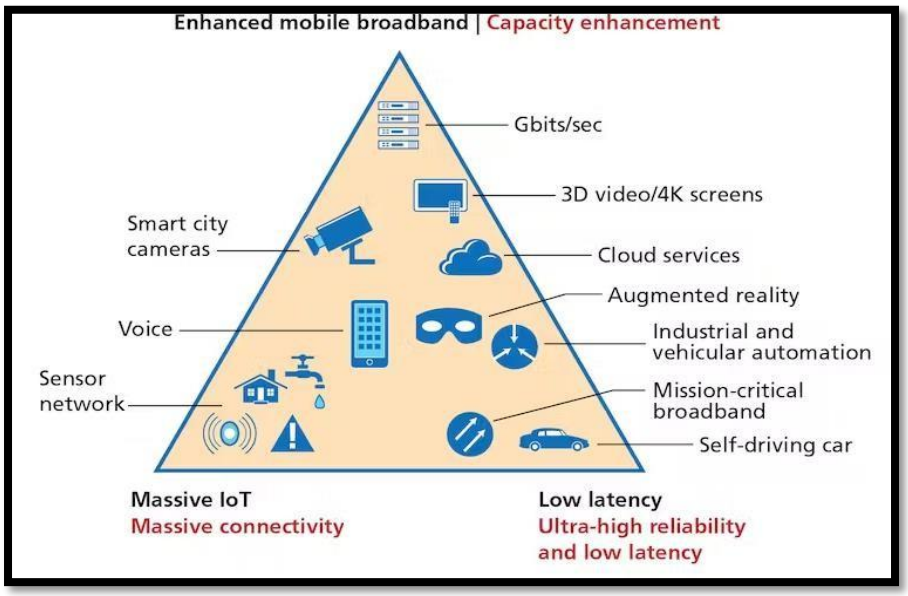


Figure 1.4: Catégories d'usages de 5G [3]

1.3.2.2. Scénario de déploiement pour la 5G NR :

1.3.2.2.1. Non autonome (NSA) :

L'architecture Non-Standalone (NSA) constitue une phase transitoire vers un déploiement complet de la 5G. Elle repose sur une intégration partielle, où le réseau d'accès 5G (New Radio, NR) s'appuie sur le noyau 4G existant (EPC – Evolved Packet Core).

Dans cette configuration, la station de base 5G NR (nœud logique appelé en-gNB) est connectée à une station de base LTE (4G) (nœud eNB) via l'interface X2. Cette dernière, introduite avant la Release 15 du 3GPP pour interconnecter deux eNB, a été étendue pour permettre également la liaison entre eNB (4G) et en-gNB (5G).

Cette architecture hybride permet d'introduire progressivement les services 5G tout en s'appuyant sur l'infrastructure LTE existante, accélérant ainsi le déploiement commercial de la 5G sans nécessiter une refonte immédiate du cœur réseau.

1.3.2.2.1.1. Les Options d'architecteur NSA :

Le déploiement de la 5G en mode non autonome (NSA) peut s'effectuer selon plusieurs architectures de référence définies par le 3GPP, appelées options de déploiement. Ces options définissent la manière dont les réseaux LTE existants interagissent avec les nouvelles stations de base 5G (NR) et les cœurs réseau (EPC ou 5GC).

Option 3 : NSA avec EPC (LTE en master)

Dans cette option, le cœur de réseau 4G (EPC) est conservé. Le LTE eNodeB joue le rôle de nœud principal (Master Node), tandis que le gNB (station 5G NR) joue un rôle secondaire (Secondary Node). La connexion entre les deux stations se fait via l'interface X2.

La version 3X permet une optimisation grâce à la fonctionnalité Split Bearer, qui permet d'acheminer simultanément les données via la 4G et la 5G.

Cette approche est la plus répandue dans les premiers déploiements 5G, car elle limite les investissements initiaux en réutilisant l'infrastructure 4G existante.

Option 4 : NSA avec 5GC (NR en master)

Cette architecture repose sur le cœur de réseau 5G (5GC). Le gNB (NR) assure ici la signalisation principale, et le eNodeB (LTE) devient secondaire.

Dans l'option 4, les données utilisateur (User Plane) de la LTE transitent par le NR.

Dans la variante 4a, ces données sont directement transmises du 5GC au LTE RAN, évitant le passage par le gNB.

Option 7 : NSA avec LTE en master, 5GC en cœur

À l'inverse de l'option 4, l'option 7 désigne une architecture où le eNodeB LTE reste maître, mais le réseau 5GC est utilisé en tant que cœur.

Dans l'option **7**, les données utilisateur transitent par le eNodeB vers le gNB, puis vers l'UE.

Dans la variante 7a, les données sont transmises directement du 5GC au gNB, puis à l'équipement utilisateur (UE) via l'interface radio NR.

Illustration des options NSA (3, 4, 7) :

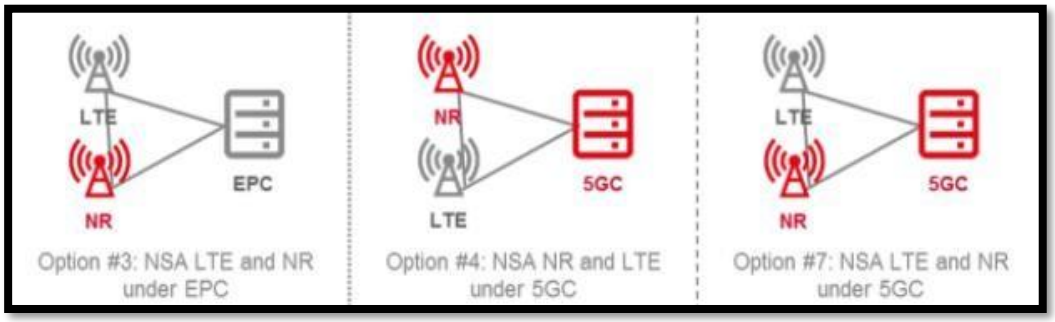


Figure 1.5: Scénarios NSA – Options 3, 4 et 7 [4]

1.3.2.2.2. Autonome (SA) :

La 5G Standalone (SA) représente l'architecture la plus aboutie du déploiement 5G. Contrairement au mode non autonome (NSA), cette configuration ne repose ni sur le réseau 4G LTE existant, ni sur son cœur (EPC), mais s'appuie entièrement sur une infrastructure 5G native.

Dans ce scénario, le Réseau d'Accès Radio (RAN) est composé uniquement de stations de base 5G, appelées gNodeB (gNB), utilisant l'interface New Radio (NR). Ces stations sont connectées directement au cœur de réseau 5G (5GC), qui intègre de nouveaux composants optimisés pour les services 5G, tels que :

- AMF (Access and Mobility Management Function) pour la signalisation,
- UPF (User Plane Function) pour le transport des données,
- I-UPF (Intermediate UPF) dans certaines configurations avancées.

Cette architecture permet à la 5G de fonctionner de manière totalement autonome**,** avec des bénéfices significatifs :

- Ultra-faible latence (idéal pour les applications critiques : santé, industrie, véhicules connectés),
- Découpage réseau (network slicing) pour isoler des services selon des exigences spécifiques,
- Haute capacité de connexion simultanée, notamment pour l'IoT massif (mMTC).

En contrepartie, le déploiement SA nécessite des investissements plus lourds, notamment en infrastructure, mais il est indispensable pour exploiter pleinement le potentiel de la 5G**.**

Illustration comparative des architectures NSA et SA :

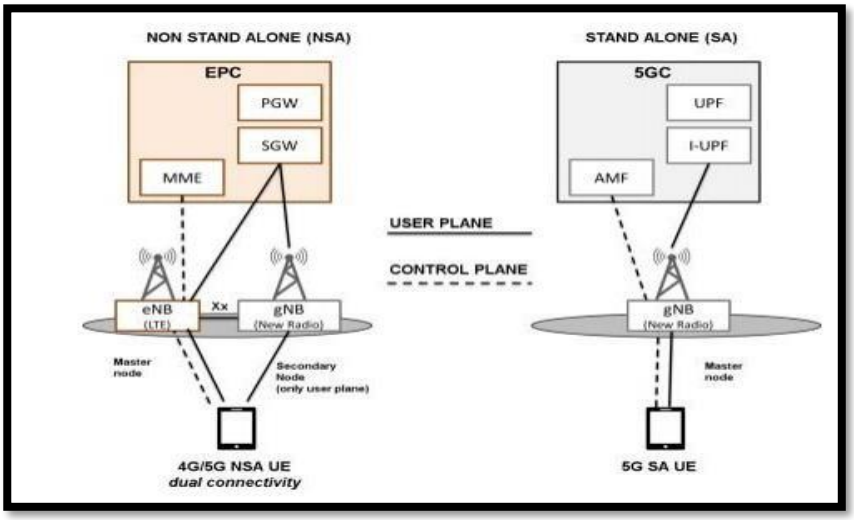


Figure 1.6 : Architecture NSA vs SA – Comparaison des plans de contrôle et de données [5]

1.4. Réglementation nationale et internationale des réseaux mobiles

Le déploiement et l'exploitation des réseaux mobiles ne peuvent se faire sans un cadre réglementaire clair, cohérent et harmonisé. À la croisée des enjeux technologiques, économiques et stratégiques, la réglementation vise à :

- Assurer une utilisation efficace et équitable du spectre radioélectrique, ressource limitée et précieuse,
- Garantir la sécurité, la fiabilité et la confidentialité des communications électroniques,
- Favoriser l'interopérabilité entre les technologies, les constructeurs et les opérateurs,
- Stimuler la concurrence loyale, tout en accompagnant l'innovation et l'accessibilité pour tous.

Cette régulation s'articule autour de deux niveaux complémentaires :

1.4.1. Règlementation Internationale :

À l'échelle mondiale, plusieurs organismes jouent un rôle déterminant dans l'harmonisation des normes et pratiques relatives aux réseaux mobiles :

- **L'Union Internationale des Télécommunications (UIT)**

Organe spécialisé des Nations Unies fondé en 1865, basé à Genève, l'UIT a la charge de la standardisation mondiale dans le domaine des télécommunications. Elle :

  - Assure **l'**harmonisation des bandes de fréquence entre pays,
  - Définit des critères de qualité de service (QoS)**,**
  - Normalise les modèles de propagation pour la planification des réseaux,
  - Encadre le déploiement de la 5G via des études prospectives sur les besoins spectraux, les scénarios d'usage et les orientations globales.

- **Le 3rd Generation Partnership Project (3GPP)**

Regroupement d'organismes de normalisation régionaux, le 3GPP est responsable de l'élaboration des spécifications techniques pour les technologies mobiles (3G, 4G, 5G). Depuis sa création en 1998, il définit les référentiels d'architecture, les interfaces réseau et les fonctionnalités avancées, assurant ainsi l'interopérabilité mondiale des équipements.

1.4.2. Cadre réglementaire national (Algérie)

En Algérie, le secteur des télécommunications est régi par des textes législatifs et réglementaires stricts, encadrés principalement par L'Autorité de Régulation de la Poste et des Communications Électroniques (ARPCE**).** Instance indépendante, l'ARPCE est chargée de :

- Gérer et attribuer les bandes de fréquences,
- Veiller au respect de la neutralité technologique,
- Appliquer les normes internationales au niveau national,
- Surveiller l'utilisation du spectre radioélectrique et limiter les interférences nuisibles,
- Promouvoir un environnement concurrentiel équitable.

L'ARPCE joue également un rôle de facilitateur technologique, en accompagnant les opérateurs dans le déploiement des nouvelles générations de réseaux, notamment la 5G, tout en protégeant les droits des consommateurs**.**

1.5. Organisation technique et fonctionnalités avancées des réseaux mobiles

1.5.1. La qualité de service (QoS) dans les réseaux mobiles

La qualité de service (QoS) désigne l'ensemble des mécanismes techniques et organisationnels mis en œuvre pour garantir un niveau de performance conforme aux exigences des services offerts par un réseau de télécommunications. Dans le contexte mobile, la QoS est un enjeu majeur, car elle conditionne directement l'expérience utilisateur, notamment pour les applications sensibles au temps réel (voix, visioconférence, streaming, jeux en ligne, etc.).

Contrairement aux réseaux fixes, la gestion de la QoS en environnement mobile est plus complexe. Elle est influencée par la mobilité des utilisateurs, les fluctuations de la couverture radio, et la variabilité des ressources disponibles. Il devient donc essentiel d'adopter des stratégies dynamiques pour optimiser l'allocation de bande passante, le contrôle des délais et la gestion des erreurs.

1.5.1.1 Principaux indicateurs de la QoS

- **Débit (Throughput)**

Il s'agit du volume de données transmises avec succès sur le réseau, exprimé en Mbps ou Gbps. On distingue :

  - **Débit montant (uplink, UL)** : données envoyées par l'utilisateur (ex. : envoi de fichiers ou vidéos),
  - **Débit descendant (downlink, DL) :** données reçues par l'utilisateur (ex. : navigation web, streaming).

- **Latence (Delay)**

  Temps nécessaire à un paquet pour aller de la source à la destination. Exprimée en millisecondes (ms), elle est critique pour les services en temps réel.

  En 5G, certains cas d'usage (industrie, télémédecine) exigent une latence inférieure à 1 ms (URLLC).

- **Gigue(Jitter)**

  Variation de la latence entre plusieurs paquets successifs. Une gigue élevée perturbe la fluidité des flux audio/vidéo.

- **Taux de perte de paquets (Packet Loss Rate)**

  Mesure la proportion de paquets non délivrés à destination, souvent causée par la congestion du réseau.

  Un taux < 1 % est acceptable pour la majorité des services ; pour des applications critiques, il doit tendre vers 0.

- **Disponibilité du service**

  Pourcentage du temps pendant lequel le service est disponible et fonctionnel. Les réseaux à haute disponibilité visent des taux de 99,999 % (≈ 5 min d'interruption/an), grâce à des infrastructures redondantes.

- **Fiabilité de la transmission**

  Capacité du réseau à maintenir une liaison stable, sans coupures ni dégradations, essentielle pour les communications continues.

- **Accessibilité du réseau (Access Success Rate)**

  Taux de réussite des tentatives d'accès au réseau (voix ou données). Un bon taux d'accessibilité reflète le bon fonctionnement des interfaces radio et du cœur de réseau.

1.5.1.2 Approches de gestion de la QoS

Deux grandes approches sont généralement utilisées :

- **DiffServ (Differentiated Services)**
  Basée sur la classification des flux par classe de service, cette approche permet une gestion locale des priorités dans les équipements réseau.
- **IntServ (Integrated Services)**
  Repose sur une réservation explicite des ressources de bout en bout pour chaque flux, assurant une garantie stricte de performance.

1.5.2. La synchronisation dans les réseaux mobiles

La synchronisation joue un rôle essentiel dans les réseaux mobiles à partir de la 3G. Elle permet d'aligner précisément les éléments du réseau sur une référence commune de fréquence et/ou de temps**,** condition indispensable au bon fonctionnement des services mobiles.

Elle garantit :

- La stabilité des communications,
- Une gestion efficace du spectre,
- La coordination des transmissions, notamment en mode TDD où émission et réception partagent le même canal à différents instants.

1.5.2.1. Technologie de synchronisation :

La tableau 1.2 ci-dessous illustre les différentes technologies de synchronisation :

Type	Technologies associées
Fréquence	**GPS** : source universelle de référence **SyncE (Synchronous Ethernet)** : distribution d'horloge via les liaisons Ethernet **ACR** : récupération d'horloge à partir des flux de paquets
Time	**IEEE 1588v2 (PTP)** : protocole de synchronisation par paquets à précision microseconde **GPS** (sites critiques) **Boundary / Transparent Clocks** pour améliorer la précision en réseau complexe

Tableau 1.2 : les technologies de synchronisation

1.5.3. Les Topologies des réseaux mobiles :

La topologie d'un réseau de télécommunications mobiles désigne l'architecture physique et logique de l'ensemble des composants interconnectés qui assurent la fourniture des services de communication.

La conception et l'optimisation de la topologie d'un réseau mobile dépendent de plusieurs paramètres clés :

- La densité de population et la distribution spatiale des utilisateurs (zone urbaine, périurbaine, rurale) ;
- La bande passante disponible et les fréquences utilisées ;
- Les technologies d'accès et de transport disponibles ;
- Les exigences de qualité de service (QoS) ;
- Les types de services offerts (voix, vidéo, IoT, accès ultra-rapide).

Plusieurs types de topologies peuvent être identifiés :

- **Topologie en étoile :** Il s'agit de la topologie la plus courante dans les réseaux mobiles. Chaque station de base (BTS, eNodeB, gNodeB) est connectée individuellement au nœud central (souvent une passerelle ou un routeur d'agrégation). Cette architecture permet une gestion centralisée du trafic, mais peut présenter des points de défaillance uniques.
- **Topologie en anneau** : Les nœuds sont connectés de manière circulaire. Cette architecture est souvent utilisée dans les réseaux de transport en fibre optique (SDH, DWDM) car elle permet la redondance : en cas de rupture de lien, le trafic peut être rerouté dans l'autre sens de l'anneau. Elle améliore donc la résilience du réseau.
- **Topologie maillée (Mesh) :** Dans cette configuration, chaque nœud est connecté à plusieurs autres nœuds. Cela permet une haute disponibilité du réseau, avec de multiples chemins possibles entre les équipements. Cette topologie est toutefois plus coûteuse en déploiement et en maintenance. Elle est souvent utilisée pour les backhauls critiques ou dans les architectures avancées (par exemple, dans les solutions 5G mmWave).
- **Topologie arborescente (ou hiérarchique) :** Cette architecture est utilisée pour organiser le réseau de manière hiérarchique, avec plusieurs niveaux d'équipements de transmission (stations de base, nœuds d'agrégation, routeurs de cœur de réseau). Elle permet une gestion optimisée du trafic et de la montée en charge.
- **Topologie hybride :** De nombreux réseaux modernes combinent plusieurs topologies pour tirer parti des avantages de chacune. Par exemple, un réseau peut combiner une topologie en étoile pour le RAN, une topologie en anneau pour le transport optique, et une topologie maillée entre les centres de données

1.5.4 Mode d'exploitation Full duplex :

Dans le domaine des communications mobiles, la capacité à transmettre et recevoir des données simultanément c'est-à-dire en liaison montante (uplink) et descendante (downlink) représente un enjeu fondamental pour assurer une communication bidirectionnelle efficace.

Les générations précédentes de réseaux mobiles, notamment la 3G, 4G et même certaines configurations de la 5G, ont reposé sur des techniques dites semi-duplex,

principalement le duplex à répartition en fréquence (FDD) et le duplex à répartition dans le temps (TDD).

- Dans le FDD, deux bandes de fréquences distinctes sont allouées : une pour l'émission et une autre pour la réception. Cette séparation permet des transmissions quasi-simultanées, mais requiert l'usage de filtres complexes afin de minimiser les interférences entre les deux bandes. La conception de ces filtres devient particulièrement difficile et coûteuse lorsque plusieurs bandes sont utilisées, entraînant une augmentation du volume des équipements et une dégradation des performances à cause des pertes supplémentaires introduites dans la liaison.
- Le TDD, quant à lui, utilise une seule bande de fréquence partagée dans le temps entre l'uplink et le downlink. Des créneaux temporels distincts sont attribués à chaque direction. Bien que la transmission ne soit pas techniquement simultanée, la brièveté des intervalles donne une impression de simultanéité à l'utilisateur final. Cette technique offre également une grande flexibilité dans l'ajustement des ressources selon le sens du trafic, ce qui est particulièrement avantageux pour les usages à forte asymétrie (comme le streaming ou le téléchargement massif).

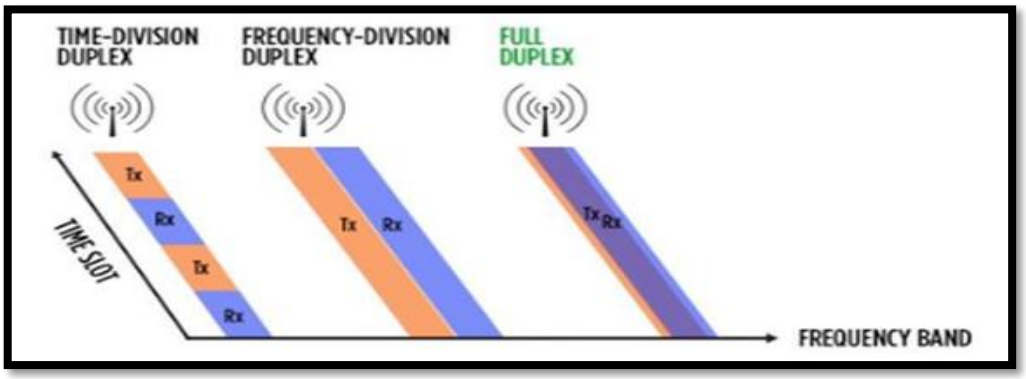


Figure 1.7 : Illustration du full-duplex, comparé au FDD et TDD

1.5.5 Les interfaces :

Dans toute architecture mobile, les interfaces réseau assurent la communication entre les différentes entités fonctionnelles réparties dans les couches radio, de transport et de cœur. Ces interfaces, normalisées par le 3GPP, garantissent l'interopérabilité entre équipements multi-constructeurs et facilitent l'évolution vers de nouvelles générations de réseau.

Il existe cinq types d'interface comme illustre la figure 1.8 suivante :

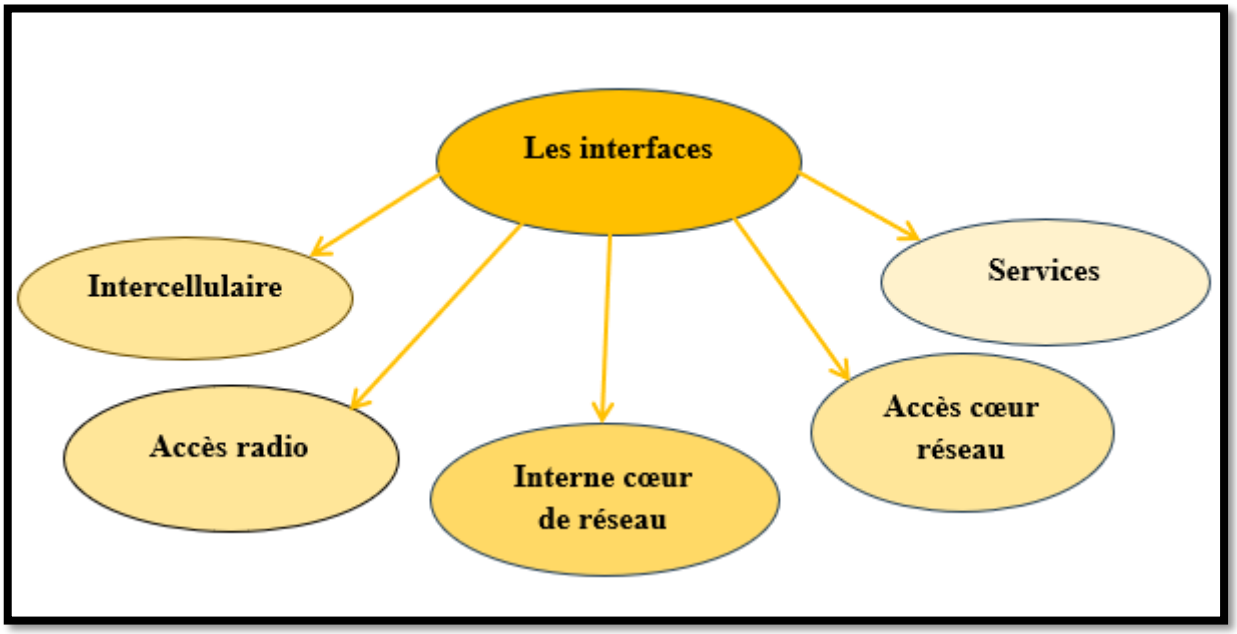


Figure 1.8 : les types des interfaces

Le tableau 1.3 ci-dessous exprime le rôle de chaque interface :

Type	Rôle	Example
Intercellulaire	Connexion entre les stations de base	X2 : entre deux eNodeB (LTE) Xn : entre deux gNodeB (5G NR)
Service	Interfaces d'exposition ou d'interaction externe	NnGf / NEF : exposition des services 5G SCP / SBI : en architecture service-based (5GC)
Accès radio	Assurer la communication entre l'équipement utilisateur (UE) et les stations de base	Uu : Interface air entre l'UE et la station radio (NodeB/eNodeB/gNodeB)
Accès cœur réseau	Relient les stations de base au cœur	NG-C / NG-U : 5G Core
Interne cœur de réseau	Entre les entités logiques qui gèrent la mobilité, les sessions, la sécurité	S5 / N9 : SGW ↔ PGW / UPF ↔ UPF N4 : SMF ↔ UPF (5GC) N2 : gNodeB ↔ AMF (signalisation)

Tableau 1.3 : rôle des interfaces

1.6. Les modèles de propagation RF :

Le modèle de propagation est capable d'estimer la valeur d'atténuation du trajet. Le choix du modèle de propagation est un compromis entre la précision de la prédiction et

l'efficacité des calculs. Il est important de noter que le mode de transmission dépend du type de zone telle qu'urbaine, suburbaine et rurale.

- Zone urbaine : forte densité de bâtiment, nombreuses réflexions et diffraction
- Zone suburbaine : moyen densité d'utilisateur moins d'obstacle propagation plus direct
- Zone rural (ouverte) : faible densité d'utilisateur, pas de grand obstacle.

Le modèle de propagation est une représentation mathématique ou empirique permettant de prédire le niveau de signal reçues ou un point donné. qui dépend des factures suivantes :

- La fréquence : plus la fréquence est élevée, plus l'atténuation est importante ;
- La distance entre l'émetteur et les récepteurs : la puissance diminue avec la distance ;
- Les hauteurs des antennes démission et de réception ;
- Caractéristiques et densité des bâtiments ;
- Les conditions atmosphériques ;
- Type de terrain ;

1.6.1. Catégories de modelés de propagation :

On distingue trois grandes catégories de modèles comme exprime le tableau 1.4 suivant :

Catégories de modelés	Basé sur	Avantage	Limite	Exemple
Empirique	Mesures	Simple , rapide à mettre en œuvre	Peu précis hors des condition testées	Okumura-Hata ,Cost-231 Hata
Déterministe	Physique	Très précis	Complexe ,gourmand en ressources	Free Space Path Loss
Stochastique	Statistique	Représentation relatives des canaux	Moins adapté à la prédiction de couverture	Log-Normal Shadowing

Tableau1.4 : Catégories de modelés de propagation

1.6.2. Phénomène de propagation des ondes :

La propagation des ondes est influencée par plusieurs phénomènes physiques liés à l'interaction entre l'onde et le milieu traversé. Dans des environnements complexes, tels que les milieux poreux, urbains ou forestiers, Stéphane emmène déterminant la portée, l'atténuation et la distorsion de signal.

Les principaux phénomènes sont :

- **Réflexion :**

Lorsqu'une onde rencontre un obstacle un changement brusque d'impédance, une partie de son énergie est réfléchie. Ce phénomène est très fréquent dans les environnements urbains (murs, bâtiment) et contribue à la création de trajets multiples.

- **Diffraction :**

La diffraction est le contournement d'un obstacle par l'onde. Ce phénomène permet aux signaux de continuer à se propager même sans ligne de vue directe (Non-line of sight, NLOS) mais avec une perte d'énergie importante.

- **Réfraction :**

Lorsque l'onde passe d'un milieu à un autre avec une permittivité différente, elle change de direction. Cela se produit souvent dans des environnements hétérogènes (sol, air, végétation).

- **Absorption et Atténuation :**

L'énergie de l'onde est particulièrement convertie en chaleur ou absorbée par le Milieu, ce qui réduit l'intensité de signal avec la distance. L'atténuation dépend fortement de la fréquence et de la composition du milieu (eau, humidité, obstacle).

- **Diffusion :**

Les irrégularités de milieu entraînent une dispersion de l'onde dans plusieurs directions. Ce phénomène est particulièrement important en présence d'objets de petite taille (arbre, mobile urbain)

- **Dispersion :**

Différentes fréquences d'un signal Large bande se propagent à des vitesses différentes, ce qui provoque une déformation temporelle du signal.

- **Effet de porosité :**

Les milieux multi poreux (forêt dense, bâtiments) ont des réponses Complexes qui absorbent, relativement et diffusent les ondes de manière non linéaire. Cela peut être

rapproché de la propagation dans des environnements riches en obstacle (zones indoor, feuillage, structures métalliques).

1.7. Conclusion :

À travers ce premier chapitre, nous avons établi une vision d'ensemble des fondements techniques et réglementaires encadrant les réseaux mobiles. L'analyse de l'organisation de l'opérateur Djezzy a permis de mettre en lumière l'importance stratégique de l'architecture de transmission, pilier de la performance réseau. L'évolution des générations cellulaires, du 1G jusqu'à la 5G, illustre les avancées majeures en matière de débit, de latence et de services proposés.

Par ailleurs, les exigences croissantes en qualité de service, les enjeux de synchronisation temporelle et les choix de topologie apparaissent comme des leviers clés dans le déploiement efficace d'un réseau mobile de nouvelle génération.

Enfin, la prise en compte des modèles de propagation et des phénomènes physiques associés représente un prérequis indispensable à toute démarche de planification radio.

Ces éléments constituent le socle théorique et contextuel sur lequel s'appuie notre projet, qui portera, dans les chapitres suivants, sur l'analyse détaillée de l'architecture E2E du réseau de transmission 5G chez l'opérateur Djezzy, et la simulation de ses liaisons à l'aide d'outils spécialisés.

Chapitre 2

Architecture E2E d'un réseau 5G NSA

2.1. Introduction :

Actuellement, l'opérateur Djezzy déploie la 5G en se basant sur une architecture non autonome (NSA). Cela permet une migration graduelle du réseau 4G actuel vers un réseau entièrement 5G (standalone). Ce modèle fonctionne sur le principe que la 5G exploite le réseau central 4G LTE (Evolved Packet Core - EPC), tout en incorporant des stations de base 5G (gNodeB) au niveau de la couche d'accès.

Cette méthode hybride facilite une implantation rapide de la 5G à moindre coût, tout en tirant parti des infrastructures déjà en place, notamment pour le transport et la gestion du trafic.

Ce chapitre décrit minutieusement l'architecture de bout à bout (E2E) du système de transmission 5G NSA de l'opérateur Djezzy, englobant depuis la couche d'accès radio jusqu'au cœur du réseau.

2.2. Définition :

Dans le domaine des réseaux mobiles, le terme « end-to-end » (E2E) désigne une chaîne de transmission complète reliant l'utilisateur final (terminal mobile) aux plateformes de services et d'Internet, en passant par toutes les couches intermédiaires du réseau opérateur. Dans le cas de la 5G en mode Non Standalone (NSA), cette architecture repose sur l'intégration du réseau LTE existant avec les nouveaux équipements 5G NR, offrant ainsi un réseau hybride à la fois performant et économiquement viable

L'architecture E2E du réseau 5G NSA repose sur trois couches principales comme l'illustre la figure 2.1 suivante :

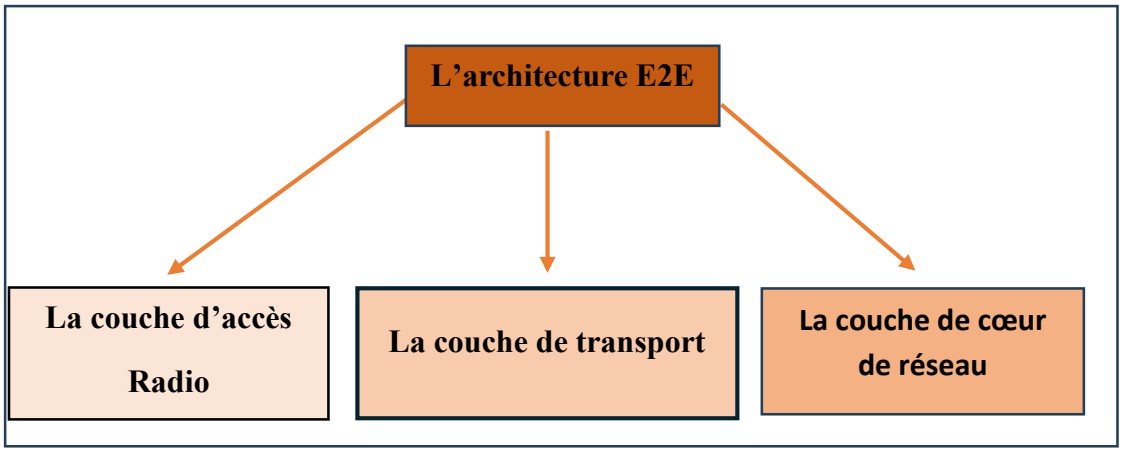


Figure 2.1 : les couches de l'architecture E2E

2.2.1. La couche d'accès radio :

La couche d'accès constitue la première étape de la chaîne de transmission. Elle comprend trois éléments : eNodeB (LTE), gNodeB et UE.

La figure 1.2 ci-dessous illustre les éléments de la couche d'accès Radio :

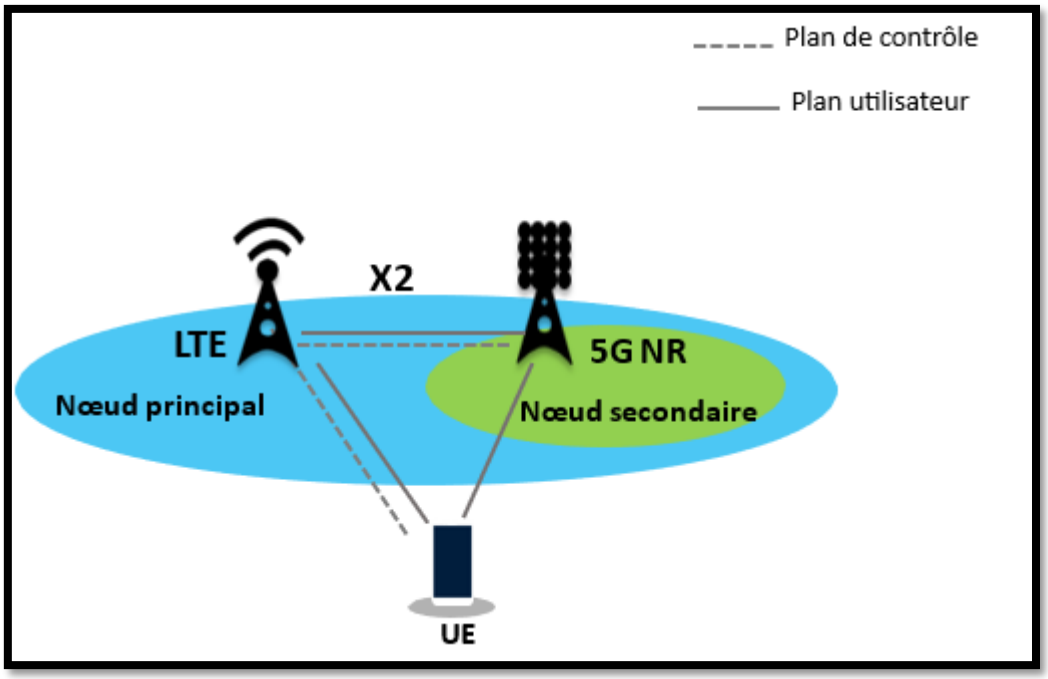


Figure 2.2: la couche d'accès Radio

2.2.1.1. eNodeB (LTE) :

Le eNodeB (Evolved Node B) désigne la station de base du réseau LTE **(**4G), Dans l'architecture 5G NSA, l'eNodeB LTE existant devient le point de contrôle principal de l'équipement utilisateur (UE). Il est responsable de la coordination entre la partie LTE (qu'il gère directement) et la partie 5G NR (gérée par le gNodeB).

En tant que Master Node, le eNodeB est responsable de :

- Initie et contrôle l'établissement de la double connectivité LTE+NR,
- Transmet la signalisation du cœur EPC vers l'UE (canal de contrôle),
- Échange des données avec le gNodeB (Secondary Node) via l'interface X2,
- Supervise la répartition dynamique du trafic entre les deux réseaux (LTE et NR),
- Assure la continuité de service, en particulier lors des déplacements (handover inter-RAT).

2.1.1.2. **gNodeB** (next-generation Node B) :

gNodeB est la station de base radio dédiée au nouveau standard 5G NR (New Radio). Dans le cadre d'une architecture 5G Non-Standalone (NSA), il ne fonctionne pas de manière autonome, mais en coordination avec un eNodeB (LTE) qui reste connecté au cœur de réseau 4G (EPC). Le gNodeB prend alors le rôle de nœud secondaire (Secondary Node), chargé principalement de transmettre les données utilisateur à très haut débit. Sa mission est centrée sur l'amélioration des performances radio : il exploite de nouvelles bandes de fréquences (souvent autour de 3,5 GHz), prend en charge des technologies avancées comme le Massive MIMO et le beamforming, et offre des débits bien supérieurs à ceux de la 4G. Toutefois, la signalisation, l'établissement de session et la gestion de la mobilité restent assurés par le eNodeB.

2.1.1.3. UE (User Equipment) :

UE désigne tout équipement terminal utilisé par un abonné pour accéder aux services du réseau mobile. Il peut s'agir d'un smartphone, d'une tablette, d'un modem 5G, ou de tout autre appareil compatible. Dans l'architecture 5G NSA (Non-Standalone), l'UE occupe une position centrale, car il est l'élément directement connecté aux deux réseaux radio : LTE et NR.

Pour pouvoir bénéficier des avantages de la 5G NSA, l'UE doit être compatible avec la double connectivité EN-DC. Cela signifie qu'il est capable de maintenir simultanément une liaison radio avec le eNodeB (4G) pour le contrôle du réseau, et avec le gNodeB (5G) pour le transfert des données utilisateur à haut débit. Ce fonctionnement parallèle permet à l'utilisateur de profiter d'un meilleur débit, d'une latence réduite, et d'une qualité de service plus stable, sans avoir besoin de modifier l'infrastructure réseau existante.

- **L'interface X2** : un lien de communication logique permet l'échange d'informations entre eNodeB et gNodeB, notamment pour la coordination radio, la répartition des ressources et le routage du trafic utilisateur.

Dans une architecture réseau mobile 5G NSA, les échanges entre le terminal utilisateur (UE) et le réseau sont organisés en deux plans fonctionnels distincts, mais complémentaires : le plan de contrôle et le plan utilisateur.

- **Plan de contrôle (Control Plane) :**

Le plan de contrôle correspond à l'ensemble des signalisations et messages de gestion qui permettent d'établir, de maintenir et de libérer une connexion entre le terminal et le réseau. Il ne transporte pas les données de l'utilisateur, mais oriente et supervise la communication.

Fonctions principales :

- Authentification de l'utilisateur,
- Attachement au réseau,
- Allocation d'adresses IP,
- Gestion de la mobilité (handover),
- Établissement des sessions.

- **Le plan utilisateur (User Plane) :**

Le plan utilisateur est chargé du transport effectif des informations échangées par l'utilisateur : navigation Internet, appels VoIP, vidéos, messages, etc. C'est ce plan qui transmet le contenu demandé ou envoyé par le terminal.

Fonctions principales :

- Transport des paquets de données IP,
- Application des règles de qualité de service (QoS),
- Routage vers Internet ou d'autres réseaux.

2.2.2. La couche de transport :

La couche de transport assure l'interconnexion entre la couche d'accès radio (gNodeB/eNodeB) et le cœur du réseau EPC. Elle constitue une composante essentielle de l'architecture E2E en 5G NSA, garantissant l'acheminement efficace des flux de données, qu'ils soient issus du plan utilisateur ou du plan de contrôle.
Elle regroupe l'ensemble des liaisons physiques (fibre optique, faisceaux hertziens, satellite), des équipements d'agrégation (GNE, routeurs, switchs IP/MPLS) et des protocoles de transport utilisés pour assurer la performance du réseau.

Dans le cas de l'opérateur Djezzy, l'architecture de transport s'appuie principalement sur trois composantes fonctionnelles :Backhaul,Backbone et Vsat

La figure 2.3 ci-dessous illustre les composantes de la couche transport :

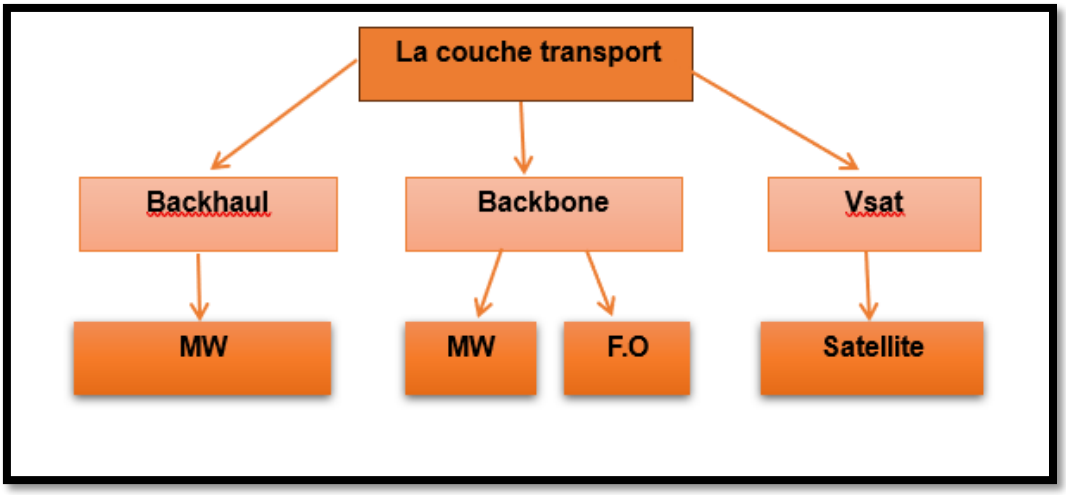


Figure 2.3: les composantes de la couche de transport

2.2.2.1. Backhaul :

Le backhaul assure l'acheminement fiable du trafic entre les stations de base (gNodeB/eNodeB) et les équipements d'agrégation du réseau, en maintenant une latence maîtrisée et une continuité de service, éléments clés pour la performance du réseau mobile.

2.2.2.1.1. Les liaisons hertziennes micro-ondes :

Une liaison hertzienne est une transmission sans fil entre deux antennes directionnelles (paraboliques ou plats), orientées face à face, et séparées par plusieurs kilomètres. Elle repose sur la propagation d'ondes électromagnétiques dans des bandes de fréquences dites micro-ondes.

Dans les environnements non fibrées, difficiles d'accès trop coûteuse à déployer rapidement (zones rurales, montagneuses, ou périurbaines), l'opérateur Djezzy utilise des liaisons point-à-point basées sur les faisceaux hertziens. Ces liaisons sont souvent déployées en topologie maillée ou en anneau, et fonctionnent dans des bandes de fréquences comprises entre 15 GHz et 80 GHz.

2.2.2.1.1.1. Rôles fonctionnels des liaisons hertziennes dans l’architecture de transport :

- **Connecter les sites ruraux ou montagneux :**
  - Dans les régions montagneuses ou peu denses, il est difficile, voire impossible, d’installer de la fibre.
  - Une liaison hertzienne peut être mise en œuvre rapidement et à moindre coût.
- **Assurer la résilience des sites fibrés :**
  - Même les sites connectés en fibre peuvent être vulnérables (coupure, travaux, vandalisme…).
  - L’opérateur Djezzy utilise les liaisons hertziennes comme liens de secours (backup) pour garantir la continuité de service.
- **Accélérer le déploiement de la 5G :**
  - Lors du lancement de nouveaux sites NR, la disponibilité immédiate de la fibre n’est pas toujours garantie.
  - Les faisceaux hertziens permettent de mettre le site en service rapidement, en attendant l’arrivée d’une liaison optique permanente.

Pour garantir la fiabilité d’une liaison hertzienne, il est nécessaire de réaliser un bilan de liaison qui permet d’évaluer la puissance reçue et d’assurer une marge suffisante face aux pertes de propagation.

2.2.2.1.2. Bilan de liaison :

L'évaluation du bilan de liaison implique de cumuler tous les aspects du gain (croissance) ou de la perte (réduction) du signal radio entre les deux points, et ensuite de déterminer si ce qui subsiste entre le point de départ et le point d'arrivée est adéquat. L'évaluation de la liaison est cruciale au niveau du récepteur, étant donné que la qualité du signal réceptionné détermine la qualité de la connexion établie. Une meilleure qualité du signal se traduira par une connexion plus fiable et plus performante.

2.2.2.1.2.1. Equation de bilan de liaison :

L'image 2.5 ci-dessous illustre un bilan de liaison :

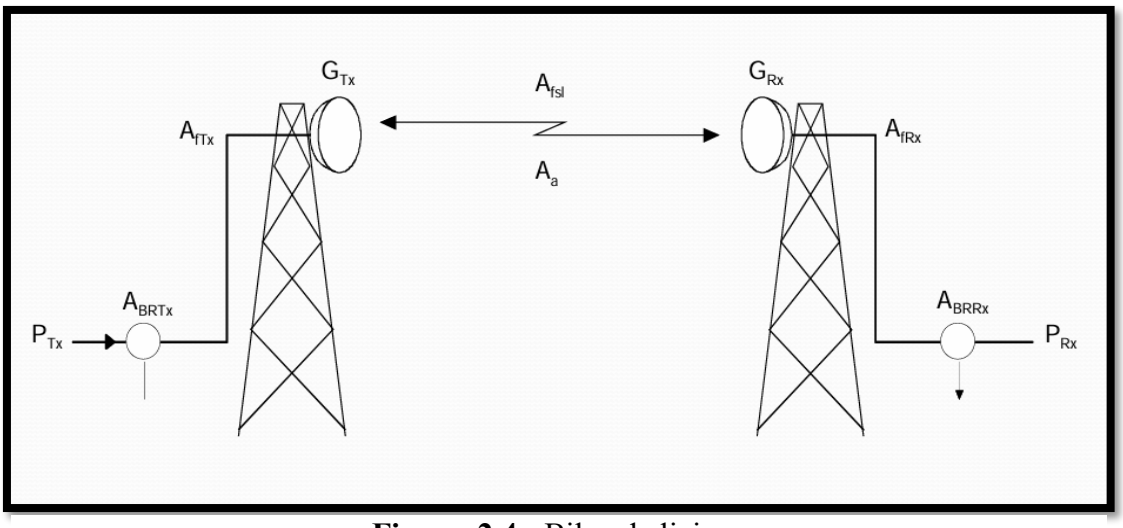


Figure 2.4 : Bilan de liaison

L'équation permet de calculer le niveau de puissance du signal reçu en tenant compte de tous les gains et pertes dans une liaison sans fil.

La formule est donnée en dBm par la formule suivante :

$$P_{RX}=P_{TX}+G_{TX}+G_{RX}-A_{fsl}-A_a-A_{f,Rx}-A_{f,Tx}-A_{BR}-A-M$$

Avec :

P_{RX} : Puissance reçue

P_{TX} : Puissance transmise

G_{TX} : Gain de l'antenne émettrice

G_{RX} : Gain de l'antenne réceptrice

A_{fsl} : Perte de propagation en espace libre

A_a : Perte d'absorption atmosphérique

$A_{f,Rx}$: Perte dans la ligne d'alimentation de réception

$A_{f,Tx}$: Perte dans la ligne d'émission

A_{BR} : Perte dans les systèmes de dérivation .

A : autre atténuation

M : Marge

- **Perte en espace libre (FSL – Free Space Loss) :**

  La perte en espace libre représente l'atténuation du signal radio due à la dispersion naturelle de l'onde électromagnétique lorsqu'elle se propage dans un espace sans obstacle.

Perte en espace libre est donnée par la formule suivante :

$$L_{FS}\ (dB)=92.4+20\log(f)+20\log(d)$$

Où :

L_{FS} : Perte en espace libre (dB)

f : Fréquence du signal (Ghz)

d : Distance entre émetteur et récepteur (KM)

- **Gain d'antenne :**

Le gain dépend de la longueur de la bande de fréquence et de la capacité de l'antenne à focaliser l'énergie dans une direction, le gain est la surface effective d'une antenne. Il est exprimé en dB, La relation entre gain et la surface effective de l'antenne est donnée par :

$$G=\left(\frac{4\pi A}{2\lambda}\right)$$

Avec :

A : Aire équivalente de l'antenne

λ : Longueur de l'onde rayonnée

- **Les pertes :**
  - Perte d'absorption atmosphérique : Atténuation du signal causée par l'absorption des ondes radio par l'atmosphère**,** notamment par la vapeur d'eau, l'oxygène, la pluie ou la neige
  - Perte dans la ligne d'émission : Atténuation du signal dans les câbles coaxiaux ou guides d'onde reliant l'équipement d'émission à l'antenne
  - Perte dans la ligne de réception : Atténuation du signal dans les câbles coaxiaux ou guides d'onde reliant l'équipement de réception à l'antenne.
  - Perte dans les systèmes de dérivation : pertes causées par l'utilisation de dispositifs passifs
  - La Marge de sécurité : ajoutée pour compenser les incertitudes**,** les variations de signal (fading), ou d'autres facteurs non modélisés (obstacles temporaires, interférences, vieillissement des équipements, etc.).

    - Une marge typique est de 30 à 40 dB selon la criticité de la liaison et les conditions environnementales.
    - Cette marge assure une fiabilité élevée même en cas de conditions défavorables.

2.2.2.1.2. Nœud d'agrégation GNE (Gatway Network Element) :

Le GNE est un nœud intelligent de convergence déployé dans le réseau de transport. Il assure la collecte, l'agrégation, le routage et l'optimisation des flux de données provenant de plusieurs gNodeB et eNodeB.

Fonctions principales :

- Switching IP/MPLS pour la QoS différenciée,
- Séparation des flux de signalisation et utilisateur,
- Encapsulation sécurisée (IPSec, GRE),
- Gestion centralisée via OSS/NMS,
- Prise en charge des protocoles de synchronisation PTP (IEEE 1588v2) et Synchronous Ethernet.

2.2.2.2. Backbone :

Le backbone, ou dorsale du réseau, constitue la structure centrale de l'architecture de transmission. Il relie les zones d'agrégation du trafic (issues des backhauls) aux éléments centraux du réseau, tels que le cœur EPC ou les data centers, et permet l'acheminement de volumes massifs de données à travers des distances importantes, avec des garanties élevées en termes de débit, de stabilité et de disponibilité.

Dans le cas de l'opérateur Djezzy, le backbone repose sur une infrastructure hybride, combinant :

- Des liaisons micro-ondes longue distance, déployées dans les régions non fibrées ou à faible densité urbaine ;
- Des liaisons par fibre optique, lorsqu'elles sont disponibles, souvent renforcées par des technologies de multiplexage optique comme le DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), afin de supporter de très hauts débits.

Cette infrastructure permet de transporter le trafic régional vers le cœur de réseau avec des capacités allant de 100Gbit/s à 400 Gbit/s, en assurant une résilience élevée grâce à des topologies en anneau ou en maillage, ainsi qu'un routage intelligent via des protocoles IP/MPLS.

Le backbone joue un rôle crucial dans la qualité globale du service réseau, en maintenant :

- Une redondance permanente,
- Une optimisation des chemins de transmission,
- Une capacité d'évolution vers les exigences futures de la 5G

2.2.2.2.1. La fibre Optique

La fibre optique est une technologie de transmission qui utilise la lumière pour transporter les données à très haute vitesse sur de longues distances, avec une très faible atténuation et une immunité aux interférences électromagnétiques. Elle constitue aujourd'hui l'un des supports privilégiés pour les réseaux de transport des opérateurs télécoms.

Dans le contexte des réseaux 4G et 5G, la fibre est essentielle pour :

- Supporter les très hauts débits,
- Garantir une faible latence,
- Assurer une fiabilité élevée et une évolutivité vers les futures générations de services.

Chez l'opérateur Djezzy, la fibre est principalement utilisée dans le backbone, sur les grands axes interrégionaux, là où le déploiement est possible et rentable. Afin de maximiser sa capacité, des techniques de multiplexage optique sont mises en œuvre, notamment le CWDM et le DWDM.

- **CWDM :** Le CWDM est une technique de multiplexage optique qui permet de transmettre simultanément plusieurs flux de données sur une seule fibre, en utilisant des longueurs d'onde espacées d'environ 20 nm. Il s'agit d'une solution simple, économique et efficace pour augmenter la capacité sans poser de nouvelles fibres.
- **DWDM :** Le DWDM est une technologie de multiplexage à haute densité, qui permet de transporter jusqu'à 80 à 96 longueurs d'onde (λ) sur une seule fibre, avec des espacements très faibles (0,8 nm ou 100 GHz).
  Chaque longueur d'onde peut transporter de 10 à 400 Gbit/s, ce qui permet d'atteindre des capacités de plusieurs térabits par seconde (Tbps) sur une seule liaison.

Le tableau 2.1 suivant propose une comparaison synthétique entre le CWDM et le DWDM :

Caractéristique	CWDM	DWDM
Espacement spectral	20 nm	0,8 nm (100 GHz)
Nombre de canaux	Jusqu'à 16	Jusqu'à 96
Débit par canal	1 à 10 Gbit/s	10 à 400 Gbit/s
Distance maximale	40–60 km	> 1000 km avec amplification
Coût	Faible	Plus élevé
Commutation optique (λ)	Non	Oui
Usage typique	Collecte urbaine/régionale	Backbone opérateur

Tableau 2.1 : une comparaison synthétique entre le CWDM et le DWDM

2.2.2.2. 2. Protocole IP/MPLS :

L'ensemble du réseau de transport est basé sur une architecture IP/MPLS (Multiprotocol Label Switching), qui permet une gestion efficace, flexible et hiérarchisée du trafic. MPLS utilise des labels pour orienter les paquets, ce qui améliore la vitesse de transmission, réduit les erreurs de routage et permet l'ingénierie de trafic (Traffic Engineering).

Les principaux apports du réseau IP/MPLS chez l'opérateur Djezzy sont :

- Le support de la QoS grâce aux classes de service MPLS,
- La redondance dynamique des chemins (Fast Reroute),
- La possibilité d'isoler différents flux (gestion multi-services : VoIP, data, vidéo...),
- La compatibilité avec les services virtualisés (NFV, SDN).

2.2.1.3. Le VSAT

Le VSAT (Very Small Aperture Terminal) est une technologie de communication par satellite utilisée pour fournir une connectivité dans les zones où les solutions terrestres classiques, telles que la fibre optique ou les liaisons hertziennes, ne sont pas disponibles ou difficilement déployables. Bien que moins performante que les solutions filaires ou radio

en termes de latence et de capacité, elle reste un outil stratégique pour garantir la couverture réseau dans les environnements isolés.

Chez l’opérateur Djezzy, le VSAT est principalement utilisé dans les cas suivants :

- Sites géographiquement isolés, tels que des zones montagneuses, sahariennes ou rurales reculées ;
- Situations d’urgence ou de secours, où le réseau principal est momentanément hors service ;
- Déploiements temporaires, lors d’événements ponctuels ou pour des stations mobiles.

Le fonctionnement du VSAT repose sur une petite antenne parabolique installée sur le site à connecter, qui communique avec un satellite géostationnaire via un lien bidirectionnel. Ce système permet d’établir une liaison IP avec le réseau de l’opérateur, même en l’absence totale d’infrastructure terrestre.

Bien que la latence des communications par satellite soit plus élevée (du fait de la distance orbitale), le VSAT offre une solution robuste pour :

- Maintenir la connectivité dans les zones critiques,
- Renforcer la redondance du réseau,
- Garantir une disponibilité minimale dans des conditions défavorables.

2.2.3. La couche du cœur de réseau EPC :

Dans le mode NSA, le trafic 5G est redirigé vers le Evolved Packet Core (EPC), qui assure est responsable de la gestion des services, de la mobilité, de la connectivité inter-réseaux et du routage des données entre les utilisateurs finaux et les services applicatifs.

La figure 2.5 ci-dessous illustre les éléments de la coche cœur de réseau :

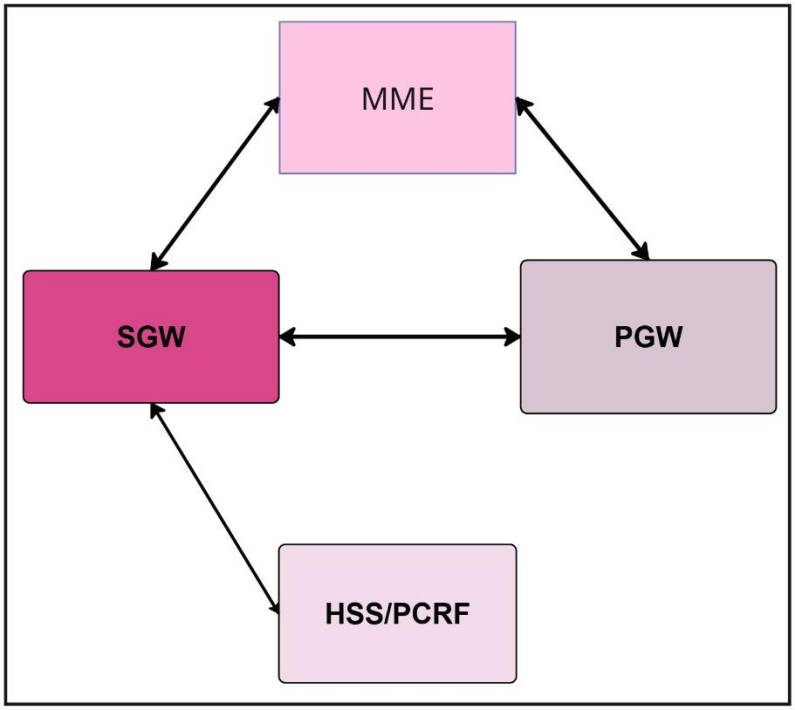


Figure 2.5 : la couche du cœur réseau EPC

2.2.3.1. MME – Mobility Management Entity :

Le MME est le nœud de contrôle central du cœur EPC. Il ne traite pas directement les paquets de données utilisateur, mais pilote les procédures d'accès, de mobilité et de sécurité. C'est lui qui oriente, autorise et sécurise la connexion d'un terminal lorsqu'il entre sur le réseau.

Fonctions principales :

- Authentifier l'UE à partir de son IMSI via l'interrogation du HSS,
- Gérer les procédures d'attachement, de détachement et de mise en veille,
- Contrôler les changements de cellules (handover intra-LTE ou inter-RAT),
- Coordonner la création des tunnels GTP entre l'UE, le SGW et le PGW,
- Superviser l'établissement des contextes de sécurité (chiffrement, intégrité).

2.2.3.2. SGW – Serving Gateway :

Le Serving Gateway est l'un des deux principaux nœuds de transport du cœur EPC. Il agit comme un point de relais entre le réseau d'accès (RAN) et le cœur IP. Il est responsable de l'acheminement des données utilisateur entre l'eNodeB et le PGW, tout en assurant la continuité de la session, même en cas de déplacement.

Fonctions principales :

- Acheminer les paquets de données entre eNodeB et PGW,
- Maintenir le tunnel de données pendant les handovers,
- Gérer les données de contexte de session utilisateur,
- Interagir avec d'autres SGW en cas de mobilité inter-zone

2.2.3.3. PGW – Packet Data Network Gateway :

Le PGW représente la passerelle entre le réseau LTE et les réseaux externes, notamment Internet, les services IMS (IP Multimedia Subsystem), ou les réseaux d'entreprise. Il est le seul composant à pouvoir attribuer une adresse IP à l'UE, et joue un rôle critique dans la gestion de la qualité de service (QoS) et de la sécurité.

Fonctions principales :

- Fournir l'adresse IP à l'UE au moment de l'attachement,
- Appliquer des politiques de QoS (débit, priorité, filtrage),
- Acheminer le trafic vers les services IP publics et privés,
- Mettre en œuvre les politiques de facturation (ex : données illimitées, quotas, priorités).

2.2.3.4. HSS – Home Subscriber Server

Le HSS est la base de données centrale des abonnés LTE. Il contient toutes les informations nécessaires à l'identification, l'authentification, la localisation et la configuration de l'abonné. Il travaille en étroite collaboration avec le MME et le PCRF.

Fonctions principales :

- Stocker les profils d'abonnés (IMSI, MSISDN, clés d'authentification),
- Gérer la localisation de l'UE dans le réseau,
- Interagir avec le MME pour l'authentification et l'allocation de ressources.

2.2.3.5. PCRF – Policy and Charging Rules Function

Le PCRF est l'entité qui génère et applique les règles de politique réseau. C'est lui qui décide quel type de QoS l'utilisateur peut recevoir selon son profil, et qui applique les règles de facturation, de priorité ou de blocage.

Fonctions principales :

- Appliquer des politiques de QoS dynamiques,
- Gérer la priorité des flux selon le type de service (VoIP, streaming, navigation),
- Gérer la facturation selon l'usage (ex : tarif par volume, par service, illimité…).

2.3. Architecteur E2E d'un réseau transmission 5G :

Le schéma présenté ci-dessous (figure 2.6) illustre l'architecture de transmission de bout en bout (E2E) mise en œuvre dans le réseau de l'opérateur Djezzy. Il retrace l'ensemble du parcours suivi par les données, depuis la station de base radio (gNodeB ou eNodeB) jusqu'au cœur de réseau EPC, en passant par les différents segments de la couche de transport.

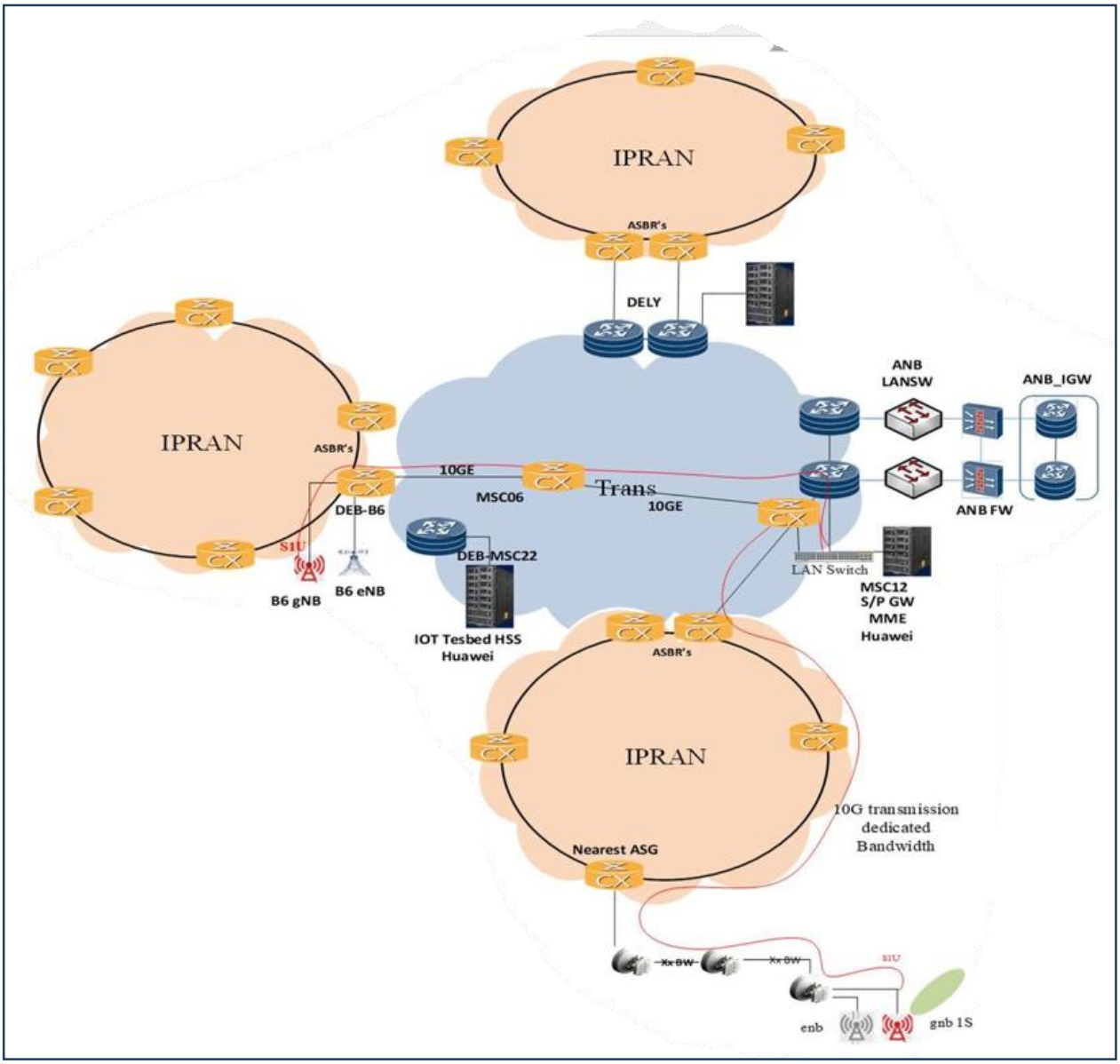


Figure 2.6 : Architecteur de transmission E2E d'un réseau 5G NSA

On y distingue clairement les liaisons backhaul, généralement assurées par des faisceaux hertziens point-à-point, reliant les sites radio aux nœuds d'agrégation (GNE). Ces derniers transfèrent ensuite le trafic vers le réseau IP/MPLS, qui constitue le socle du backbone, souvent renforcé par des liaisons à très haut débit utilisant la fibre optique avec la technologie DWDM.

Enfin, le trafic converge vers le cœur EPC, où sont situées les fonctions de gestion de la mobilité, du routage IP, de la sécurité, et de l'interconnexion avec Internet. Cette architecture reflète la structure réelle déployée par Djezzy, combinant technologies

hertziennes, optiques et logiques IP pour assurer une transmission fiable, évolutive et adaptée aux exigences de la 5G.

2.4. Technologies d'amélioration :

La technologie 5G NSA bénéficie de plusieurs technologies d'amélioration visant à optimiser ses performances.

2.3.1. Les technologies d'accès radio :

La figure 2.7 ci-dessous exprime les différentes technologies d'amélioration pour la couche d'accès radio :

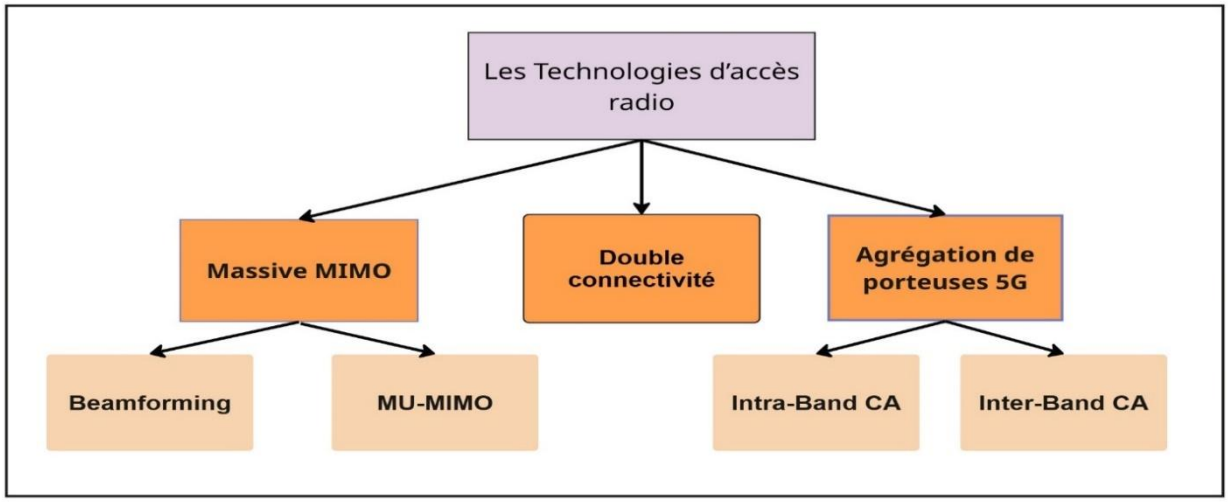


Figure 2.7 : les technologies d'amélioration de la couche d'accès radio

2.3.1.1. La technologie EN-DC (E-UTRA NR Dual Connectivity) :

La technologie EN-DC permet à un terminal de se connecter simultanément à une station 4G (eNodeB) servant de nœud maître, et à une station 5G NR (gNodeB) jouant le rôle de nœud secondaire. Ce fonctionnement en double connectivité optimise la couverture et la performance.

En pratique, un terminal compatible EN-DC peut transmettre ses données soit uniquement via LTE, soit conjointement via LTE et NR, selon la couverture disponible.

La plupart des terminaux commerciaux prennent en charge deux chaînes d'émission (2Tx), permettant l'usage parallèle d'un canal LTE et d'un canal NR.

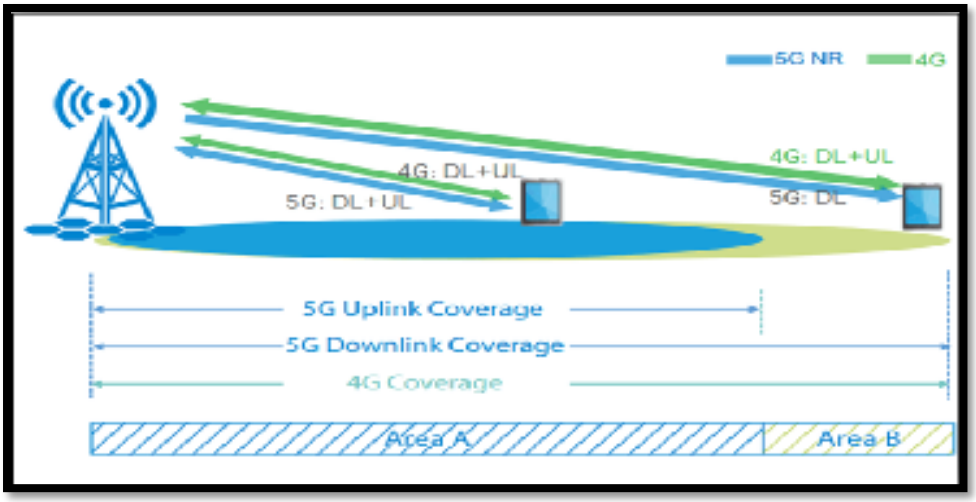


Figure 2.8: Mode de fonctionnement de la liaison montante de l'UE avec EN-DC.[6]

2.3.1.2. Agrégation de porteuses 5G (CA)

La technologie Carrier Agrégation (CA) agrège les ressources spectrales de la même bande de fréquences ou de différentes bandes de fréquences pour mieux utiliser le réseau ressources et améliorent également l'expérience utilisateur NR CA peut être classé comme CA intra-bande et CA inter-bande. L'agrégation de porteuses intra-bande NR fonctionne dans les mêmes bandes de fonctionnement et la porteuse inter bande NR l'agrégation opère dans les différentes bandes de fonctionnement. [7]

- **Intra-band Carrier Aggregation (Intra-Band CA)**

C'est L'agrégation de plusieurs porteuses dans la même bande de fonctionnement. Le 3GPP Rel-15 établit plusieurs CA intra-bande opérationnelle dans des différentes bandes, y compris n77, n78 et n79.

Étant donné que les transporteurs agrégés sont dans la même bande, ils peuvent utiliser les canaux de transmission d'UE en même temps, donc le débit de liaison montante est amélioré avec des transporteurs plus agrégés. [7]

- **Inter-Band Carrier Aggregation (Inter-Band CA):**

L'agrégation de porteuses inter-bandes regroupe les porteuses de différentes bandes de fonctionnement. Dans 3GPP Rel-15 définit 13 fonctionnements CA inter-bande bandes impliquant FR1, telles que CA_n3-n78, CA_n28-n78, etc. [7]

NR CA a été inclus depuis 3GPP Rel-15. L'AC intra-bande peut regrouper plusieurs porteuses de fréquence de la même bande et améliorer l'expérience utilisateur. Cependant, le débit du CA inter-bande peut être limité dans certains cas par le nombre de canaux de transmission des terminaux.

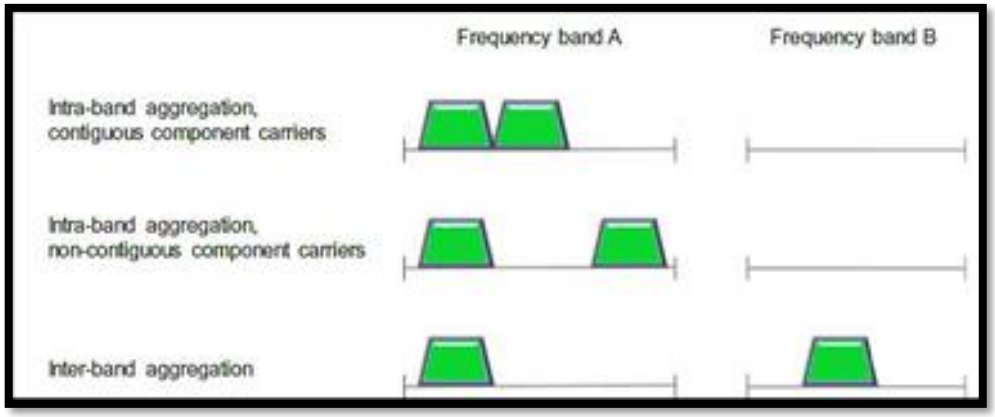


Figure 2.9: Types d'agrégation de porteuses. [7]

2.3.1.3. Massive MIMO :

Le Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output massif) représente une avancée majeure par rapport au MIMO traditionnel. Cette technologie repose sur l'intégration d'un grand nombre d'antennes – généralement 64, 128 voire davantage – au sein d'une même station de base. Contrairement aux générations précédentes limitées à quelques antennes (2x2 ou 4x4), le Massive MIMO permet de répondre à deux objectifs clés : augmenter considérablement la capacité du réseau, en permettant à de nombreux utilisateurs d'être connectés simultanément, et améliorer la couverture ainsi que la qualité du signal, même dans des environnements urbains denses ou complexes.

Massive MIMO propose deux innovations majeures :

- ✓ MU-MIMO
- ✓ Beamforming

- **MU-MIMO (Multi-Utilisateur MIMO) le système multi-utilisateur MIMO (multi-user MIMO) :**

Le principe du MU-MIMO (Multi-User MIMO) autorise une station de base d'échanger simultanément avec différents terminaux en utilisant les mêmes ressources spectrales.

Cette capacité à différencier spatialement les signaux rend possible la création de canaux de communication parallèles, améliorant ainsi l'efficacité spectrale globale. En combinant cette approche avec l'augmentation du nombre d'antennes (Massive MIMO), il devient possible d'augmenter les débits sans nécessairement élargir la bande passante ou faire appel à des schémas de modulation plus complexes. Cela se traduit par une amélioration significative de la capacité réseau, notamment dans les environnements où la densité d'utilisateurs est élevée.

- **Le beamforming :**

Le beamforming, ou formation de faisceaux, est une technique clé utilisée conjointement avec le Massive MIMO. Il permet de diriger de manière dynamique le signal radio vers un utilisateur spécifique, plutôt que de le diffuser uniformément dans toutes les directions comme le font les antennes classiques. Ce ciblage est rendu possible par le réglage fin de la phase et de l'amplitude des signaux émis par chaque antenne du réseau. En créant des interférences constructives dans certaines directions et destructives dans d'autres, le système concentre l'énergie du signal là où elle est nécessaire, ce qui améliore significativement la portée, la qualité du lien radio et la robustesse du signal. Dans les réseaux 5G, le beamforming est souvent appliqué en 3D, permettant une orientation non seulement horizontale, mais aussi verticale du faisceau, pour cibler par exemple des utilisateurs situés à différents étages d'un bâtiment. Cette capacité à adapter le faisceau en temps réel améliore la couverture tout en réduisant les interférences intercellulaires, ce qui est essentiel dans les environnements urbains denses.

La figure 2.10 ci-dessous illustre le fonctionnement de beamforming 3D :

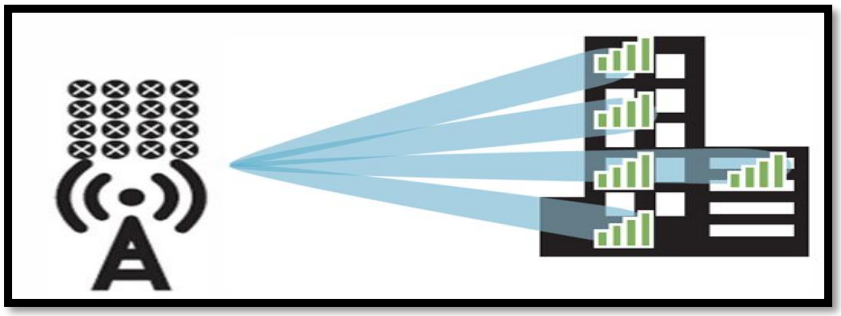


Figure 2.10: Illustration du beamforming 3D

2.3.2. Les technologies de Transport :

La figure 2.8 ci-dessous illustre les différentes technologies d'amélioration pour la couche Transport :

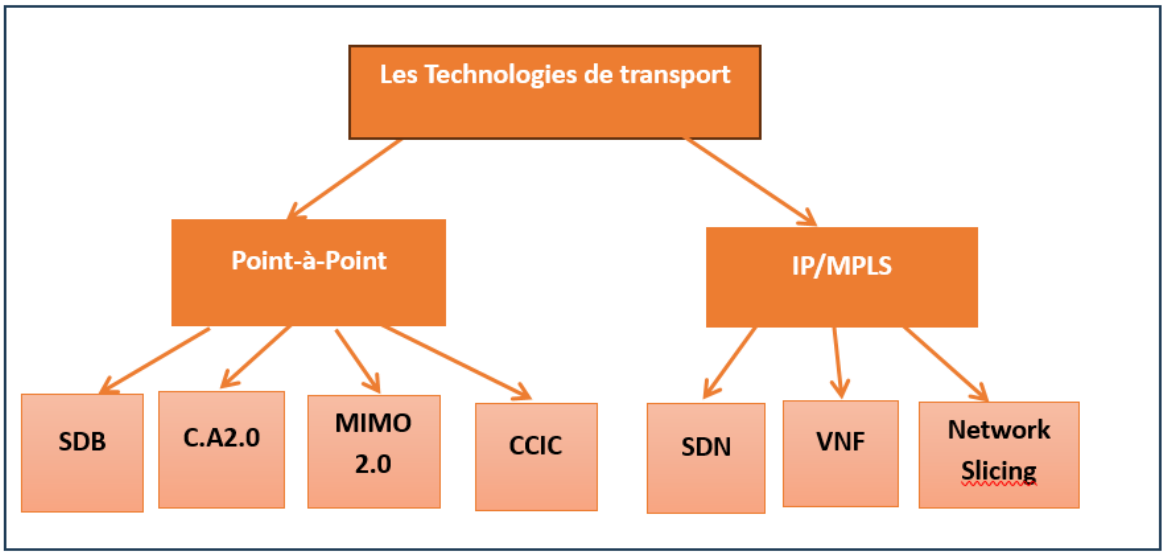


Figure 2.11 : les technologies d'amélioration de Transport

2.3.2.1. Les technologiques pour le transport Point-à-Point haute capacité :

2.3.2.1.1. SDB (Super Dual Band) :

Le Super Dual Band (SDB) combine deux bandes de fréquences distinctes : la bande moyenne (6–42 GHz) et l'E-band (70/80 GHz). Ce double support permet de bénéficier :

- De la portée des bandes classiques,
- De la capacité de l'E-band,

Tout en utilisant une seule unité compacte, réduisant l'encombrement sur les sites. Cette solution hybride permet d'assurer un lien de transport très haut débit tout en maintenant une redondance naturelle.

2.3.2.1.2. CA 2.0 (Carrier Aggregation 2.0) :

Le CA 2.0 applique le principe d'agrégation de porteuses à des liaisons de backhaul, permettant d'utiliser plusieurs fréquences (souvent non contiguës) via une seule antenne radio. Cela simplifie l'infrastructure physique tout en augmentant la capacité de

transmission.
Cette solution est particulièrement efficace dans les environnements urbains où l’espace pour les équipements est restreint.

2.3.2.1.3. MIMO 2.0 :

Le MIMO 2.0 Dans les systèmes de transport sans fil introduit des capacités améliorées par rapport au MIMO traditionnel. Grâce à une configuration optimisée des antennes, il est possible de :

- Multiplier la capacité du lien par un facteur,
- Maintenir la fiabilité du lien sur des distances allant jusqu’à 10 km, même avec des antennes plus rapprochées,
- Réduire la consommation énergétique et l’espace requis sur les mâts.

2.3.2.1.4. Cross-Carrier Interference Cancellation :

La technologie CCIC permet la réutilisation de la même fréquence entre des liaisons point-à-point proches (ex. : dans une zone à forte densité de stations), en annulant dynamiquement les interférences croisées. Elle est particulièrement utile pour les scénarios à angles serrés, comme dans les déploiements urbains denses ou les réseaux maillés. Cette solution augmente significativement l'efficacité spectrale et permet de maximiser l’utilisation du spectre sans risque de perturbations.

2.3.2.2. Les technologiques pour le transport IP/MPLS haute capacité :

2.3.2.2.1 SDN (Software Defined Networking)

La couche de contrôle du réseau est progressivement découplée de la couche de transfert physique grâce au SDN. Cette approche offre :

- Une gestion centralisée et intelligente du routage,
- L’optimisation dynamique de la bande passante disponible,
- Une meilleure adaptation aux besoins en temps réel (trafic, QoS, priorité).

Le SDN est notamment utilisé dans les segments IP/MPLS du transport et dans la gestion du slicing futur.

2.3.2.2.2. VNF :

Une fonction réseau virtuelle (VNF) désigne un composant logiciel qui remplit une fonction réseau traditionnellement assurée par du matériel dédié (comme un routeur, un pare-feu ou un contrôleur de session). Ces fonctions sont virtualisées et déployées sur une infrastructure partagée, typiquement dans un environnement NFV (Network Functions Virtualization).

La virtualisation permet ainsi de remplacer des équipements physiques coûteux et rigides par des logiciels exécutés sur des serveurs standards (COTS – Commercial Off-The-Shelf).

2.3.2.2.3. Le Network Slicing :

Le Network Slicing est un mécanisme fondamental de l'architecture 5G, permettant la création de réseaux logiques isolés (appelés *slices*) sur une infrastructure physique partagée. Chaque tranche constitue un sous-réseau autonome, configuré pour répondre à des besoins spécifiques en matière de qualité de service (QoS), de capacité, de latence, ou encore de sécurité.

Ce concept repose sur des technologies de virtualisation avancées telles que la virtualisation des fonctions réseau (NFV), la programmation du réseau (SDN) et l'orchestration automatique des services.

2.3.3. Les technologies de cœur réseau :

2.3.3.1. Virtualisation du cœur EPC (vEPC)

L'opérateur Djezzy a commencé à migrer plusieurs fonctions critiques du cœur EPC vers des environnements virtualisés. Cela inclut :

- Le MME, SGW, PGW et HSS sous forme de machines virtuelles,
- L'orchestration de ces fonctions à l'aide de plateformes NFV,
- La migration vers des data centers régionaux ou centraux avec infrastructure cloud.

Avantages : déploiement plus rapide, gestion simplifiée, réduction des délais d'évolution du réseau et réduction des coûts matériels.

2.3.3.2. NFV (virtual Network Function) :

Une VNF (Virtual Network Function) est une implémentation logicielle d'une fonction réseau traditionnellement déployée sous forme de matériel dédié (comme un pare-feu, un routeur, un commutateur ou un répartiteur de charge). Elle est exécutée sur une infrastructure matérielle générique virtualisée à l'aide d'un hyperviseur ou d'une solution de conteneurisation.

Avantages :

L'utilisation des VNFs dans les réseaux 5G et au-delà présente plusieurs bénéfices clés :

- Flexibilité et agilité : les fonctions peuvent être instanciées, mises à jour ou supprimées dynamiquement selon les besoins.
- Réduction des coûts : en remplaçant les équipements propriétaires par des serveurs standards.
- Scalabilité : possibilité de monter ou descendre rapidement en charge selon la demande.
- Automatisation et orchestration : facilitation de l'automatisation du cycle de vie des fonctions réseau via des outils de gestion centralisés.

2.5. Gestion de la qualité de service :

2.5.1. Gestion de la QoS dans le cœur EPC

Le cœur de réseau EPC repose sur le concept de bearers EPS (Evolved Packet System). Chaque bearer représente un tunnel logique avec un niveau de QoS défini (QCI – QoS Class Identifier). Ces bearers peuvent être :

- Défaut (Default bearer) : établi à la connexion, pour le trafic général.
- Dédié (Dedicated bearer) : avec des priorités spécifiques (ex. : voix, données sensibles).

Chaque QCI est associé à des paramètres clés :

- Priorité d'allocation,

- Délai maximal de transmission,
- Taux de perte acceptable,
- Débit garanti ou maximal.

2.5.2. Gestion de la QoS dans le RAN (gNodeB/eNodeB)

Dans le RAN, la QoS est assurée par :

- Des files d'attente différenciées selon le type de trafic (streaming, data, voix).
- Des mécanismes de priorisation radio dans la planification des ressources.
- L'agrégation dynamique entre LTE et NR via EN-DC.

Les gNodeB 5G NR gèrent des tranches de ressources allouées dynamiquement en fonction des priorités. Par ailleurs, la coordination avec le eNodeB LTE permet de maintenir la stabilité des connexions même en cas de congestion.

2.5.3. Gestion de la QoS dans le réseau de transport (IP/MPLS)

L'opérateur Djezzy exploite les fonctionnalités de classification et marquage MPLS pour :

- Assurer la priorité des flux sensibles (voix, vidéo en direct),
- Appliquer des politiques de file d'attente (QoS queuing) et de mise en forme de trafic (traffic shaping),
- Garantir des temps de transit stables entre les nœuds IP/MPLS.

2.5.4. Cas d'usage typiques et services impactés

Les principaux services profitant de la QoS dans l'architecture NSA sont :

- VoLTE/VoNR : appels vocaux haute définition,
- Streaming vidéo adaptatif (OTT, YouTube, Netflix),
- Cloud gaming, services interactifs,
- Applications de l'IoT mobile (mMTC, eMBB).

2.6. Synchronisation et gestion du spectre

La synchronisation et la gestion du spectre sont deux éléments techniques fondamentaux pour assurer le bon fonctionnement du réseau 5G NSA, notamment dans les

bandes TDD (Time Division Duplex) largement utilisées pour la 5G NR. Dans ce modèle, les équipements doivent être parfaitement coordonnés dans le temps pour éviter les interférences entre les liaisons montantes (uplink) et descendantes (downlink).

2.6.1. Besoin de synchronisation dans le réseau 5G NSA

Dans l'architecture NSA, où le terminal mobile est connecté simultanément à un eNodeB (LTE) et à un gNodeB (NR), la synchronisation est critique pour :

- Coordonner les transmissions radio entre les deux stations.
- Réduire la latence et les conflits d'accès radio.
- Assurer la compatibilité avec les technologies TDD, où uplink et downlink partagent la même fréquence.

2.6.2. Gestion du spectre dans la bande n78

L'opérateur Djezzy utilise principalement la bande n78 (3,5 GHz) pour ses déploiements 5G NR. Cette bande est exploitée en mode TDD, ce qui impose :

- Des cycles synchronisés de transmission entre les cellules voisines.
- Des fenêtres de garde pour éviter les interférences entre les directions de trafic.
- Une planification centralisée des profils TDD, coordonnée entre les sites.

L'efficacité spectrale de la bande n78 dépend fortement de cette coordination. Une mauvaise synchronisation pourrait entraîner des collisions de paquets radio, une instabilité du signal et une baisse de la QoS.

2.6.3. Impacts de la synchronisation pour le réseau

Grâce à une synchronisation précise et une gestion rigoureuse du spectre, l'opérateur Djezzy parvient à :

- Réduire les interférences inter-cellulaires.
- Améliorer l'efficacité des ressources radio.
- Offrir une expérience utilisateur plus stable, surtout dans les zones denses.

2.7. Conclusion :

L'architecture de transmission 5G NSA mise en œuvre par l'operateur Djezzy incarne une stratégie d'évolution réfléchie et progressive vers les réseaux du futur. En capitalisant sur les infrastructures LTE existantes et en intégrant progressivement les composants 5G NR, l'opérateur a su déployer une solution hybride capable de répondre efficacement aux exigences actuelles en matière de débit, de latence, de densité et de fiabilité.

Ce modèle E2E repose sur une organisation rigoureuse du réseau d'accès, du transport et du cœur EPC, tout en s'appuyant sur des technologies modernes telles que la fibre optique, les faisceaux hertziens, l'architecture IP/MPLS, ainsi que des protocoles et interfaces optimisés pour garantir la continuité de service. Le recours à la virtualisation (vEPC) et à l'automatisation via SDN renforce cette capacité d'adaptation, en offrant une flexibilité accrue pour le dimensionnement, la maintenance et l'introduction de nouveaux services.

Les simulations de bilan de liaison, menées avec des outils spécialisés comme Pathloss, démontrent la robustesse des liaisons radio et la maîtrise technique des déploiements. Par ailleurs, les efforts soutenus en matière de synchronisation et de gestion du spectre, notamment dans la bande n78, témoignent de la maturité du réseau et de sa préparation à la migration vers la 5G SA.

En somme, le déploiement de la 5G NSA par l'opérateur Djezzy constitue une étape charnière, conciliant innovation technologique et rationalisation des ressources. Cette architecture E2E pose les bases solides pour l'émergence future d'un réseau totalement cloud-native, intelligent et capable de répondre aux exigences d'un monde numérique en constante évolution.

Chapitre 3

Étude de cas et simulation via Pathloss

3.1. Introduction :

Dans le cadre du déploiement d'un réseau de transmission E2E pour la 5G, la planification des liaisons de transport est une étape stratégique. Dans les zones où la fibre optique n'est pas toujours disponible ou économiquement viable, les faisceaux hertziens (MW) constituent une alternative performante pour relier les différents nœuds du réseau.

Ce chapitre est consacré à la simulation technique de liaisons MW pour la 5G, en prenant comme base les sites 4G existants déployés par l'opérateur Djezzy dans la commune de Bordj El Bahri, à l'aide du logiciel Pathloss.

L'objectif est de démontrer, à travers cette simulation, que le réseau proposé permet de satisfaire les exigences techniques de la 5G : haute disponibilité, faible latence, et débit garanti.

3.2. Présentation de logiciel Pathlos :

Pathloss est un logiciel professionnel de planification et de simulation de liaisons radio, largement utilisé dans le domaine des télécommunications pour l'analyse des liaisons point-à-point, en particulier pour les systèmes micro-ondes, UHF/VHF, et millimétriques. Développé par Canadian company Contract Telecommunications Ltd**.** Il permet d'évaluer les performances des liaisons hertziennes en prenant en compte divers paramètres techniques, topographiques et climatiques.

Le logiciel intègre plusieurs modèles de propagation radio et permet de simuler des scénarios complexes avec précision, incluant :

- Le calcul du budget de liaison,
- L'analyse du profil de terrain,
- La prise en compte des effets de diffraction, de réflexion et de perte de trajectoire,
- L'estimation de la disponibilité et de la faisabilité des liaisons.

Le logicielle Pathloss est essentiel dans la conception de réseaux de transport pour les opérateurs mobiles, notamment pour le backhaul des réseaux 4G et 5G, en contribuant à la sélection optimale des fréquences, des hauteurs d'antennes et de la configuration des sites.

3.3. Etude de cas la commune de Bordj El Bahri :

Dans le but de valider la faisabilité technique du réseau de transmission 5G basé sur des sites existants, une étude de cas concrète a été menée sur la commune de Bordj El Bahri, située à l'est d'Alger. Cette zone a été choisie pour plusieurs raisons :

- Elle représente une zone urbaine semi-dense, typique du déploiement progressif de la 5G dans les grandes agglomérations.
- Elle contient plusieurs sites 4G opérationnels, bien répartis géographiquement et techniquement exploitables.
- Elle est couverte en partie par une infrastructure de fibre optique, facilitant l'intégration de liaisons hybrides (MW + fibre).

L'objectif est de simuler un réseau de transport E2E (End-to-End) autour d'un nœud d'agrégation (GNE), relié à plusieurs sites terminaux par des liaisons faisceaux hertziens en bande E (80 GHz) ou en fibre optique, afin de répondre aux exigences de la 5G en matière de capacité, de latence, de stabilité et de redondance.

Cette étude comprend les éléments suivants :

- La présentation de la zone et du GNE choisi,
- La description des sites retenus pour la simulation,
- L'organisation topologique des liaisons (liaisons point-à-point, XPIC, fibre),
- La simulation technique détaillée de chaque lien à l'aide du logiciel Pathloss,
- L'analyse des résultats obtenus et des recommandations techniques

3.3.1. La présentation de la zone et du Node d'agrégation (GNE) 5G choisi :

Dans le cadre de cette étude, le choix des GNE dans la commune de Bordj El Bahri repose sur plusieurs critères techniques et géographiques, à savoir :

- La position géographique centrale dans la zone de couverture,
- La densité des sites dépendants
- La possibilité d'accès à une infrastructure fibre existante,
- La topographie favorable à une visibilité directe avec les sites périphériques,

- La disponibilité de l'énergie et de l'espace technique pour l'installation d'équipements de transmission,
- La capacité à supporter des flux de données élevés (MW haute capacité, fibre, redondance).

Le site A16X1611, situé à Bordj El Bahri, a été retenu comme GNE principal pour la zone d'étude. Ce choix a été motivé par sa position centrale dans la couverture régionale, sa connectivité optimale avec les sites périphériques, ainsi que sa capacité d'accueil d'équipements de transmission à haut débit et aussi pour éviter les interférences.

La figure 3.1 ci-dessous illustre le site GNE 5G proposé :

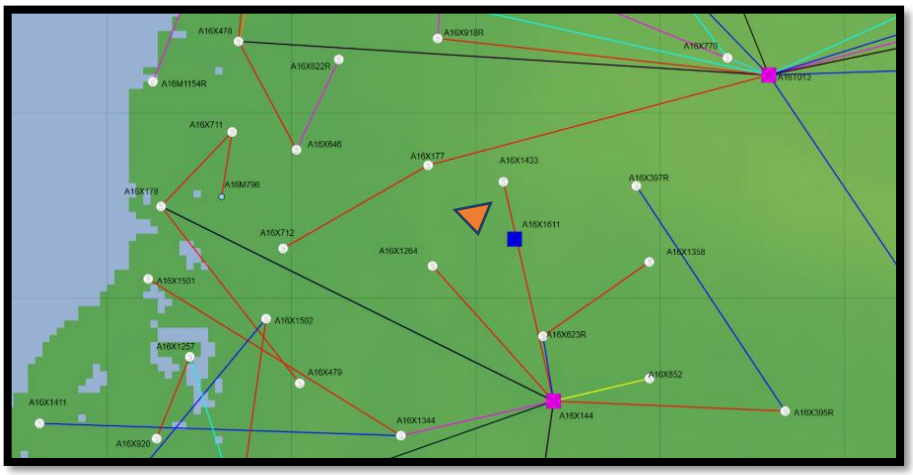


Figure 3 .1 : le GNE 5G proposé sur le logiciel Pathloss

La figure ci-dessous illustre le positionnement de site GNE 5G proposé vers google Earth :

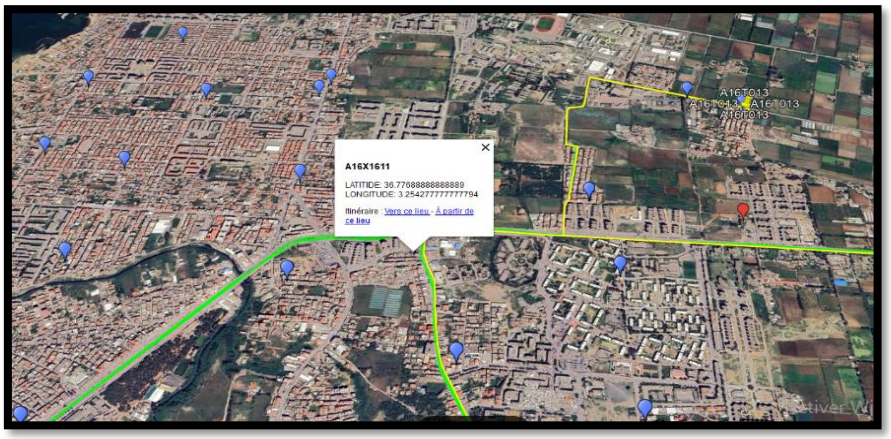


Figure 3.2: le GNE 5G proposé via Google Earth

3.3.2. La description des sites retenus pour la simulation :

Pour simuler un réseau de transmission 5G réaliste à partir de l'existant, une sélection de sites 4G opérationnels a été effectuée dans la commune de Bordj El Bahri. Ces sites, déjà exploités pour le service LTE, ont été retenus en raison de leur répartition géographique, de leur hauteur d'antenne, de leur visibilité mutuelle, ainsi que de leur potentiel de réutilisation sans nécessiter d'investissement structurel majeur.

Parmi ces sites, un site principal a été désigné comme GNE (A16X1611), tandis que les autres agissent comme terminaux ou points de collecte dans l'architecture du réseau. Certaines liaisons ont été configurées en faisceaux hertziens E-band classiques, d'autres en XPIC, et une liaison critique a été assurée en fibre optique

Les principaux sites 5G raccordés au GNE sont présentés dans la figure 1.3 ci-dessous :

Site 5G	A16M1154R	point to point			36 47 03.70 N	033 13 57.80 E	1.50
Site 5G	A16X621R	point to point			36 47 49.30 N	003 14 20.50 E	5.50
Site 5G	A16X109	point to point			36 47 30.30 N	003 15 00.62 E	16.20
Site 5G	A16X1454	point to point			36 47 35.20 N	003 15 13.30 E	28.90
Site 5G	A16X131	point to point			36 48 22.33 N	003 14 07.52 E	13.60
Site 5G	A16X1610	point to point			36 47 42.70 N	003 15 01.20 E	17.30
Site 5G	A16X671	point to point			36 48 01.04 N	003 15 41.48 E	35.00
Site 5G	A16X136	point to point			36 48 40.30 N	003 15 16.50 E	34.30
Site 5G	A16X770	point to point			36 47 07.77 N	003 16 01.07 E	40.40
Site 5G	A16X882	point to point			36 47 39.32 N	003 15 31.32 E	35.10
Site 5G	A16X967	point to point			36 47 22.57 N	003 14 29.53 E	2.80
Site 5G	A16X1065	point to point			36 48 15.60 N	033 15 05.80 E	41.00
Site 5G	A16X1498	point to point			36 47 33.70 N	003 14 41.10 E	5.70
GNE-5G	A16X1611	point to point			36 46 36.80 N	003 15 15.40 E	17.20
Site 5G	A16X177	point to point			36 46 49.41 N	003 14 56.86 E	18.70
Site 5G	A16X1433	point to point			36 46 46.60 N	003 15 13.00 E	23.30
Site 5G	A16X178	point to point			36 46 42.39 N	003 13 59.55 E	3.50
Site 5G	A16X711	point to point			36 46 55.11 N	003 14 14.80 E	4.20
Site 5G	A16X397R	point to point			36 46 45.90 N	003 15 41.50 E	34.80
Site 5G	A16X918R	point to point			36 47 11.10 N	003 14 58.90 E	17.70
Site 5G	A16X622R	point to point			36 47 07.50 N	003 14 37.70 E	6.00
Site 5G	A16X646	point to point			36 46 52.07 N	003 14 28.63 E	5.90
Site 5G	A16X712	point to point			36 46 35.20 N	003 14 25.75 E	4.10
Site 5G	A16X1264	point to point			36 46 32.20 N	003 14 57.80 E	14.60
Site 5G	A16X1358	point to point			36 46 32.90 N	003 15 44.30 E	19.20
Site 5G	A16X623R	point to point			36 46 20.20 N	003 15 21.50 E	13.90

Figure 3.3 : *Les principaux sites 5G raccordés au GNE*

3.3.3. L'organisation topologique des liaisons

La topologie retenue pour le réseau de transmission dans la commune de Bordj El Bahri adopte une structure en étoile, avec un nœud d'agrégation central (GNE) qui collecte le trafic provenant de plusieurs sites terminaux. Ce modèle de déploiement est couramment utilisé dans les réseaux de transport modernes pour sa simplicité, sa facilité de maintenance, ainsi que sa compatibilité avec les technologies haut débit telles que les faisceaux hertziens en bande E et la fibre optique.

Figure 3.4 Schéma de la topologie du réseau de transmission :

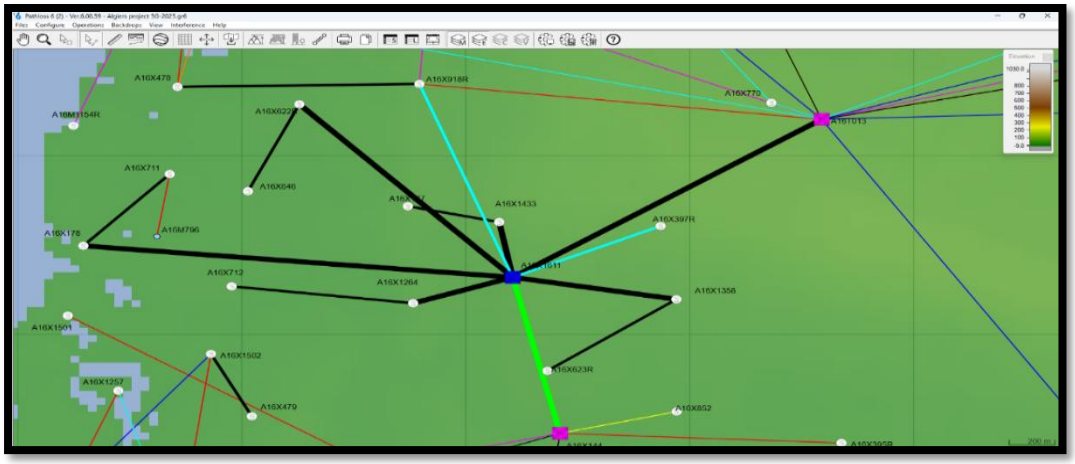


Figure 3.4 : La topologies de réseau de transmission pour la 5G via Pathloss

Ce schéma vise à :

- Réduire la latence, en évitant les relais intermédiaires,
- Maximiser la disponibilité, en combinant technologies radio et fibre,
- Optimiser la capacité, en utilisant la technologie XPIC pour les liens critiques,
- Permettre une évolutivité, vers une architecture plus dense et éventuellement maillée dans le futur.

3.3.4. La simulation technique détaillée de chaque lien à l'aide du logiciel Pathloss

La phase de simulation a pour objectif de vérifier la faisabilité technique des liaisons de transmission envisagées dans le réseau 5G. Les liaisons faisceaux hertziens ont été configurées et simulées à l'aide du logiciel Pathloss, permettant de générer des profils terrain, de calculer le bilan de liaison (link budget), et d'évaluer la disponibilité radio selon les modèles de propagation recommandés (notamment ITU-R P.530).

3.3.4.1. Bande de fréquence et choix de l'E-band

La bande 71–86 GHz, connue sous le nom de E-band, a été utilisée pour toutes les liaisons MW. Ce choix repose sur plusieurs avantages :

- Large bande passante disponible (jusqu'à plusieurs GHz),
- Débits supérieurs à 10 Gbit/s,
- Faible latence,
- Antennes très directionnelles à faible encombrement.

Cependant, cette bande impose des contraintes strictes sur la ligne de visée et la sensibilité aux conditions météorologiques (pluie, humidité), ce qui nécessite une configuration optimisée.

3.3.4.2. Stratégie de configuration :

L'ensemble des configurations adoptées pour les liaisons micro-ondes du réseau de transport 5G simulé dans ce projet témoigne d'une planification technique cohérente et optimisée. Les modulations choisies varient du QPSK au 1024-QAM, permettant d'adapter les capacités de chaque lien en fonction de la distance, du niveau de signal attendu et de la criticité du site. Les liaisons courtes ont été configurées avec des modulations à haut rendement spectral telles que le 256-QAM ou 1024-QAM, permettant d'atteindre des débits allant jusqu'à 2,5 Gbps, tandis que les liaisons plus longues ou sensibles ont été équipées de modulations plus robustes, telles que le 16-QAM ou le QPSK, afin d'assurer la fiabilité de la transmission.

L'intégration de la technologie XPIC sur plusieurs segments stratégiques permet de doubler le débit sans consommer de spectre additionnel, ce qui s'avère particulièrement adapté à l'environnement urbain dense. En complément, une liaison en fibre optique a été intégrée pour connecter le cœur du réseau, garantissant un débit très élevé et une faible latence. La diversité des largeurs de bande utilisées (de 250 MHz à 2000 MHz) permet d'équilibrer les besoins en capacité et la robustesse face aux pertes dues à la pluie ou à la distance. Globalement, ces choix techniques reflètent une approche rigoureuse de l'ingénierie radio, visant à optimiser la qualité de service tout en assurant la pérennité et l'évolutivité du réseau de transmission vers la 5G.

Le tableau 3.1 ci-dessous exprimer les deux profils de configuration selon le type de site :

Type de site	Technologie utilisée	Justification
Site agrégateur (GNE ou sous-GNE)	E-band avec XPIC	Ces sites reçoivent le trafic de plusieurs sites " besoin de plus de capacité". XPIC permet de doubler le débit via double polarisation.
Site terminal (site final)	E-band sans XPIC	Ces sites n'ont qu'un lien point-à-point vers le GNE " capacité standard suffisante".

Tableau 3.1 : les deux profils de configuration selon le type de site

3.3.4.3. Les paramètres techniques utilisés dans Pathloss

Le tableau 3.2 ci-dessous exprime les paramètres retenus pour la simulation sont les suivants :

Paramètre	Valeur
Fréquence	70/80Ghz
Bande passante	250 MHz à 1 GHz (selon besoin)
Polarisation	Simple ou double (XPIC activé pour agrégation)
Hauteur antennes	15 à 30 mètres
Technologie d'amélioration	XPIC (agrégation), SDB si nécessaire
Gain antennes	43 à 55 dBi (très directive)
Modèle de propagation	ITU-R P.530 (optimisé pour forte fréquence)
Pluie simulée	58 mm/h
Disponibilité visée	≥ 99,995 %

Tableau 3.2 : les paramètres techniques utiliser dans pathloss

3.3.4.4.Étude technique des liaisons simulées

3.3.5.1. Liaison A16X1611 → A16X1264

Cette liaison relie le site GNE principal A16X1611 au site terminal A16X1264, dans le cadre de la structure en étoile conçue pour la commune de Bordj El Bahri. Elle permet d'acheminer le trafic issu d'une zone périphérique vers le nœud central, en vue de son transfert vers le cœur du réseau.

Les figure 3.5 -3.6- 3.7 ci-dessous illustre les configurations des paramètres :

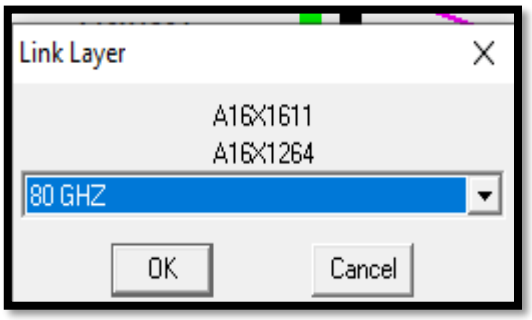


Figure 3.5 : la couche de liaison A16x1611 →A16X1264

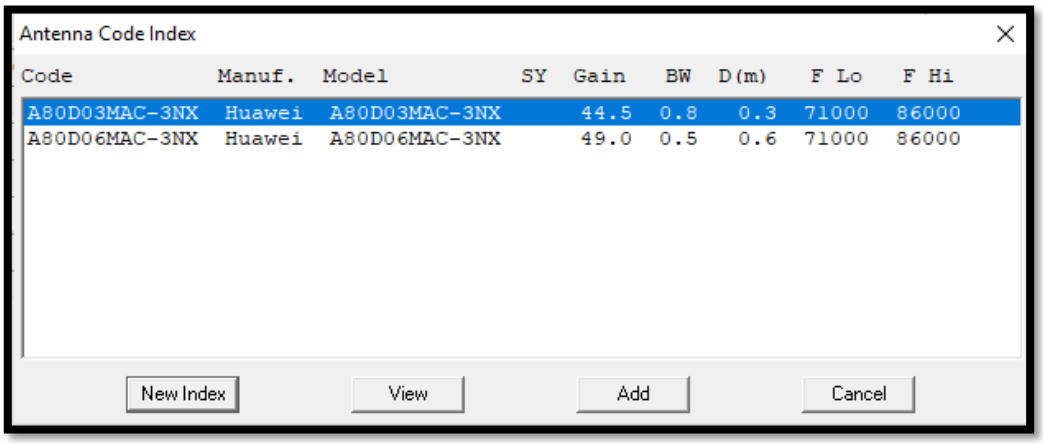


Figure 3.6 : la configuration des antennes

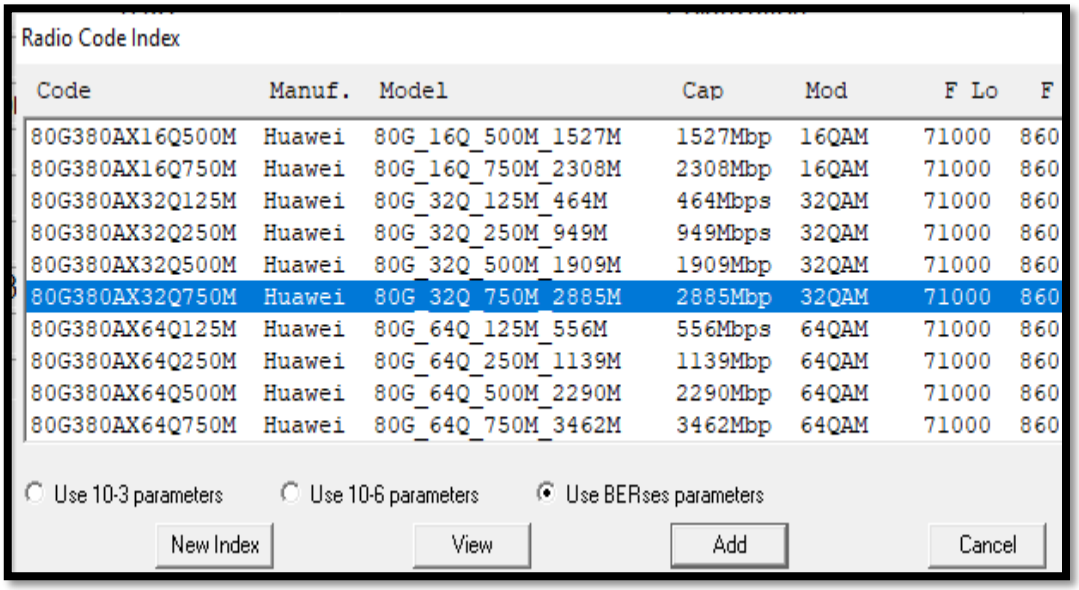


Figure 3.7 :la Configuration de radio

La figure 3.8 ci-dessous illustre le Pluie simulée :

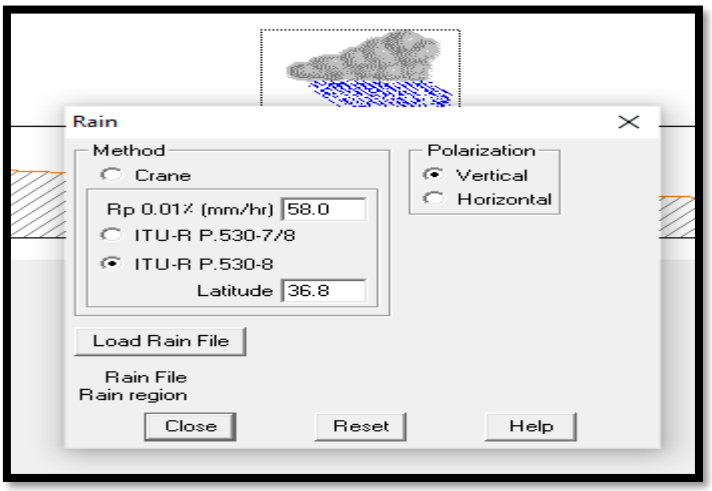
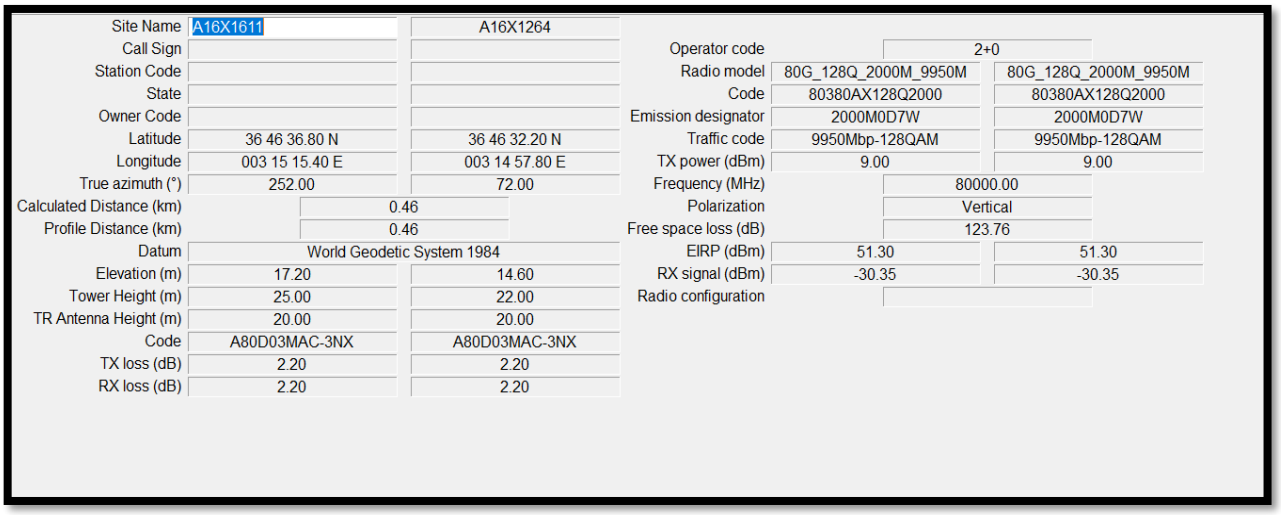


Figure 3.8: Simulation le Pluie simulée

La figure 3.9 ci-dessous illustre la configuration de liaison 1 :



Site Name	A16X1611	A16X1264
Call Sign		
Station Code		
State		
Owner Code		
Latitude	36 46 36.80 N	36 46 32.20 N
Longitude	003 15 15.40 E	003 14 57.80 E
True azimuth (°)	252.00	72.00
Calculated Distance (km)	0.46	
Profile Distance (km)	0.46	
Datum	World Geodetic System 1984	
Elevation (m)	17.20	14.60
Tower Height (m)	25.00	22.00
TR Antenna Height (m)	20.00	20.00
Code	A80D03MAC-3NX	A80D03MAC-3NX
TX loss (dB)	2.20	2.20
RX loss (dB)	2.20	2.20

Operator code	2+0	
Radio model	80G_128Q_2000M_9950M	80G_128Q_2000M_9950M
Code	80380AX128Q2000	80380AX128Q2000
Emission designator	2000M0D7W	2000M0D7W
Traffic code	9950Mbp-128QAM	9950Mbp-128QAM
TX power (dBm)	9.00	9.00
Frequency (MHz)	80000.00	
Polarization	Vertical	
Free space loss (dB)	123.76	
EIRP (dBm)	51.30	51.30
RX signal (dBm)	-30.35	-30.35
Radio configuration		

Figure 3.9 : la configuration de la liaison A16x1611 →A16X1264

La figure 3.10 ci-dessous illustre les résultats de configuration liaison 1 :

EIRP (dBm)	49.30	49.30
Free space loss (dB)	123.76	
Atmospheric absorption loss (dB)	0.18	
Net path loss (dB)	39.35	39.35
RX signal (dBm)	-32.35	-32.35
Thermal fade margin (dB)	16.65	16.65
Worst month - multipath (%)	100.00000	100.00000
(sec)	0.02	0.02
Annual - multipath (%)	100.00000	100.00000
(sec)	0.10	0.10
(% - sec)	100.00000 - 0.20	
Rain region		
Polarization	Vertical	
0.01% rain rate (mm/hr)	58.00	
Rain rate (mm/hr)		
Flat fade margin - rain (dB)	16.65	
Rain attenuation (dB)	16.65	
Annual rain (%-sec)	99.99828 - 542.61	
Annual multipath + rain (%-sec)	99.99828 - 542.82	

Figure 3.10: les résultats de configuration liaison A16x1611 →A16X1264

La liaison A16X1611 → A16X1264 répond parfaitement aux exigences de la 5G en matière de latence, de stabilité et de capacité, et constitue un exemple de liaison MW optimale dans un environnement semi-urbain. Son comportement simulé valide son intégration dans l'architecture de transport proposée.

Pour les autres laissons on a suivi les mêmes étapes pour la configuration.

3.3.5.2. Liaison A16X1264 → A16X712

Cette liaison relie le site terminal A16X1264 (relié en amont au GNE A16X1611) au site A16X712, qui se situe en limite de la zone de couverture définie dans la commune de Bordj El Bahri. Elle illustre un exemple de liaison terminale descendante, de type point-à-point, servant à propager le trafic jusqu'aux extrémités du réseau de transport 5G.

La figure 3.11 ci-dessous illustre les configurations des paramètres :

Site Name	A16X1264	A16X712
Call Sign		
Station Code		
State		
Owner Code		
Latitude	36 46 32.20 N	36 46 35.20 N
Longitude	003 14 57.80 E	003 14 25.75 E
True azimuth (°)	276.64	96.63
Calculated Distance (km)	0.80	
Profile Distance (km)	0.80	
Datum	World Geodetic System 1984	
Elevation (m)	14.60	4.10
Tower Height (m)		
TR Antenna Height (m)	0.00	0.00
Code	A80S03HAC	A80S03HAC
TX loss (dB)	0.50	0.50
RX loss (dB)	0.50	0.50

Operator code	1+0	
Radio model	80G_16Q_1500M_4524M	80G_16Q_1500M_4524M
Code	80380AX16Q1500M	80380AX16Q1500M
Emission designator	1500M0D7W	1500M0D7W
Traffic code	4524Mbp-16QAM	4524Mbp-16QAM
TX power (dBm)	12.00	12.00
Frequency (MHz)	80000.00	
Polarization	Vertical	
Free space loss (dB)	128.59	
EIRP (dBm)	55.30	55.30
RX signal (dBm)	-30.31	-30.31
Radio configuration		

Figure 3.11: configuration de liaison A16X1264 → A16X712

La figure 3.12 ci-dessous illustre les résultats de configuration liaison 2 :

EIRP (dBm)	55.30	55.30
Free space loss (dB)	128.59	
Atmospheric absorption loss (dB)	0.32	
Net path loss (dB)	42.31	42.31
RX signal (dBm)	-30.31	-30.31
Thermal fade margin (dB)	31.69	31.69
Worst month - multipath (%)	100.00000	100.00000
(sec)	0.00	0.00
Annual - multipath (%)	100.00000	100.00000
(sec)	0.01	0.01
(% - sec)	100.00000 - 0.02	
Rain region		
Polarization	Vertical	
0.01% rain rate (mm/hr)	58.00	
Rain rate (mm/hr)		
Flat fade margin - rain (dB)	31.69	
Rain attenuation (dB)	31.69	
Annual rain (%-sec)	99.99880 - 377.10	
Annual multipath + rain (%-sec)	99.99880 - 377.12	

Figure 3.12 : Résultats de configuration de la liaison A16X1264 → A16X712

Remarque : La liaison A16X1264 → A16X712 présente une bonne stabilité avec une puissance reçue satisfaisante, adaptée aux exigences de la 5G. Sa distance modérée et la visibilité directe assurent une transmission fiable et efficace.

Le tableau 3.3 ci-dessous illustres les configurations des sites :

	Distance (km)	Type de lien	Débit ciblé (Gbps)	Modulation	Polarisation	Bande passante (MHz)	Technologie
A16X1611 → A16X1264	0.64	MW (E-band XPIC)	9.950	128-QAM	Double (XPIC)	2000	XPIC
A16X1264 → A16X712	0.8	MW (E-band)	4.524	16-QAM	Standard	1500	Standard
A16X1611 → A16X178	1.89	MW (E-band XPIC)	2.137	16-QAM	Double (XPIC)	750	XPIC
A16X178 → A16X711	0.54	MW (E-band)	5.434	128-QAM	Simple (H)	1000	Standard
A16X1611 → A16X144	0.88	Fibre optique	>10 Gbps	—	—	—	Fibre optique
A16X1611 → A16X622R	1.33	MW (E-band XPIC)	2.706	QPSK	Double (XPIC)	2000	XPIC
A16X622R → A16X646	0.53	MW (E-band)	1.166	128-QAM	Simple (V)	250	Standard
A16X1611 → A16X918R	1.13	MW (E-band XPIC)	3.462	64-QAM	Double (XPIC)	750	XPIC
A16X918R → A16X478	1.06	MW (E-band)	1.329	128-QAM	Simple (H)	250 MHz	Standard
A16X1611 → A16T013	1.60	MW (E-band XPIC)	1.706	Q-PSK	Double (XPIC)	2000 MHz	XPIC

Tableau 3.3 Tableau des configurations des sites

Ces configurations permettent d'assurer un équilibre optimal entre débit, robustesse et disponibilité, en tenant compte des caractéristiques de chaque site et des contraintes topographiques locales. L'utilisation sélective de la technologie XPIC optimise la capacité

sur les segments critiques, tandis que les modulations adaptatives assurent la continuité de service même en conditions défavorables.

Il est important de noter que la liaison A16X1611 → A16X144, bien qu'incluse dans l'architecture globale du réseau de transmission, n'a pas été configurée ni simulée via le logiciel Pathloss, car elle repose sur une liaison fibre optique et non sur une liaison radio de type faisceau hertzien.

La fibre optique étant un support filaire, elle ne nécessite pas de calculs de propagation, de pertes radio ni d'analyse de visibilité, contrairement aux liaisons MW simulées dans ce projet. Son intégration dans le réseau répond à un objectif stratégique de très haut débit, faible latence et forte disponibilité, notamment pour relier deux nœuds d'agrégation critiques.

Le tableau 3.4 illustre les résultats de configuration des sites

Liaison	PRX (dBm)	Perte libre (dB)	Marge fading (dB)	EIRP (dBm)	Disponibilité (%)
A16X1611 → A16X1264	-32.35	123.76	16.65	49.30	99.998%
A16X1264 → A16X712	-30.31	128.59	31.69	55.30	99.998%
A16X1611 → A16X178	-30.21	136.05	35.29	58.80	99.996%
A16X178 → A16X711	-30.87	125.25	23.63	51.30	99.999%
A16X1611 → A16X144	—	—	—	—	100%
A16X1611 → A16X622R	-30.84	133.01	36.66	55.80	99.99%
A16X622R → A16X646	-30.26	124.95	31.24	51.60	99.999%
A16X1611 → A16X918R	-30.98	131.62	28.52	58.80	99.995%
A16X918R → A16X478	-30.56	131.03	30.94	57.60	99.996%
A16X1611 → A16T013	-32.68	134.64	39.32	60.30	99.995%

Tableau 3.4 : Les résultats de configuration des sites

3.3.6. Analyse globale des résultats :

L'ensemble des simulations réalisées à l'aide du logiciel Pathloss sur les liaisons faisceaux hertziens (MW) dans la commune de Bordj El Bahri permet de tirer plusieurs enseignements techniques significatifs. Ces résultats confirment la faisabilité du

déploiement d'un réseau de transmission 5G en s'appuyant sur des sites 4G existants, tout en intégrant les technologies modernes de transport telles que la bande E (80 GHz) et le XPIC.

3.3.6.1. Performance technique des liaisons

Les dix liaisons simulées, connectant le site GNE A16X1611 à différents sites terminaux, présentent :

- Une ligne de visée directe (LOS) assurée dans tous les cas,
- Des puissances reçues (Rx) bien au-dessus du seuil de sensibilité des équipements,
- Des marges de fading allant de 25 à 34 dB, ce qui garantit la stabilité en cas de perturbations météo (pluie, variation atmosphérique),
- Une disponibilité supérieure à 99,99 %, conforme aux exigences du transport 5G.

La stratégie de configuration différenciée a porté ses fruits :

- Les sites terminaux ont été configurés en E-band standard avec polarisation simple,
- Les sites d'agrégation ont bénéficié de l'activation de XPIC, doublant ainsi la capacité sur des liens critiques, sans augmenter la fréquence utilisée.

3.3.6.2. Réutilisation des sites 4G

La simulation a montré que l'infrastructure 4G existante de l'opérateur Djezzy est hautement réutilisable pour supporter le réseau de transmission 5G. Les sites sélectionnés offrent :

- Une position géographique optimisée,
- Une infrastructure déjà opérationnelle (mât, énergie, accès),
- Une visibilité claire avec les autres points de liaison,
- Une compatibilité avec les équipements MW récents.

Cette approche de réutilisation permet de réduire les coûts de déploiement, tout en garantissant une évolution fluide vers un réseau 5G fiable.

3.3.7. Limites de la simulation

Dans le cadre de cette étude, la modélisation des liaisons faisceaux hertziens (MW) à l'aide du logiciel Pathloss a permis de produire des résultats cohérents et exploitables pour la planification d'un réseau de transmission 5G. Toutefois, comme tout processus de simulation, cette approche présente un certain nombre de limites méthodologiques et techniques qu'il convient de souligner afin d'en apprécier les implications et les perspectives d'amélioration.

3.3.7.1.Résolution des données topographiques

Les profils terrain exploités dans cette simulation sont issus de données SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) à résolution moyenne (30 m). Bien qu'adaptées à une première phase de planification, ces données peuvent omettre des obstacles de petite taille (végétation dense, constructions légères, éléments urbains), susceptibles d'altérer la réalité de la ligne de visée (LOS). Par conséquent, les résultats doivent être interprétés avec prudence, notamment dans les zones à urbanisation hétérogène ou en forte évolution.

3.3.7.2. Approximations climatiques

Le modèle de propagation utilisé repose sur des valeurs moyennes de précipitations, représentatives des conditions climatiques locales. Néanmoins, le comportement réel des liaisons en bande E (80 GHz), particulièrement sensibles aux conditions atmosphériques (pluie, humidité, brouillard), peut diverger en situation extrême. L'absence d'une modélisation dynamique des variations climatiques constitue donc une limite à la précision des estimations de disponibilité.

3.3.7.3. Hypothèses sur les caractéristiques des équipements

Les paramètres techniques relatifs aux équipements (type d'antenne, gain, puissance d'émission, modulation, activation de XPIC, etc.) ont été définis selon les standards industriels actuels. Toutefois, la variabilité des performances entre fabricants, ainsi que les pertes liées à l'intégration sur site (câblage, connecteurs, environnement technique), ne sont pas prises en compte dans la simulation. Cette approximation peut introduire un écart entre les performances théoriques et les conditions réelles d'exploitation.

3.3.7.4. Limitation géographique de l'étude

Enfin, l'analyse a été restreinte à un périmètre géographique ciblé, à savoir la commune de Bordj El Bahri. Si ce choix est justifié par la disponibilité des sites existants et leur représentativité, il ne permet pas à lui seul de généraliser les résultats à l'échelle

régionale ou nationale. Des facteurs comme la densité urbaine, la topographie variable ou les contraintes d'accès au spectre peuvent affecter la transposabilité du modèle à d'autres zones.

3.4. Conclusion :

Ce chapitre a présenté une étude technique approfondie de la planification d'un réseau de transmission 5G basé sur des liaisons faisceaux hertziens, en s'appuyant sur des sites 4G existants dans la commune de Bordj El Bahri. Grâce aux simulations réalisées avec Pathloss, il a été possible d'évaluer la faisabilité de l'utilisation de la bande E (80 GHz), en distinguant deux types de configurations : avec ou sans XPIC, selon le rôle des sites.

Les résultats montrent que les liaisons simulées offrent une bonne performance en termes de puissance reçue, disponibilité et stabilité, tout en mettant en valeur l'intérêt de réutiliser l'existant. Des limites, telles que les approximations climatiques ou la précision des profils terrain, ont néanmoins été identifiées, soulignant la nécessité d'une vérification sur le terrain pour confirmer les choix de déploiement.

En somme, cette simulation fournit une base concrète pour concevoir un réseau de transport 5G fiable et évolutif, tout en ouvrant des perspectives d'optimisation futures

Conclusion générale

Dans un contexte mondial de transformation numérique accélérée, le déploiement de la 5G représente un enjeu stratégique majeur pour les opérateurs de télécommunications. Cette nouvelle génération de réseau mobile ne se limite pas à une amélioration incrémentale des performances, mais impose une refonte globale de l'architecture réseau, en particulier au niveau de la couche de transmission. L'objectif de ce mémoire a été de contribuer à cette évolution en étudiant, modélisant et simulant une architecture de transport E2E (End-to-End) adaptée aux exigences de la 5G, à partir de l'infrastructure existante d'un opérateur mobile en Algérie.

Ce travail s'est appuyé sur une approche structurée en trois étapes.
Dans un premier temps, un cadre théorique solide a été posé, décrivant les évolutions des technologies mobiles, les exigences de la 5G en matière de qualité de service (QoS), de synchronisation, ainsi que les contraintes réglementaires nationales et internationales. Ensuite, nous avons détaillé l'architecture E2E d'un réseau 5G NSA, en expliquant le rôle de chaque composant (RU, DU, GNE, EPC…) et les technologies de transport telles que les faisceaux hertziens en bande E et les réseaux IP/MPLS. Enfin, une étude de cas réelle a été réalisée dans la commune de Bordj El Bahri**,** où nous avons simulé plusieurs liaisons micro-ondes à l'aide du logiciel Pathloss, en analysant les performances de propagation et la faisabilité du déploiement.

Les résultats obtenus ont mis en évidence la faisabilité technique et la robustesse des liaisons MW en bande E dans un contexte urbain dense, tout en valorisant les infrastructures 4G existantes. Les configurations étudiées, intégrant des technologies comme XPIC ou SDB, ont démontré leur efficacité en termes de débit, de fiabilité et de continuité de service. Ces résultats permettent de formuler des recommandations concrètes pour la migration vers une architecture 5G optimisée, sans nécessiter de refonte complète du réseau de transport.

Ce projet constitue ainsi une double contribution : d'une part, une évaluation technique rigoureuse de scénarios réels de transmission pour la 5G, et d'autre part, une méthodologie reproductible pour la planification E2E dans d'autres zones géographiques du territoire national.

Les travaux réalisés ouvrent plusieurs perspectives d'amélioration et d'approfondissement :

Intégration de solutions hybrides fibre/MW dans les zones à forte criticité **;**

Déploiement de mécanismes dynamiques d'ingénierie de trafic (SDN, NFV) pour une gestion intelligente du réseau ;

Évaluation de l'impact de la mobilité des utilisateurs sur la stabilité des liaisons ;

Intégration de modèles de propagation stochastiques pour une meilleure prise en compte des conditions environnementales réelles ;

Extension de l'étude à des régions à topographie complexe (zones montagneuses, sahariennes) ;

Application de l'intelligence artificielle pour l'optimisation automatique des liens de transport.

En définitive, ce mémoire s'inscrit dans une logique d'innovation technique au service du déploiement efficace de la 5G en Algérie. Il offre une base solide pour accompagner les opérateurs dans leurs choix technologiques et stratégiques, tout en anticipant les défis futurs liés à l'évolutivité, à la qualité de service et à la résilience des réseaux mobiles de nouvelle génération.

Références

[1] : Samuel Pierre, Max Maurice « introduction aux réseaux mobiles » Geninov Inc, 2008

[2] : A. Gohil, H. Modi, S. K. Patel « 5g Technology Of Mobile Communication : A Survey » Conférence Internationale Sur Les Systèmes Intelligents Et Le Traitement Du Signal 2013.

[3] : https://www.cablinginstall.com/wireless-5g/article/14176465/corning-demystifying-5g

[4] :https://devopedia.org/5g-deployment-options

[5] : Marco Ajmone, Marsan Nicola, Blefari Melazzi, Stefano Buzzi, Sergio Palazzo. The 5G Italy Book 2019: à Multiperspective View of 5G. 43124 Parma (PR) – ITALY. Edited by: Raffaele Bolla University of Genova and CNIT Giovanni Schembra University of Catania, 2019. 572pages : 100,226

[6] : https://www.telecomhall.net/t/5g-uplink-enhancement-technology-by-zte-white-paper/20183 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES [

[7] : https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_SUL.html [2

[8] : w.w.w.djezzy.com

[9]: Carcione, J., Zhang, L., & Ba, J. (2021). Wave Propagation in Infinituple-Porosity Media. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126. https://doi.org/10.1029/2020JB021266.

[10] : Danufane, F., Tretyakov, S., De Rosny, J., & Renzo, M. (2020). On the Path-Loss of Reconfigurable Intelligent Surfaces: An Approach Based on Green's Theorem Applied to Vector Fields. *IEEE Transactions on Communications*, 69, 5573-5592. https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3081452.

[11]: Sloman, M., & Chalmers, D. (1999). A survey of quality of service in mobile computing environments. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2. https://doi.org/10.1109/COMST.1999.5340514.

[12]: Lan, N. (2023). Evolution of Wireless Technology: From 1G to 5G. *Asian Journal of Applied Science and Technology*. https://doi.org/10.38177/ajast.2023.7408.

[13]: Medic, A., & Causevic, S. (2021). 4G to 5G Network Evolution: Advantages and Differences. *SAR Journal - Science and Research*. https://doi.org/10.18421/sar44-01.

[14]: Mshvidobadze, T. (2012). Evolution mobile wireless communication and LTE networks. *2012 6th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*, 1-7. https://doi.org/10.1109/ICAICT.2012.6398495.

[15] : https://www.arpce.dz

[16] : https://www.3gpp.org

[17] : https://www.djezzy.dz

[18] : https://www.itu.int/hub/2022/02/mobile-broadband-standards-imt-5g/

[19] : **https://www.itu.int**

[20]: Mitra, R., & Agrawal, D. (2015). 5G mobile technology: A survey. *ICT Express*, 1, 132-137. https://doi.org/10.1016/J.ICTE.2016.01.003.

[21] : Edison, B., Gokul, M., Krishna, C., & Sountharraj, M. (2018). 5g Mobile Technology. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 6, 1699-1702. https://doi.org/10.22214/IJRASET.2018.1259.