
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



Faculté De Génie Electrique et d'Informatique
Département de Télécommunications



Mémoire de Fin d'Etudes de
MASTER ACADEMIQUE

Filière :

Télécommunications

Spécialité :

Réseaux & Télécommunications

Par

Mensous Samy

Lahrech Samy Ali

Thème

Étude et dimensionnement d'un réseau de
transport de type 5G

Soutenu le : 07/07/2025

Devant le jury :

Président :	Mme. Nora ZIANI	MCB	UMMTO
Encadrant :	Mme. Samira BOUALLEG	MCB	UMMTO
Co-Encadrant :	M. Mohamed RABIY	Team Leader	ATM MOBILIS
Co-Encadrant :	M. Cherif MEDDOUR	MCB	UMMTO
Examineurs :	Mme. Ouiza BOUSSOUM	MCB	UMMTO

Résumé

Le réseau 5G représente une avancée majeure en matière de connectivité, de débit et de faible latence, ceci nécessite une infrastructure de transport du trafic adaptée, pour cela, ce mémoire étudie la conception d'un réseau de transport 5G NSA pour la région de Tizi-Ouzou, en utilisant les liaisons FH pour répondre aux contraintes géographiques et économiques, à l'aide du logiciel de planification Ellipse, un réseau de 39 sites a été modélisé, intégrant les technologies de l'E-Band, XPIC et différents types de configuration. L'objectif est de fournir une architecture fiable, évolutive et conforme aux exigences de la 5G NSA.

Mots-clés : 5G, réseau mobile, faisceaux hertziens, dimensionnement, Ellipse, E-Band, NSA, planification réseau.

Abstract

The 5G network represents a major advancement in terms of connectivity, data rate, and low latency. This requires an adapted traffic transport infrastructure. For this purpose, this thesis studies the design of a 5G NSA transport network for the Tizi-Ouzou region, using microwave links to address geographical and economic constraints. Using Ellipse planning software, a network of 39 sites has been modeled, integrating E-Band, XPIC technologies, and different configuration types. The objective is to provide a reliable, scalable architecture compliant with 5G NSA requirements.

Keywords: 5G, mobile network, microwave links, dimensioning, Ellipse, E-Band, NSA, network planning.

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à Mme. Samira Boualleg pour les précieux conseils qu'elle nous a fournis afin de réaliser ce travail. Elle s'est toujours montrée à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'aide et le temps qu'elle a bien voulu nous consacrer.

Nos remerciements s'adressent, en particulier, à M. Rabiyy de nous avoir accueillis au sein de l'entreprise ATM Mobilis et de nous avoir guidé tout au long du stage, nous exprimons nos sincères reconnaissances pour ses efforts fournis durant toute la période de stage et pour ses conseils, son inspiration et son intérêt.

Nous remercions énormément les membres du jury Mme. Ziani Nora, la présidente et Mme. Boussoum Ouiza, pour le temps qu'elles ont consacré à l'évaluation de notre mémoire.

Enfin, nous exprimons nos sincères remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidés durant la période de ce travail et ont collaboré de près ou de loin à son élaboration.

Dédicace 1

Je dédie ce travail à mes chers parents, pour leur amour, leurs sacrifices et leur soutien constant tout au long de mon parcours.

À mes amis, pour leur présence, leurs encouragements et leur bonne humeur dans les moments difficiles.

À mon binôme, avec qui j'ai partagé cette aventure avec rigueur, patience et complicité.

À ma promotrice et mon co-encadrant, pour leur accompagnement, leurs conseils précieux et leur disponibilité tout au long de ce mémoire.

Merci à vous tous.

Samy Mensous

Dédicace 2

Je dédie ce travail à ceux qui me sont chers.

Lahrech Samy Ali

Sommaire

Résumé	I
Abstract	I
Remerciements	II
Dédicace 1	III
Dédicace 2	IV
Sommaire	V
Liste des figures	XI
Liste des tables	XV
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	XVI
Introduction Générale	1
Chapitre I : L'évolution des réseaux mobiles	3
1 La première génération	4
1.1 Limitations de la 1G	4
2 La deuxième génération	4
2.1 Architecture de la deuxième génération	5
2.2 Station Mobile (MS)	5
2.3 Système sous radio (BSS)	6
2.3.1 BTS (Base Station transceiver)	6
2.3.2 BSC (Base Station Controller)	7
2.4. Le NSS (Network and Switching Subsystem)	7
2.4.1 Le registre de localisation des visiteurs (VLR)	7
2.4.2 Enregistreur d'identités des équipements (EIR)	7
2.4.3 Le registre de localisation nominale (HLR)	7
2.4.4 Centre d'authentification (AUC)	7
2.5. Type de modulation	7
3. La troisième génération	7
3.1. Les services offerts par l'UMTS	9
3.2. Architecture de la 3G	9
3.2.1 Le Node B	9

3.2.2	Le RNC (Radio Network Controller).....	10
3.2.3	Réseau central (Core Network).....	10
4	La quatrième génération 4G.....	10
4.1	L'architecture de la 4G.....	10
4.1.1	eNodeB (Evolved NodeB).....	11
4.1.2	MME (Mobility Management Entity).....	11
4.1.3	HSS (Home Subscriber Server).....	11
4.1.4	PCRF (Policy and Charging Rules Function).....	11
4.1.5	SGW (Serving GateWay).....	11
4.1.6	PGW (Packet data network GateWay).....	11
4.2	Services offerts par la LTE Advanced.....	11
5	Cinquième génération 5G.....	12
5.1	Architecture de la technologie 5G.....	12
5.1.1	Architectures Standalone et Non-standalone.....	12
5.1.2	Fixed Wireless Access (FWA).....	13
5.1.5	Small Cells (petites cellules).....	13
5.1.3	Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output).....	14
5.1.4	Beamforming (formations de faisceau).....	14
5.1.5	Network slicing.....	14
5.2	Services proposés par la 5G.....	15
5.2.1	eMBB (Enhanced Mobile Broadband).....	15
5.2.2	uRLLC (Ultra Reliable Low Latency Communications).....	15
5.2.3	mMTC (Massive Machine-Type Communications).....	16
5.3	Utilisation réel d'un réseau 5G.....	16
5.3.1	Villes intelligentes (smart city).....	16
5.3.2	Réalité virtuelle (VR/AR/XR).....	17
5.3.3	V2X (Vehicle-to-Everything).....	17
5.3.4	Hôpital connectée (Smart healthcare).....	18
5.3.5	Industrie 4.0.....	18
6.	Conclusion.....	18
	Chapitre II : Les liaisons faisceaux hertziens.....	19
1	Support de transmission.....	16

1.1 Les supports filaires	16
1.2 Les supports optiques	16
1.2.1 Fibre Monomode vs Fibre Multimode	17
1.2.1.1 OM1 Multimode	17
1.2.1.2 OM2/OM3/OM4/OM5 Multimode	18
1.2.1.3 OS2 Monomode/Single Mode	18
1.2.2 Bilan de liaison optique :	18
1.2.2.1 La puissance reçue	18
1.2.2.2 Puissance émise	18
1.2.2.3 Atténuation totale	18
1.2.2.4 Pertes ponctuelles	18
1.2.3 Les technologies :	18
1.2.3.1 WDM (Wavelength Division Multiplexing)	18
1.2.4 PDH et SDH	20
1.3 Les supports aérien	20
2 Les faisceaux hertziens	21
2.1 Les ondes électromagnétiques	21
2.2. Polarisation de l'onde	21
2.2.1 Polarisation rectiligne	21
2.2.2 Polarisation elliptique	22
2.2.3 Polarisation circulaire	22
2.3 Les mécanismes de propagation	23
2.4 Propagation dans une atmosphère homogène	23
2.5 Réflexion	23
2.6 Diffraction	24
2.7 Scattering	25
3 Line of sight (LOS)	26
3.1 Zones de Fresnel et Règles de Dégagement	26
3.1.1 Effets de la Réfraction Atmosphérique	28
3.1.1.1 Conditions normales ($k = 4/3$)	28
3.1.1.2 Cas critique (k minimal)	28
3.1.1.3 Diversité d'espace	28

3.1.2 Réflexions et Zones Paires	28
4. Plan de fréquence	28
4.1 Modulation en FH	29
4.2 Théorèmes de Shannon-Hartley	31
5 Le bilan de liaison	31
5.1 Schéma d'une liaison hertzienne	31
5.2 Fade Margin	32
5.3 principales perturbations	32
5.3.1 Perte en espace libre	33
5.3.2 Perte pour cause de pluie	33
5.3.3 Perte pour cause Troposphérique	33
5.4 Performance d'une liaison FH	33
6 Classification des liaisons FH	34
7 Technologies et fonctionnalités utilisées dans les réseaux FH	35
7.1 Technique Multi-band booster (MBB)	35
7.2 Fonctionnalité ACM/ATPC	35
7.3 Technique Agrégations de porteuses (Carrier Agrégation)	36
7.4 Fonctionnalité Agrégation physique RLB /HRLB :	36
7.5 Fonctionnalité XPIC (Cross-Polarization Interference Cancellation)	36
7.6 Technique MIMO	37
8 Structure d'une liaison hertzienne	37
8.1 Équipement	37
8.1.1 Unité intérieure (IDU)	37
8.1.2 Unité extérieure (ODU)	38
8.1.3 Antennes	38
8.2 Configuration des liaisons hertzienne	39
8.2.1 Configuration 1+0	39
8.2.2 Configuration 1+1 (Hot Standby)	39
8.2.3 Configuration 2+0	40
8.2.4 Configuration 4+0	41
9. Conclusion	41
Chapitre III : Dimensionnement d'un réseau de transport 5G	42

1. présentation du logiciel de planification « Ellipse »	38
1.2 L'ouverture du logiciel de planification	38
2. Dimensionnement et planification d'un cas pratique	43
2.1 Paramétrage et dimensionnement du notre réseau	45
2.1.1 Le choix de l'antenne	45
2.1.2 Choix de la radio	46
2.2 La configuration des liaisons hertziennes correspondantes	47
2.2.1 Marge de tolérance (Fade Margin)	47
2.3 Calculs d'interférence	48
2.3.1 Interférence sur le canal adjacent :	48
2.3.2 Conflit de polarité :	49
2.4 Bilan de liaison	49
2.4.1 Calculs de la capacité	50
2.5 Exemples de paramétrage et planification:	50
2.5.1 Exemple d'une liaison 1+0	50
2.5.1.1 Etape de planification :	50
2.5.1.2 Etape de dimensionnement	51
2.5.2 Exemple d'une liaison 2+0 XPIC (15105-15002)	55
2.5.3 Exemple d'une liaison E-band_1+0	58
2.6 Test d'interférence générale	59
Partie 3 : Transition vers la 5G NSA (Non-Stand Alone)	61
3.1 Ajustement des choix de bande :	61
3.2 La technologie Multi-Bande utilisant la technique hRLB	61
3.3 Augmentation de la capacité par changement de largeur de canal (CS)	62
3.4 Implémentation des liaisons E-band 2+0	64
3.5 Implémentation des liaisons 4+0 XPIC	64
3.6 Mise en place d'une boucle optique	65
3.7 Exemples de paramétrage et planification de la liaisons 15003 -15001	66
3.8 la technologie Small cell et les services de la 5G	68
3.9 la communication à faible latence ultra fiable (URLLC)	69
3.10 Communications massives de type machine (mMTC)	70
3.11 Haut débit mobile amélioré (eMBB)	72

3.12 Conclusion	73
Conclusion et perspectives	74
Références	76
Annexe 1	79
Annexe 2	81

Liste des figures

Figure I.1. Architecture du réseau GSM	5
Figure I.2. Illustration d'une station mobile.....	6
Figure I.3. Photo d'une station de transmission de base.....	6
Figure I.4. Architecture de l'UMTS.....	9
Figure I.5. architecture de la 4G/LTE.....	11
Figure I.6. Architectures 5G NSA et SA.....	13
Figure I.7. Exemple d'une Small celle Outdoor d'ERICSSON.....	13
Figure I.8. Massive MIMO.....	14
Figure I.9. Illustration du Beamforming.....	14
Figure I.10. Les 3 enjeux de la 5G.....	15
Figure I.11. Illustration d'une ville intelligente.....	17
Figure II.12. Structure d'une fibre optique.....	17
Figure II.13. Comparaison des types de fibres optiques selon le diamètre du cœur.....	17
Figure II.14. Architecture de la technologie WDM.....	19
Figure III.15. Comparaison entre CWDM et DWDM.....	20
Figure II.16. Polarisation rectiligne.....	22
Figure II.17. Polarisation elliptique.....	22
Figure II.18. Polarisation circulaire.....	22
Figure II.19. Réflexion.....	24
Figure II.20. Diffraction.....	24
Figure II.21. Diffusion (Scattering).....	25
Figure II.22. Zones de Fresnel.....	27

Figure II.23. Plan de fréquence	29
Figure II.24 Capacité en fonction de la modulation (taille du canal 56 Mhz)	30
Figure II.25. Illustration de la modulation adaptative	30
Figure II.26 Schéma d'une liaison hertzienne	31
Figure II.27. La classification des bandes de fréquence FH	34
Figure II.28. Principe de la technologie Multibande Booster	35
Figure II.35. Visualisation de la technologies MIMO	37
Figure II.29. Exemple d'un IDU du fournisseur ERICSSON	38
Figure II.30. Exemple d'ODU	38
Figure II.31. Antenne parabolique FH autour d'une BTS	39
Figure II.32. Configuration 1+0 sans protection	39
Figure II.33. Configuration 1+1 avec protection	40
Figure II.34. Configuration 2+0 XPIC	41
Figure II.34 Configuration 4+0	41
Figure III.36. Ouverture du logiciel Ellipse	38
Figure III.37. Page d'accueil du logiciel Ellipse	39
Figure III.38. Paramétrage de création de projet	40
Figure III.39. la représentation géographique de Tizi-Ouzou sur Ellipse	40
Figure III.40. la représentation géographique de Tizi-Ouzou sur Ellipse	41
Figure III.41. fenêtre des paramètres du site et des coordonnées GPS	41
Figure III.42. Création d'une liaison	42
Figure III.43. LOS	42
Figure III.44. Near LOS	42
Figure III.45. NLOS	43
Figure III.46. les 38 sites créés sur Ellipse	44
Figure III.47. les 37 liaisons de la région de Tizi-Ouzou	44

Figure III.48. Onglet du choix d'antenne sur Ellipse	45
Figure III.49. l'interface "Power optimization" pour la liaison 15128-15104.....	47
Figure III.50. Test d'interférence entre les liaisons.....	48
Figure III.51. Bilan de liaison d'une liaison hertzienne sur Ellipse.....	49
Figure III.52. Site 15001 (MSC/MME et BSC/RNC).....	50
Figure III.53. Vérification du LOS de la liaisons 15111-15001	51
Figure III.54. Montage IDU/ODU de la liaisons 15111-15001	54
Figure III.55. Bilan de liaisons du lien (15111-15001).....	55
Figure III.56. Vérification du LOS de la liaisons 15105-15002	55
Figure III.57. Montage IDU/ODU de la liaisons 15105-15002.....	57
Figure III.58. Bilan de liaisons du lien (15105-15002).....	58
Figure III.59. Bilan de liaisons du lien (15123-15003).....	59
Figure III.60. Analyse d'interférence globale	60
Figure III.61. Schéma illustrative de la technologie MBB/hRLB.....	62
Figure III.62. Schéma illustrative du montage hRLB	62
Figure III.63. Bilan de liaison du lien 15105-15003 en 4G.....	63
Figure III.64. Bilan de liaison du lien 15105-15003 en 5G.....	64
Figure III.65. Bilan de liaison du lien 15113-15002 en 5G.....	64
Figure III.66. Bilan de liaison du lien 15133-15003 en 5G.....	64
Figure III.67. Boucle optique reliant les sites 15001 15002 15003 15104.....	66
Figure III.68 Liaison optique entre le site 15003 et 15001	68
Figure III.69 Port SFP utilisés sur le module NPU1003	68
Figure III.70. Descriptif des aspects de la 5G eMBB, mMTC, URLLC	69
Figure III.71. Exemple de small cell sur un lampadaire	69
Figure III.72. CHU Nedir Mohamed et le mât du site 15116.....	70
Figure III.73. Schéma d'installation des small cells et fibre optique jusqu'au site 15116	70

Figure III.74. boulevard Krim Belkacem de Tizi-Ouzou avec le mât du site 15120.....	71
Figure III.75. Les différentes small cells du boulevard connecté au mât du site 15120.....	72
Figure III.76. Schéma d'installation des radio dots et fibre optique jusqu'au site 15116.....	73

Liste des tables

Table III.1 Diamètre d'antenne en fonction de la distance	46
Table III.2 Fréquence en fonction de la distance	46
Table III.3 Planification d'une liaison 1+0	51
Table III.4 Caractéristiques de l'IDU Mini-Link 6651	52
Table III.5 Caractéristiques de l'ODU Mini-Link 6365	53
Table III.6 Caractéristiques de l'IDU Mini-Link 6693	53
Table III.7 Fonctions des Modules du Mini-Link 6693	54
Table III.8 Planification d'une liaison 2+0 XPIC	56
Table III.9 Caractéristiques de l'IDU Mini-Link 6691	56
Table III.10 IDU et ODU du site 15002	57
Table III.11 Planification d'une liaison E-band 1+0	58
Table III.12 Caractéristiques du Mini-Link 6352	59
Table III.13 caractéristiques du OSN 1800V [22]	67
Table III.14 caractéristiques du SFP 1310nm	67

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

1G	1ère Génération
2G	2ème Génération
3G	3ème Génération
3GPP	Generation Partnership Project
4G	4ème Génération
5G	5ème Génération
AMC	Adaptative Modulation ans Coding
AMF	Access and Mobility Management Function
AMPS	Advanced Mobile Phone System
ANF	Access Network Function
ASK	Amplitutde Shift Keying
AUC	Authentication Unite Center
BER	Bit Error Rate
BSC	Base Station Controller
BSS	Base Station Sub-system
BTS	Base Transceiver Station
CDMA	Code Division Multiple Access
CN	Core Network
CS	Channel Spacing

EIR	E quipment I dentify R egister
eMBB	E nhanced M obile B road B and
EPC	E volved P acket C ore
ETSI	E uropean T elecommunications S tandards I nstitute
FDMA	F requency D ivision M ultiple A ccess
FH	F aisceau H ertzien
FWA	F ixed W ireless A ccess
GMSK	G aussian M inimum S hift K eying
GSM	G lobal S ystem for M obile
HLR	H ome L ocation R egister
HSDPA	H igh S peed D ownlink P acket A ccess
HSPA	H igh S peed P acket A ccess
HSUPA	H igh S peed U plink P acket A ccess
IDU	I ndoor U nit
IEEE	I nstitute of E lectrical and E lectronics E ngineers
IMT	I nternational M obile T elecommunications
LOS	L ong T erm E volution
Mbps	M éga b its p ar s econd
ME	M obile E quipement
MIMO	M ulti I nput M ultiple O utput
MME	M obility M anagement E ntity

mMtc	Massive Machine Type Communications
MS	Mobile Station
nLOS	Near Line Of Site
NLOS	None Line Of Site
NMT	Nordic Mobile Telephone
eNodeB	evolved NodeB
NR	New Radio
NSA	Non Stand Alone
NSS	Network Switching Sub-System
ODU	Out Door Unit
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OSS	Operation Support Sub-system
PCRF	Policy Charging Rules Function
PGW	Packet Switch-GetWay
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
RNC	Radio Network Controller
RNS	Radio Network Sub-System
SA	Stand Alone
SAE	System Architecture Evolution

SGW	Serving GateWay
SIM	Subscriber Identity Module
TACS	Total Access Communication System
TDMA	Time Division Multiple Access
UE	User Equipement
UIT	Union Internationale des Télécommunications
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
URLLC	Ultra-Reliable Low Latency Communications
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network
VLR	Visitor Location Register
VoIP	Voice over IP
VR	Virtual Reality
W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WDM	Wavelength Division Multiplexing
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
SDH	Synchronous Digital Hierarchy

Introduction Générale

Dans un monde de plus en plus connecté, la demande en services numériques à haut débit, en mobilité constante et en faible latence n'a jamais été aussi pressante. De la simple communication vocale aux applications de réalité augmentée, en passant par l'Internet des objets (IoT) ou la télémédecine, les exigences des utilisateurs et des industries poussent sans cesse les réseaux mobiles à se réinventer. Cette dynamique a donné lieu à l'émergence de nouvelles générations de réseaux, chacune marquant une rupture technologique avec la précédente.

C'est dans ce contexte que s'inscrit la cinquième génération des réseaux mobiles, la 5G, conçue pour répondre à des besoins en constante évolution en matière de bande passante, de connectivité massive et de latence ultra-faible. Mais pour concrétiser tout le potentiel de cette technologie, il est indispensable de repenser les infrastructures sous-jacentes, et en particulier les réseaux de transport, qui jouent un rôle crucial dans l'acheminement des données entre les antennes d'accès radio et le cœur du réseau.

Mobilis, opérateur mobile de référence en Algérie et filiale du groupe Algérie Télécom, déploie depuis 2003 une infrastructure couvrant le territoire national en 2G, 3G et 4G LTE. Son réseau de transport repose sur une architecture hybride, combinant fibre optique et faisceaux hertziens (FH), lui permettant de desservir efficacement ses sites radio. Dans la perspective du passage à la 5G, Mobilis a entamé des phases de test, notamment via l'implémentation de nouvelles technologies comme l'E-Band, en vue de garantir des débits très élevés et une connectivité fiable.

Ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique de modernisation, en proposant une étude complète sur la planification et le dimensionnement d'un réseau de transport 5G adapté à une zone urbaine : la ville de Tizi-Ouzou. Il se structure en trois chapitres :

Le premier chapitre retrace l'évolution des réseaux mobiles de la 1G à la 5G, en mettant l'accent sur les transformations technologiques majeures, tant au niveau des architectures que des services, et en soulignant les enjeux clés de la nouvelle génération.

Le deuxième chapitre est consacré aux supports de transmission, avec un focus particulier sur les faisceaux hertziens, solution économique et performante face aux

contraintes topographiques. Les principes de propagation, les paramètres de configuration, ainsi que les bilans de liaison y sont détaillés.

Le troisième chapitre aborde la phase pratique. À l'aide du logiciel de planification Ellipse et des données fournies par Mobilis, un réseau FH a été conçu pour la ville de Tizi-Ouzou, avec comme objectif de supporter les services 2G à 5G. Cette partie inclut les choix d'équipements (IDU/ODU), la prise en compte du relief, le test d'interférences, ainsi que la mise en œuvre d'une migration vers la 5G grâce aux technologies E-Band et multi-porteurs, ouvrant la voie à des services avancés tels que les smart cities et l'IoT.

En somme, ce travail vise à contribuer concrètement à la transition vers la 5G, en tenant compte des contraintes techniques du terrain et des exigences de performance, pour offrir aux utilisateurs un réseau fiable, évolutif et tourné vers l'avenir.

Chapitre I : L'évolution des réseaux mobiles

La téléphonie mobile a dépassé le téléphone portable et s'est beaucoup diversifiée afin de s'intégrer dans nos maisons, nos villes mais aussi nos usines, et cela grâce à plusieurs générations de progrès et d'améliorations technologiques. La téléphonie cellulaire est passée d'une utilisation mobile à une utilisation qui concurrence les réseaux WIFI.

Dans ce chapitre, nous abordons une remise en contexte des différentes générations de téléphonie mobile, de la première génération jusqu'à la 5ème, en soulignant les différentes techniques introduites à travers les années pour améliorer et combler les failles de sécurité et performances rencontrées, et garantir une qualité de service convenable aux besoins et demandes croissantes des usagers. [1]

1 La première génération

La première génération se reposait sur une communication mobile analogique de la voix uniquement, possédant plusieurs normes en fonction du pays. Le premier réseau a été développé aux États-Unis en 1978 portant le nom AMPS (Advanced Mobile Phone System), ensuite en 1981 les normes NMT (Nordic Mobile Telephone) en Scandinavie, et enfin le système TACS (Total Access Communication System) qui est une dérivative de AMPS (Advanced Mobile Phone System). [2]

1.1 Limitations de la 1G

La première génération est l'introduction au réseau mobile mais elle possède son lot d'inconvénients :

- Une capacité basse limitant le nombre d'utilisateurs
- Non sécurisé (on pouvait espionner les appels)
- Limité seulement à la voix

Afin de satisfaire les demandes des utilisateurs de future génération plus performante, ont vite pris le dessus.

2 La deuxième génération

Également appelé GSM (Global System for Mobile Communications), introduit la transmission et la communication numérique permettant une nette amélioration de la qualité

de la voix et de la capacité du réseau tout en apportant des services supplémentaires tels que l'envoi d'SMS.

Le GSM repose sur une méthode hybride Time Division Multiple Access (TDMA)/Frequency Division Multiple Access (FDMA), il utilise les bandes de fréquences comprises entre 900 MHz et 1800 MHz.

2.1 Architecture de la deuxième génération

Sur la figure 3, le réseau GSM se constitue de : station mobile (MS), le sous-système radio (BSS), le sous-système réseau (NSS), et le sous-système d'exploitation et de maintenance (OSS).

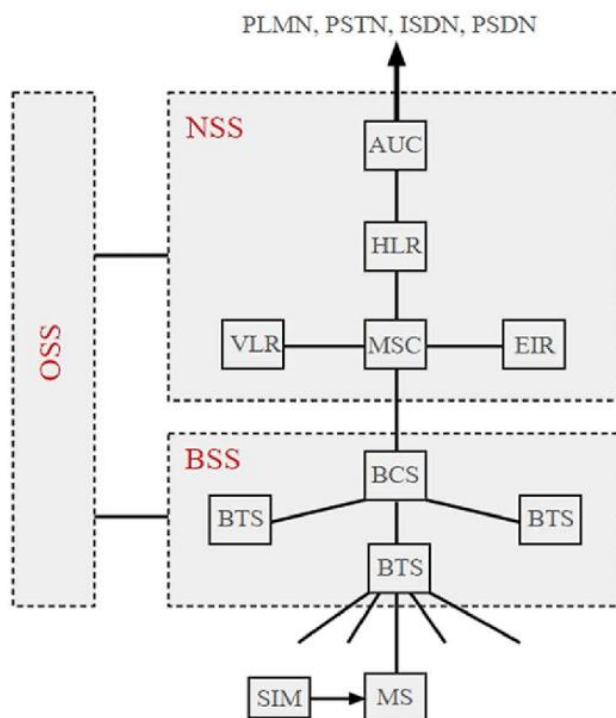


Figure I.1. Architecture du réseau GSM [2]

2.2 Station Mobile (MS)

Inclut un équipement utilisateur et du software nécessaires pour la communication avec le réseau mobile, se compose donc d'une carte SIM (Subscriber Identity Module) et d'un mobile.

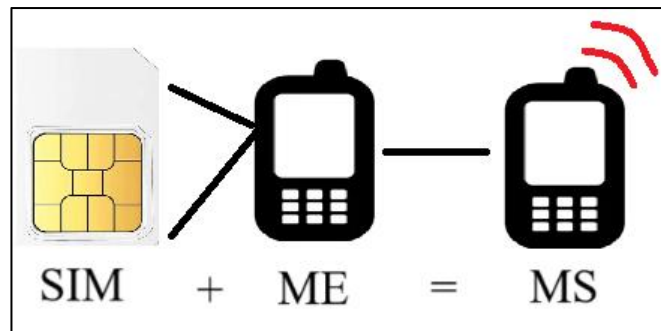


Figure I.2. Illustration d'une station mobile

2.3 Système sous radio (BSS)

La BSS (Base Station Subsystem) se charge du trafic entre le mobile et le sous-système d'acheminement de GSM (NSS), cette station a deux composants la BTS et la BCS.

2.3.1 BTS (Base Station transceiver)

La station émettrice-réceptrice de base autrement appelée station de transmission de base facilite la communication sans fil entre l'utilisateur et le réseau mobile.



Figure I.3. Photo d'une station de transmission de base

2.3.2 BSC (Base Station Controller)

La station de base de contrôle joue un rôle clé dans le BSS, elle surveille les activités d'une ou plusieurs BTS. Cette station aide à l'optimisation de l'efficacité du réseau.

2.4. Le NSS (Network and Switching Subsystem)

Est au cœur du réseau GSM. Il prend en charge toutes les fonctions pour mobile présentes dans le réseau et gère l'acheminement des appels et la mobilité des abonnés. Parmi ses composants on trouve : le MSC, VLR, EIR, HLR et le AUC. Le centre de commutation mobile (MSC) :

C'est le centre de communications principal du réseau mobile

2.4.1 Le registre de localisation des visiteurs (VLR)

Contient les données nécessaires pour authentifier et localiser les abonnés

2.4.2 Enregistreur d'identités des équipements (EIR)

C'est une base de données utilisé dans les réseaux mobiles

2.4.3 Le registre de localisation nominale (HLR)

Contient les informations d'abonnement et/ou d'identifications de chaque utilisateur du réseau mobile

2.4.4 Centre d'authentification (AUC)

Gère la sécurité du réseau

2.5. Type de modulation

Le GSM utilise la modulation à déplacement minimum gaussien (GMSK) qui est un variant de la modulation PSK (Phase Shift Keying), avec une technique d'accès TDMA (Time Division Access). Conçu à la base pour fonctionner dans des bandes de 900Mhz, il a rapidement été adapté à la bande des 1800 Mhz.

3. La troisième génération

Peu de temps après le déploiement de la 2G, l'Union Internationale des Télécommunications (UIT-R) a élaboré les exigences que devaient remplir les systèmes pour

être classés comme IMT-2000 (International Mobile Telecommunications 2000). Le UMTS est devenu le principal système de communication mobile de troisième génération (3G) En janvier 1998, le CDMA sous deux variantes, le WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) et le TD-CDMA (Time Division CDMA) a été adopté par l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute) comme base du UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). Le UMTS est devenu le principal système de communication mobile de troisième génération (3G) et l'un des premiers à répondre aux critères de l'IMT-2000.

Six interfaces radio ont été reconnues comme conformes aux exigences IMT-2000, dont :

- Trois basées sur la technologie CDMA,
- Une version de GSM/EDGE appelée UWC-136,
- Deux technologies basées sur OFDMA.

Dans le cadre du 3rd Generation Partnership Project (3GPP), de nouvelles spécifications ont été développées, formant l'ensemble connu sous le nom de 3G Evolution (illustré comme 3.5G dans la Figure 1).

Cette évolution reposait sur deux approches de Réseau d'Accès Radio (RAN) et sur une évolution du cœur de réseau.

La première approche RAN suivait les évolutions du CDMA2000 au sein de 3GPP2, notamment avec 1xEV-DO et 1xEV-DV.

La seconde approche RAN était basée sur le HSPA (High Speed Packet Access), une combinaison de :

- HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) introduit dans la Release 5 du 3GPP
- Et HSUPA (High Speed Uplink Packet Access), introduit dans la Release 6 .

Ces deux améliorations ont d'abord permis d'atteindre des débits allant jusqu'à 14,6 Mbps en téléchargement (downlink) et 5,76 Mbps en envoi (uplink), avant d'évoluer vers des débits encore plus élevés grâce à l'introduction du MIMO.

Le HSPA est basé sur le WCDMA et reste entièrement rétrocompatible avec lui. Tandis que le CDMA 1xEV-DO a commencé à être déployé en 2003, le HSPA et le CDMA 1xEV-DV sont entrés en service en 2006.

Toutes les normes du 3GPP suivent une philosophie claire : ajouter de nouvelles fonctionnalités tout en maintenant la compatibilité avec les équipements existants.

Cela s'est prolongé avec l'évolution du HSPA vers HSPA+, qui prend en charge l'agrégation de porteuses pour des débits plus élevés, sans perturber les terminaux déjà sur le marché. [4]

3.1. Les services offerts par l'UMTS

- il permet un accès à internet depuis les téléphones portable, peut théoriquement atteindre les 2Mb/s
- il améliore la qualité de la communication.
- supporte des applications multimédia à large bande (streaming, visiophonie...).

3.2. Architecture de la 3G

L'UMTS se base sur le réseau GSM déjà en place tout en améliorant l'architecture .

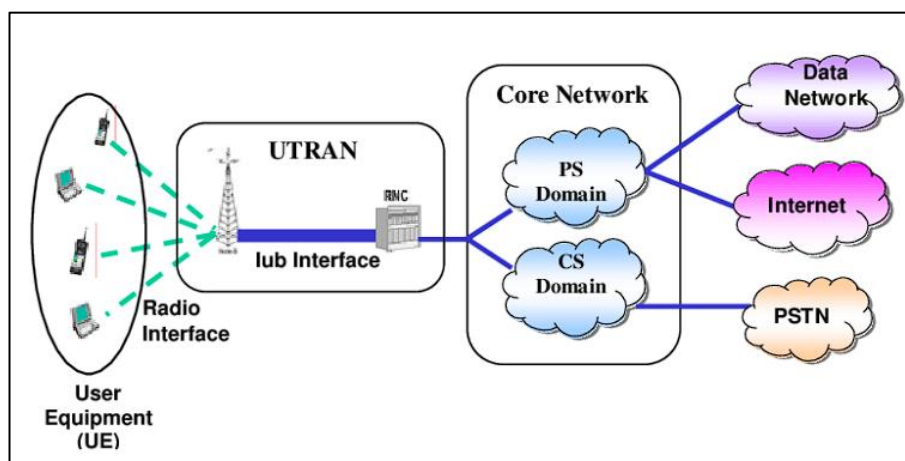


Figure I.4. Architecture de l'UMTS [3]

Le réseau 3G est constitué de trois entités principales :

- Équipement utilisateur (UE).
- Le réseau UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network).
- La Iub est l'interface qui connecte le RNC avec le Node B.

3.2.1 Le Node B

Assure les fonctions de transmission et de réception radio pour une ou plusieurs cellules de l'UTRAN

3.2.2 Le RNC (Radio Network Controller)

A pour role le routage des communications entre le Node B et le CN.

3.2.3 Réseau central (Core Network)

Le CN a pour rôle la commutation des appels et le routage des paquets à l'intérieur du réseau, et assure le contrôle des paramètres du réseau.

4 La quatrième génération 4G

La 4G a pour objectifs d'améliorer d'augmenter le débit et les applications non prise en charge par les générations passée, introduite en 2009 elle utilise plusieurs antennes émettrice et réceptrice, connu sous le nom MIMO (Multiple input Multiple Output) afin d'offrir une vitesse de transfert de 100 Mb/s jusqu'à 1 Gb/s, acceptée commercialement comme 4G, est appelée Long Term Evolution (LTE) elle comprend :

- Une nouvelle interface radio basée sur l'accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence (OFDMA) .
- Une nouvelle architecture de cœur de réseau (CN) appelée System Architecture Evolution/Evolved Packet Core (SAE/EPC).

Contrairement à l'UMTS, le LTE n'est pas rétro-compatible. Il a été développé en prévision de l'attribution de blocs de spectre plus larges que l'UMTS lors de la Conférence mondiale des radiocommunications (WRC).

2007. La norme est conçue pour fonctionner avec des porteuses de fréquences offrant une grande flexibilité, supportant des largeurs allant de 1,4 MHz à 20 MHz [5]

4.1 L'architecture de la 4G

Contrairement aux générations précédentes la 4G est basée sur une architecture IP

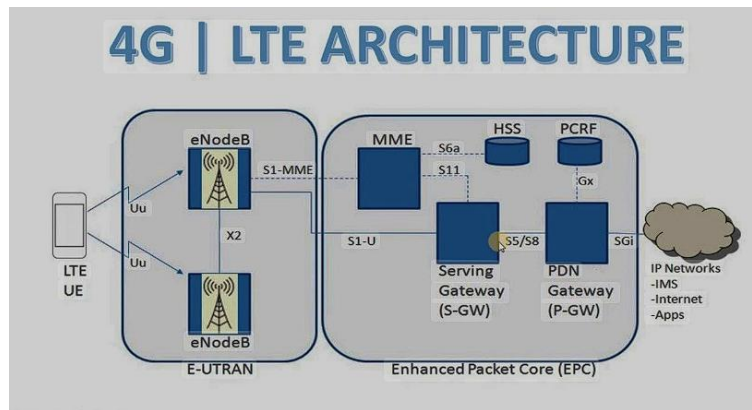


Figure I.5. architecture de la 4G/LTE [4]

4.1.1 eNodeB (Evolved NodeB)

C'est une station de base qui intègre des fonctions radio (l'équivalent de la NodeB + RNC présent dans la 3G)

4.1.2 MME (Mobility Management Entity)

Une entité qui gère la mobilité du réseau

4.1.3 HSS (Home Subscriber Server)

Fournit et définit les niveaux de service disponibles pour les utilisateurs

4.1.4 PCRF (Policy and Charging Rules Function)

S'occupe de gérer la QOS (Quality of service)

4.1.5 SGW (Serving GateWay)

Relai entre eNodeB et P-GW

4.1.6 PGW (Packet data network GateWay)

Participe à l'acheminement des données vers internet

4.2 Services offerts par la LTE Advanced

- VoLTE (Voice over LTE) qui est une meilleure qualité audio
- Streaming vidéo HD
- Partage de connexion (tethering) utilisé pour les objets connectés

1.4.3. Limites de la 4G

La 4G est un réseau mobile bien aboutis avec énormément d'avantage mais a quand même quelques limitations dans certain domaine comme la e-santé qui requière une latence aux environ de 1ms que la 4G ne peut pas atteindre, Ensuite une difficulté pour gérer un grand nombre d'objet connecté (mMTC), enfin une capacité pas suffisante pour les applications en réalité virtuel.

5 Cinquième génération 5G

Introduite commercialement en 2019, se présente comme une génération de rupture, celle qui ne s'intéresse plus uniquement au monde des opérateurs mobiles grand public, mais qui ouvre de nouvelles perspectives et permet la cohabitation d'applications et usages extrêmement diversifiés, unifiés au sein d'une même technologie. La 5G utilise une nouvelle technologie d'accès radio NR (New Radio) basé sur la division des données transmis en plusieurs petit paquets, également appelé OFDMA. Cette nouvelle génération peut être jusqu'à 20 fois plus rapide que la 4G avec une vitesse de 1Gb/s tout en ayant une latence de 1 milliseconde [6]

5.1 Architecture de la technologie 5G

5.1.1 Architectures Standalone et Non-standalone

L'architecture de la 5G se décline en deux modèles de déploiement. Le modèle NSA (Non-Standalone), le réseau 5G (NR) est appuyé sur un cœur 4G existant Autrement dit, une station 4G et une station 5G gèrent conjointement le trafic, le plan de contrôle restant ancré sur le LTE. Ce mode permet de déployer rapidement la 5G en réutilisant l'infrastructure 4G. En mode SA (Standalone) le réseau ne s'appuie pas sur une architecture 4G déjà existante, ce qui permet de réaliser toutes les fonctionnalités spécifiques à la 5G tel qu'une très faible latence, efficacité renforcée, et orchestration centralisée (notamment via la fonction AMF et le slicing). Contrairement à la NSA, l'architecture SA peut garantir les performances maximales de la 5G (latence minimale, découpe du réseau) car le plan de contrôle n'est plus dépendant du réseau 4G. [7]

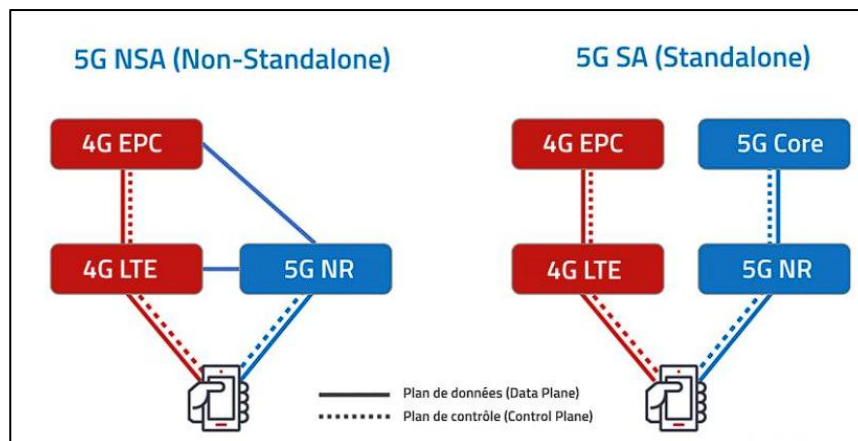


Figure I.6. Architectures 5G NSA et SA [6]

5.1.2 Fixed Wireless Access (FWA)

La 5G offre une alternative fixe au haut débit filaire. Avec des antennes 5G dédiées en extérieur, il est possible de fournir un accès Internet à domicile comparable aux performances de la fibre optique. Ce service est déjà déployé dans certains pays (ex. 5G home internet) et s'avère particulièrement utile pour relier les zones rurales ou mal couvertes par l'ADSL/fibre, comblant ainsi la fracture numérique.

5.1.5 Small Cells (petites cellules)

Ce sont des cellules miniatures facile à installer et se camoufle dans le paysage urbain, ces cellules vont contribuer à palier les mauvaises propagations des ondes. Avec la multiplication des petites cellules la 5G atteint l'objectif de multiplier la capacité du réseau par 100 en termes de trafic. [8]



Figure I.7. Exemple d'une Small cellule Outdoor d'ERICSSON [8]

5.1.3 Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Ces antennes dotées de 128 connecteurs (contre une douzaine sur les antennes MIMO de la 4G+) permettent de diriger le signal radio uniquement vers les utilisateurs quand ils ont en besoin (Beam tracking), aux lieux d'être constamment émis dans toutes les directions ce qui augmente le débit

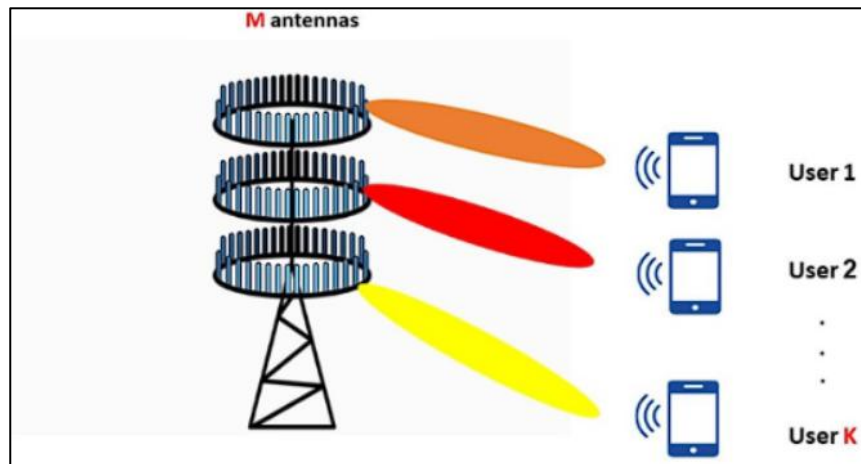


Figure I.8. Massive MIMO [14]

5.1.4 Beamforming (formations de faisceau)

Une technologie de traitement du signal introduite par la 5G, elle permet de faire converger les ondes émises par une antenne vers un smartphone en particulier. Utilisé les Massive MIMO afin d'économiser une quantité considérable d'énergie.

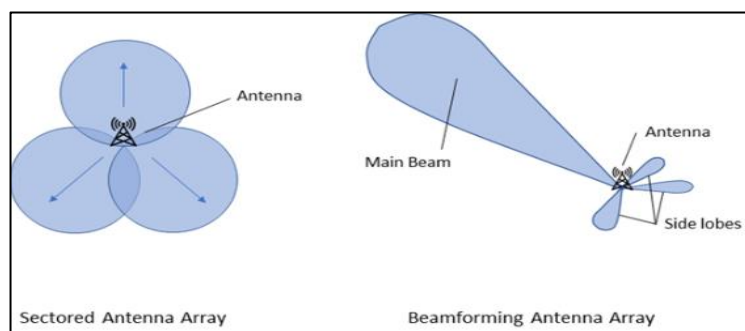


Figure I.9. Illustration du Beamforming [15]

5.1.5 Network slicing

C'est une architecture qui découpe le réseau en tranche (Virtualisations du réseau), chaque tranche peut être configurée à un type d'usage précis, chacune d'elle offre la quantité adaptée de débit, de densité et de latence adapté à chaque usage.

5.2 Services proposés par la 5G

La 5G est avant tout un écosystème qui englobe plusieurs fonctionnalités et se situent dans ces 3 catégories :

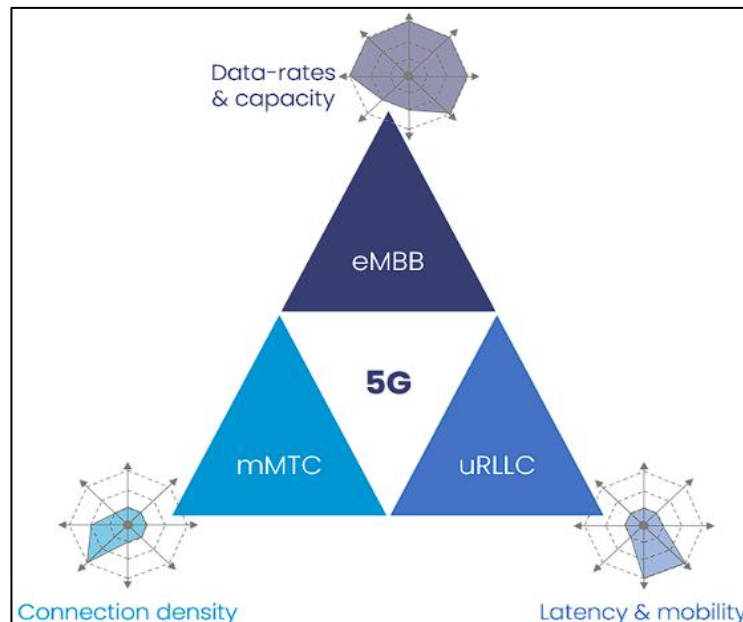


Figure I.10. Les 3 enjeux de la 5G [9]

5.2.1 eMBB (Enhanced Mobile Broadband)

Une des 3 branches principales de la 5G qui fait référence à l'amélioration de l'expérience hauts débits, utilisée dans les lieux à forte densité comme les stades ou des milliers de personnes se connectent à internet et partagent leurs expériences via plusieurs applications mobiles, elle est donc adaptée pour les smart homes qui ont besoin de connecter plusieurs appareils.

5.2.2 uRLLC (Ultra Reliable Low Latency Communications)

Est un ensemble de spécifications défini par le 3GPP, on trouve son utilisation dans divers domaines nécessitant une très faible latence pour une grande précision et un fonctionnement du réseau sans interruption tel que la médecine pour les chirurgies assistées ou à distance, la robotique industrielle avancée ou dans les véhicules autonomes. La technologie uRLLC promet une latence de bout en bout inférieure à une 1ms et une fiabilité supérieure à 99.999%. Ses performances se reposent sur des technologies telles que le Network slicing et le Multi-Access Edge Computing qui permettent de baisser la latence du réseau mobile.

5.2.3 mMTC (Massive Machine-Type Communications)

Supporte une densité de connections allant jusqu'à 1 million d'appareils par kilomètre carré, ce qui est 10 fois plus élevé que la 4G LTE. Grâce à ces nombres massifs d'appareils en simultané ça nous permet une utilisation dans la smart agriculture et pour les éclairages public intelligent dans les smart cities par exemple. Cette technologie utilise une basse consommation d'énergie grâce aux différentes techniques comme : Network slicing, RACH (Random Access Channel), et les LP-WAN (Low Power LAN) standardisé par 3GPP.

5.3 Utilisation réel d'un réseau 5G

Grâce à la capacité, la faible latence et la disponibilité offerte par la 5G permet d'offrir des services tel que : [17]

5.3.1 Villes intelligentes (smart city)

La 5G prend en charge le massive IoT, c'est-à-dire des millions d'objets connectés par km² pour gérer les infrastructures urbaines (trafic, éclairage, réseaux intelligents, capteurs environnementaux...). Sa capacité à supporter un nombre massif d'appareils IoT en fait un pilier des projets de ville connectée. Par exemple, des capteurs en grand nombre peuvent transmettre en temps réel des informations de trafic ou de pollution, améliorant la réactivité des services publics.

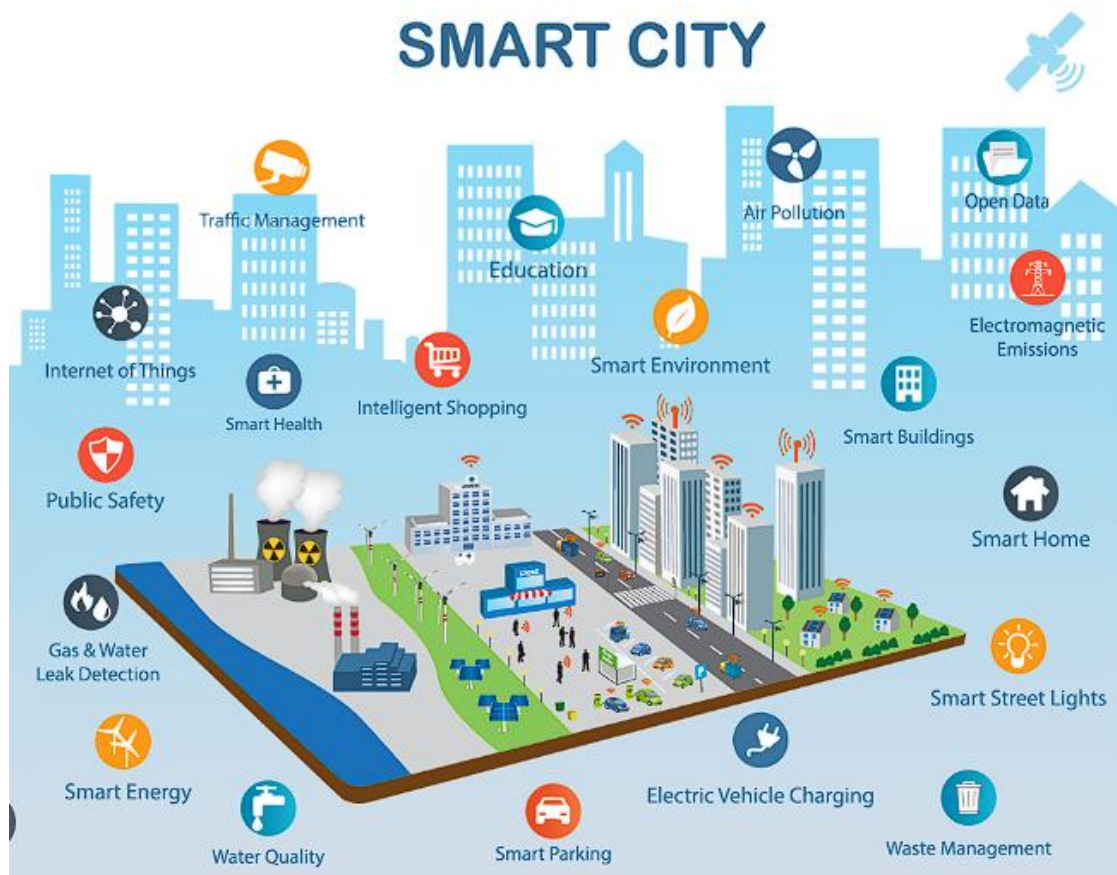


Figure I.11. Illustration d'une ville intelligente [17]

5.3.2 Réalité virtuelle (VR/AR/XR)

Grâce à son débit très élevé et sa latence très basse, la 5G permet le streaming en temps réel de contenu immersif de haute qualité. Des applications de maintenance à distance (annotations AR), de formation immersive ou de divertissement interactif deviennent possibles sans lags perceptibles. En mobilité, les utilisateurs peuvent accéder à des expériences VR/AR riches (jeux, métavers, visites virtuelles) profitant du haut débit du réseau.

5.3.3 V2X (Vehicle-to-Everything)

La 5G supporte la communication véhiculaire (Cellular V2X). Les véhicules peuvent échanger des données critiques entre eux (V2V), avec l'infrastructure (V2I) ou avec les piétons/objets (V2P/V2X). La Release 16 du 3GPP a standardisé la V2X, qui combine la communication directe et via réseau pour transmettre des informations temps réel sur la circulation, les dangers routiers ou les feux de signalisation. Ces fonctions améliorent la sécurité routière (freinage coordonné, alertes aux piétons) et préparent la conduite automatisée avancée.

5.3.4 Hôpital connectée (Smart healthcare)

La 5G permet des usages médicaux extrêmement exigeants en QoS. L'ultra-faible latence et le haut débit sont nécessaires pour la télémédecine avancée – par exemple la chirurgie assistée à distance. Des opérations chirurgicales ont déjà été réalisées via des réseaux 5G, offrant un flux vidéo HD quasi instantané entre le bloc opératoire et le chirurgien à distance. La 5G facilite aussi la télésurveillance médicale (capteurs vitaux en continu) et l'imagerie haute définition mobile, partout y compris dans les zones isolées.

5.3.5 Industrie 4.0

Dans les usines connectées, la 5G assure la très faible latence et la fiabilité extrême (URLLC) requises pour le contrôle en temps réel des machines et des robots. Par exemple, la technologie 5G URLLC permet une interaction sûre homme-machine sans fil (arrêt instantané des robots) et le fonctionnement sans fil d'AGV et de capteurs industriels. Les chaînes de production peuvent ainsi être réorganisées facilement sans câblage fixe, augmentant la flexibilité. Des démonstrations (ex. Audi/Ericsson) ont montré qu'un bras robotisé de fabrication peut être piloté par un réseau 5G, alors qu'il était auparavant limité à une connexion filaire.

6. Conclusion

Chaque génération a apporté son lot de services et évolution en terme de service, néanmoins la 5g est la génération du renouveau et bond technologique, et ce, dans tout les secteurs qu'elle atteint avec ses débits, capacité et disponibilité.

Chapitre II : Les liaisons faisceaux hertziens

On a vu dans le chapitre précédent la rupture qu'amène cette cinquième génération dans les réseaux mobiles : un débit ultra rapide, une latence très faible et une connectivité massive, imposant des exigences techniques de taille, surtout en termes de bande passante et de capacité réseau.

Pour répondre à ces nouveaux besoins, les supports de transmission jouent un rôle central dans les architectures des réseaux mobiles modernes, ils constituent le moyen de faire transiter de très grands volumes de données pour répondre aux services de la 4G et 5G.

Parmi ces supports, deux solutions dominent aujourd'hui dans les réseaux de transport : la fibre optique, pour ses débits ultra rapides et sa faible latence ainsi que les faisceaux hertziens, qui offrent une alternative rapide et peu coûteuse à déployer, notamment dans les environnements contraints ou les zones difficiles d'accès.

Ce chapitre introduit ainsi la transmission par faisceaux hertziens comme solution face à ces contraintes, en abordant les différents aspects relatifs à la propagation des ondes électromagnétiques, ainsi que les limitations techniques et environnementales qui influencent leur mise en œuvre dans l'architecture réseau.

1 Support de transmission

On entend par les supports physiques de transmission, les éléments permettant de faire circuler les données d'information d'un équipement informatique à un autre, on distingue trois catégories de support :

1.1 Les supports filaires

Ils permettent de transmettre une grandeur électrique à travers des câbles métalliques tels que les câbles coaxiaux et les paires torsadées.

1.2 Les supports optiques

Utilise une onde lumineuse pour transmettre les informations d'un point à un autre tel que la fibre optique. Elle est très coûteuse à mettre en place mais offre en retour un grand débit ainsi qu'une grande capacité

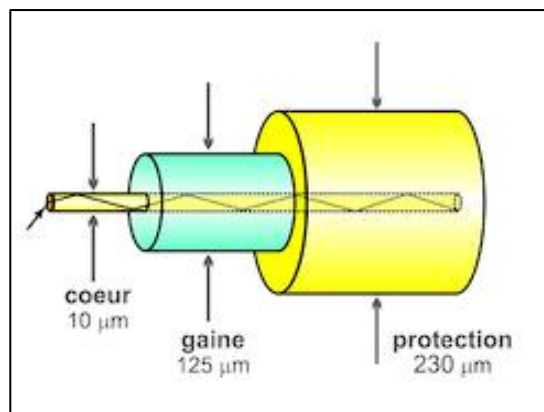


Figure II.12. Structure d'une fibre optique [18]

1.2.1 Fibre Monomode vs Fibre Multimode

La fibre monomode indique que celle-ci peut transmettre un seul type de mode d'éclairage à la fois. Alors que la fibre multimode est capable de transmettre plusieurs modes. Les fibres monomodes et multimodes se distinguent principalement par le diamètre, la longueur d'onde, la source lumineuse et la capacité de transmission du cœur de la fibre. [18]

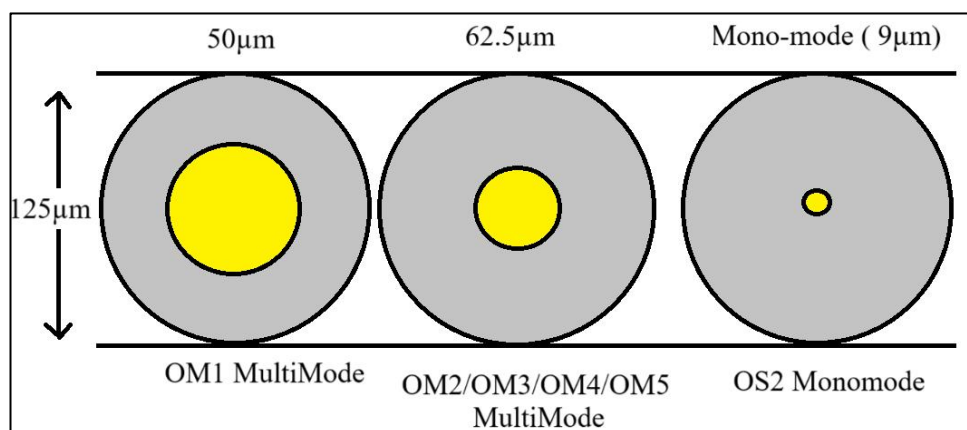


Figure II.13. Comparaison des types de fibres optiques selon le diamètre du cœur

Comme nous pouvons le voir sur cette figure, les différents types de fibre optique possèdent un cœur de différents diamètres

1.2.1.1 OM1 Multimode

Utilisé pour de courtes distances telles que dans des LAN, le débit peut atteindre les 1 Gbps

1.2.1.2 OM2/OM3/OM4/OM5 Multimode

Ce sont des versions améliorées pour des débits plus élevés jusqu'à 100 Gbps et généralement utilisées dans des data centers

1.2.1.3 OS2 Monomode/Single Mode

Pour les très grandes distances, utilisé dans les réseaux métropolitains et dans les réseaux 5G

1.2.2 Bilan de liaison optique :

C'est une méthode qui permet de s'assurer que le signal lumineux est assez puissant pour qu'il soit transmis sans perte et avec fiabilité, la formule pour le calculé est :

$$\text{Puissance reçue} = \text{puissance émise} - (\text{Atténuation totale} + \text{Pertes ponctuelles})$$

1.2.2.1 La puissance reçue

C'est la puissance du signale reçue par le récepteur, il ne doit pas dépasser la marge de tolérance au risque que le signale transmis soit plus fiable.

1.2.2.2 Puissance émise

C'est la puissance du signale transmis par l'émetteur

1.2.2.3 Atténuation totale

C'est de la puissance de la lumière, elle dépend du coefficient d'atténuation et de la longueur de la fibre.

1.2.2.4 Pertes ponctuelles

Ce sont des pertes liées au matériel ou à des éléments spécifiques tel que : les coupleurs optiques ou les adaptateurs

1.2.3 Les technologies :

1.2.3.1 WDM (Wavelength Division Multiplexing)

Cette technologie permet de moduler plusieurs signaux sur une seule fibre optique en utilisant différentes longueurs d'onde à l'aide d'un multiplexeur, l'objectif principal est de gagner de la capacité sans poser de nouvelle fibre optique.

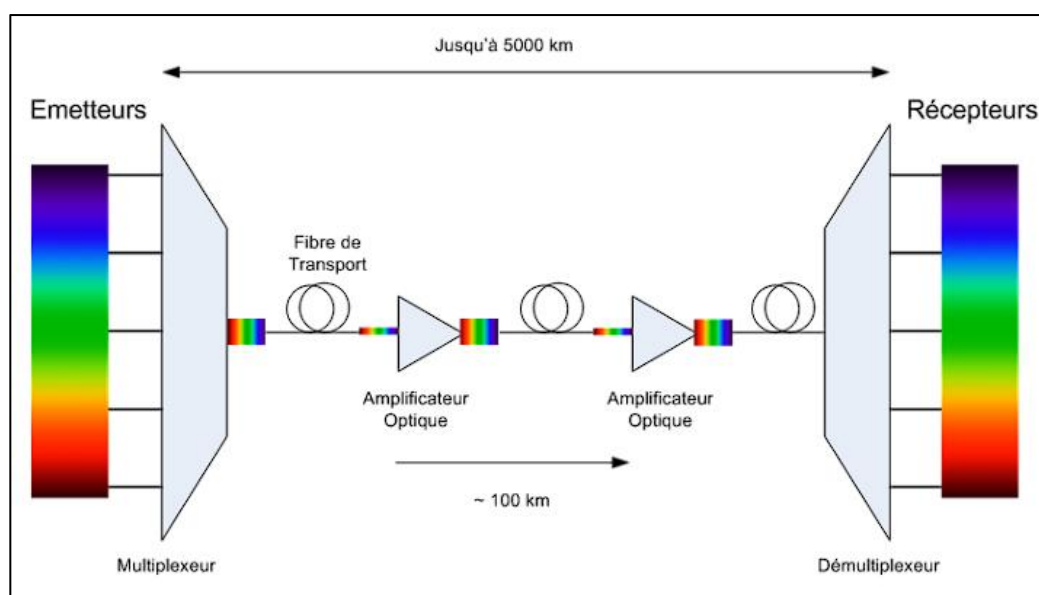


Figure II.14. Architecture de la technologie WDM [18]

Dans la figure 14 qui représente un réseau optique WDM, nous avons l'émetteur qui envoie plusieurs signaux de différentes longueurs d'onde dans un multiplexeur qui les fusionne en une seule fibre de transport. À l'arrivée, un démultiplexeur divise les différents signaux en fonction de leur longueur d'onde.

NB : Les amplificateurs optiques ont pour but de s'assurer que notre signal ait assez de puissance.

La technologie WDM se divise en deux technologies principales:

1.2.3.2 CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)

C'est une version simplifiée et économique de WDM car elle utilise des longueurs d'onde assez éloignées, cette technologie est particulièrement adaptée aux courtes et moyennes distances, peut contenir jusqu'à 18 canaux, espacés d'au moins 20 nanomètres.

1.2.3.3 DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)

Le DWDM utilise un espacement réduit entre les longueurs d'onde, ce qui permet de prendre en charge un nombre important de canaux pouvant atteindre les 80 paires de fibres. Des lasers haut de gamme font partie des exigences et des composants précis, ce qui fait augmenter les coûts. Particulièrement adaptée au haut débit et longue distance, elle est notamment utilisée dans la 5G [18]

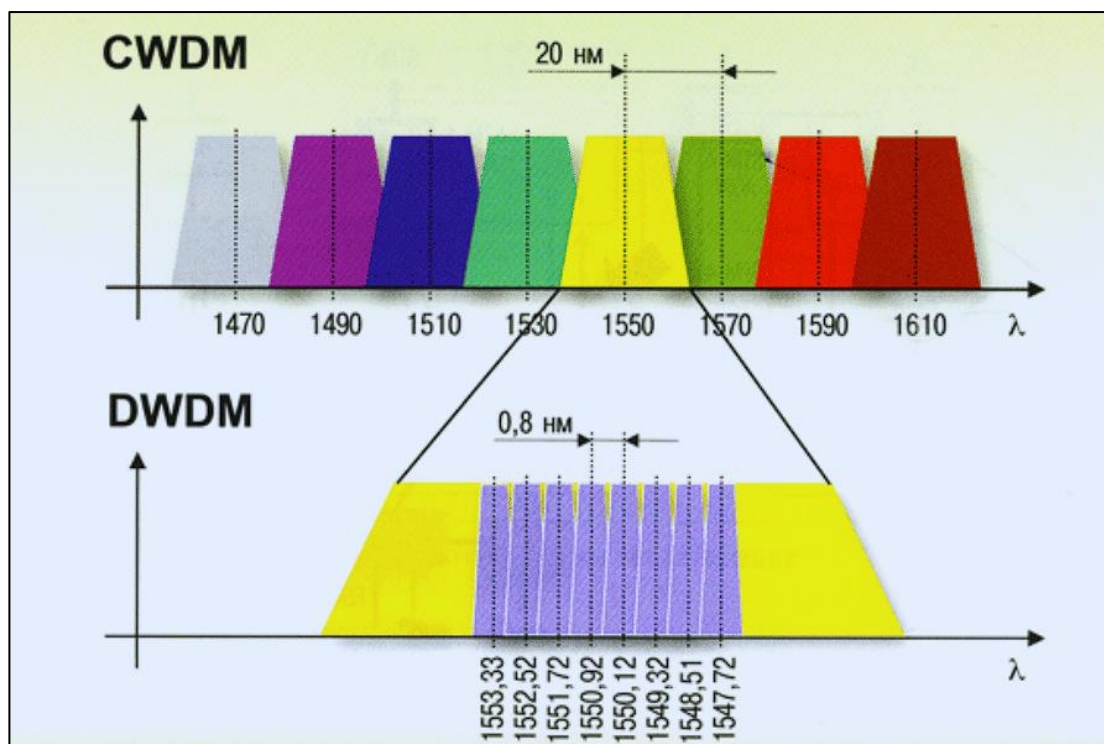


Figure III.15. Comparaison entre CWDM et DWDM [18]

1.2.4 PDH et SDH

Le PDH a constitué la base de tous les réseaux de transport jusqu'aux années 1990. La PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy) a été mise en place en parallèle à la numérisation du réseau RTC pour répondre principalement à la demande de la téléphonie. Les réseaux PDH ont été développés à une époque où les transmissions point par point représentaient l'essentiel des besoins. L'évolution du réseau de transport haut débit est marquée par l'introduction des techniques synchrones SDH. Fondée sur un réseau de distribution d'horloge, la hiérarchie synchrone garantit la délivrance de bits en synchronisme avec une horloge de référence. Elle autorise de plus des débits plus élevés et répond à un besoin de normalisation des fibres optiques. Cependant, la hiérarchie PDH reste malgré tout aujourd'hui la technologie dominante sur la plupart des réseaux de télécommunications du monde, même si elle est en train d'être remplacée progressivement par la hiérarchie numérique synchrone. En effet, si les cœurs de réseaux sont aujourd'hui SDH, la distribution des débits chez l'utilisateur repose sur la PDH.[19]

1.3 Les supports aérien

Comme le nom l'indique, on utilise l'air ou le vide comme support physique d'envoi grâce aux ondes électromagnétiques on retrouve comme support, les satellites et les faisceaux hertziens.

2 Les faisceaux hertziens

Une liaison hertzienne permet la transmission de signaux entre deux points fixes en utilisant des ondes radioélectriques (fréquences porteuses : 250 MHz à 30 GHz). Ces ondes se propagent en ligne droite, mais leur portée est limitée par la courbure terrestre (horizon).

Ainsi, les liaisons sont établies entre stations en visibilité directe, généralement espacées de 50 km max.

Numérisation des signaux (voix, images, sons) :

Échantillonnage → conversion en forme binaire.

Quantification → attribution d'un niveau de tension.

Codage → optimisation des ressources, confidentialité et fiabilité.

2.1 Les ondes électromagnétiques

Une onde électromagnétique est une onde qui se propage autant dans le vide que dans un milieu matériel possédant toutes les propriétés de la lumière (réflexion, réfraction et polarisation), elle comporte à la fois un champ électrique et un champ magnétique oscillant à la même fréquence. Ces deux champs, perpendiculaires l'un par rapport à l'autre se propagent dans un milieu selon une direction orthogonale

2.2. Polarisation de l'onde

Il existe trois types de polarisation :

2.2.1 Polarisation rectiligne

Si l'extrémité du vecteur E ou de H décrit une droite.

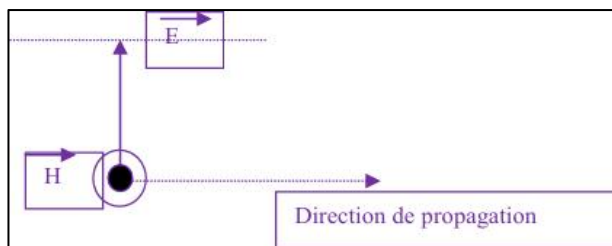


Figure II.16. Polarisation rectiligne

2.2.2 Polarisation elliptique

Si l'extrémité du vecteur E ou de H décrit une ellipse

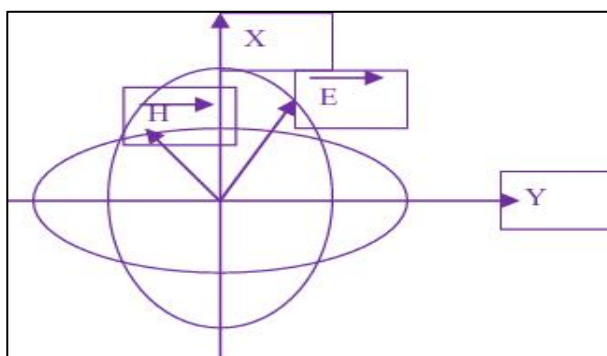


Figure II.17. Polarisation elliptique

2.2.3 Polarisation circulaire

Si l'extrémité du vecteur E ou de H décrit un cercle

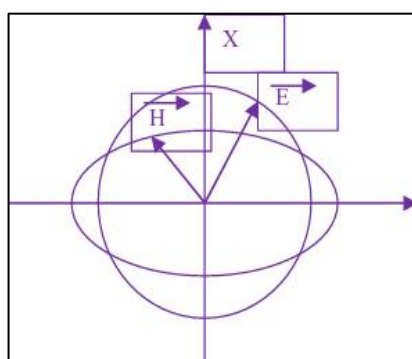


Figure II.18. Polarisation circulaire

Certaines antennes génèrent des ondes qui ont une polarisation circulaire ou elliptique : la polarisation varie au cours de la propagation

2.3 Les mécanismes de propagation

Les mécanismes de propagation sont les mécanismes et processus qui se produisent en présence d'une atmosphère standard, ceci inclut : la propagation en espace libre, la réflexion, la diffraction ainsi que la diffusion [20]

2.4 Propagation dans une atmosphère homogène

Un cas de propagation d'ondes électromagnétiques est la transmission entre un émetteur et un récepteur dans une atmosphère homogène (espace libre). Elle est définie comme une région dont les propriétés sont isotropes, homogènes et sans perte, sans influences de l'atmosphère terrestre.

Dans l'espace libre, le front d'onde électromagnétique se propage de manière uniforme dans toutes les directions depuis l'émetteur. Si l'on suit un point précis sur un front d'onde au fil du temps, l'ensemble des positions de ce point définirait un rayon qui coïnciderait avec une ligne droite reliant l'émetteur au récepteur.

2.5 Réflexion

La réflexion se produit lorsqu'une onde électromagnétique rencontre une surface de grande dimension lisse, comme une surface d'eau, et qu'une partie de l'énergie est renvoyée, cette onde continue à se propager selon un angle avec la surface égal à celui du rayon incident. L'intensité de l'onde réfléchi est déterminée par le coefficient de réflexion qui lui dépend de:

La fréquence et polarisation du rayonnement,

L'angle d'incidence,

La rugosité de la surface réfléchissante.

Pour des angles d'incidence faibles et de surfaces lisses (comme une mer calme), les valeurs du coefficient de réflexion sont proches de 1 (onde réfléchi aussi intense que l'onde incidente), ce qu'on appelle une réflexion spéculaire.

La loi de la réflexion stipule que l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion.

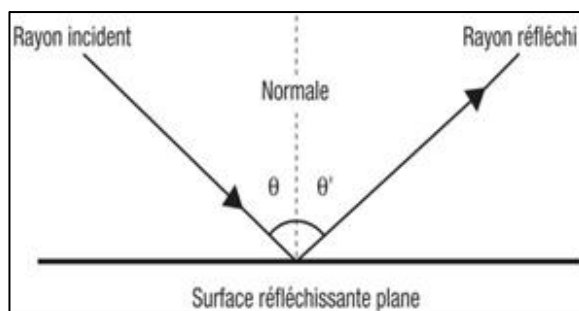


Figure II.19. Réflexion [20]

Les rayons réfléchis par différentes surfaces peuvent interférer de manière constructive ou destructive au niveau du récepteur, provoquant une propagation multipaths.

2.6 Diffraction

Lorsqu'un obstacle épais se trouve entre l'émetteur et le récepteur, l'onde ne va plus en ligne droite et se retrouve à se propager en suivant plutôt la courbure de l'obstacle et c'est ce qu'on appelle la diffraction présentée par le principe de Huygens où des ondes secondaires se forment derrière l'obstacle

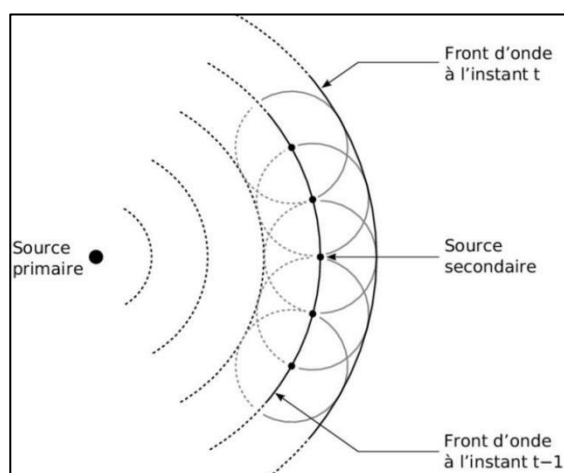


Figure II.20. Diffraction [20]

La capacité de l'onde électromagnétique à se propager dépend fortement de la fréquence, plus la fréquence est basse, plus la diffraction est marquée. Les systèmes de communication transhorizon exploitent ce principe.

Lorsque le dégagement du trajet radio par rapport au terrain est réduit, les phénomènes de diffraction surviennent et affaiblissent le signal reçu. Pour évaluer la distance minimale entre le trajet radio et un obstacle avant que les pertes par diffraction ne surviennent, on utilise le concept de première zone de Fresnel. [20]

2.7 Scattering

Lorsque des ondes électromagnétiques rencontrent une surface, avec certaines conditions, l'énergie n'est ni transmise ni absorbée par la surface, et les ondes sont simplement réfléchies dans une nouvelle direction. Il s'agit d'une réflexion idéale, conforme à la réflexion des ondes lumineuses sur les miroirs. La réflexion spéculaire constitue donc une approximation utilisable dans de nombreuses applications liées aux radiocommunications

Le critère de Rayleigh est utilisé pour l'analyse qualitative de la réflexion sur une surface. La question principale est alors : pour quelles valeurs de longueur d'onde, de rugosité superficielle et d'angle d'incidence la réflexion spéculaire se transforme-t-elle en diffusion diffuse ? quand une surface lisse devient-elle rugueuse ?

D'après le critère de Rayleigh [20], une surface est considérée comme lisse lorsque :

$$h < \frac{\lambda}{8 \cdot \sin \gamma} \quad (2.2.1)$$

Où :

h : Hauteur des irrégularités de surface (m)

λ : Longueur d'onde (m)

γ : Angle de rasance

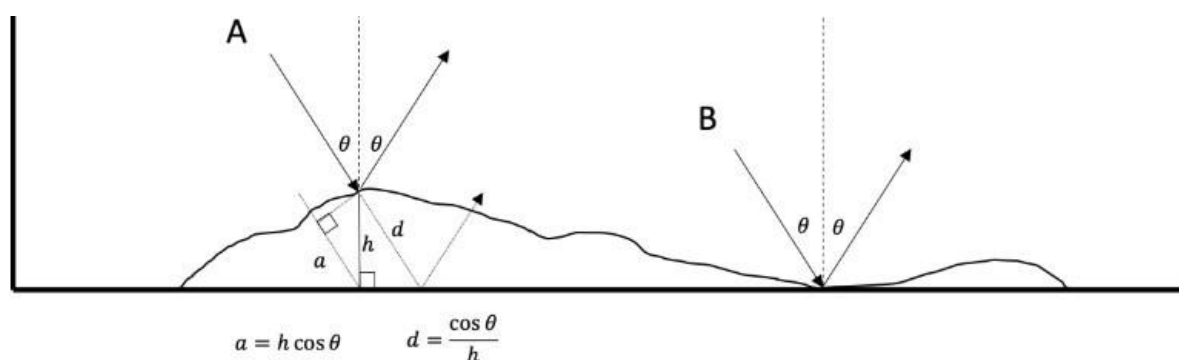


Figure II.21. Diffusion (Scattering) [20]

Si $h=0$ le rayon A se réfléchit sur la même surface de référence que le rayon B. La différence de phase dans provient de la distance $h \cos(\theta)$, qui selon la géométrie dans la figure ci-dessus correspond à la distance a . Le triangle rectangle utilisé pour définir a est formé d'une ligne parallèle au rayon A, de la distance h , et d'une ligne perpendiculaire au rayon A, ainsi, avec une hauteur h trop grande, on perd la réflexion spéculaire

3 Line of sight (LOS)

Les transmissions par FH nécessitent un trajet dégagé entre des antennes paraboliques, communément appelé condition de ligne de visée (LOS). Une LOS existe lorsqu'il y a un chemin direct entre deux points sans obstacles (bâtiments, arbres, collines ou montagnes).

Les trajets partiellement obstrués (Near-Line of sight) peuvent être analysés en incluant les

Pertes par effleurement ou diffraction dans les calculs de propagation, bien que ces trajets

Puissent être utilisés, les chemins totalement dégagés sont toujours préférés, car les temps d'interruption et la fiabilité calculée pour les trajets obstrués peuvent s'avérer peu fiables, la LOS prend en compte les ellipsoïdes de Fresnel et leurs critères de dégagement.

3.1 Zones de Fresnel et Règles de Dégagement

L'utilisation la plus courante des informations sur les zones de Fresnel est de vérifier la présence d'obstacles pénétrant la zone. Comme souligné précédemment, bien que la ligne de visée (LOS) soit essentielle, elle peut ne pas toujours suffire. Même si le trajet est dégagé visuellement, des obstacles (reliefs, végétation, bâtiments, etc.) pénétrant la zone de Fresnel entraîneront une atténuation du signal.

Les zones de Fresnel sont définies par un nombre ordinal correspondant au nombre de demi-longueurs d'onde représentant la différence de trajet de propagation par rapport au trajet direct.

Effet de la fréquence :

Plus la fréquence est élevée, plus la zone de Fresnel est étroite, augmentant ainsi la vulnérabilité aux effets hors LOS (atténuation par les obstacles).

Première zone de Fresnel :

C'est un ellipsoïde dont la surface correspond à une différence de trajet d'une demi-longueur d'onde.

Elle représente le volume le plus petit parmi toutes les zones de Fresnel.

Son rayon R (Figure 9) est le paramètre clé utilisé pour déterminer le dégagement nécessaire

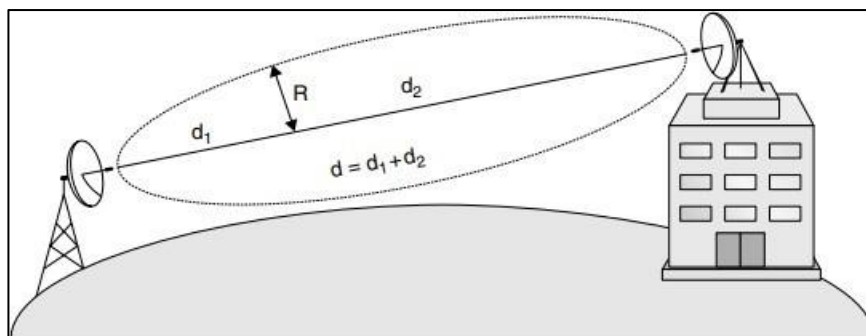


Figure II.22. Zones de Fresnel [20]

Formule générale (en supposant que $R_n \ll d_1$ $R_n \ll d_2$) pour calculer le rayon de la n-ème zone de Fresnel [11] :

$$F_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (3.1.1)$$

F_n : Rayon de la n-ème zone de Fresnel

n : numéro de la zone de Fresnel

λ : longueur d'onde du signal

d_1, d_2 : Les distances

$$F_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (3.1.2)$$

Pour la première zone de Fresnel, on obtient :

La zone de Fresnel est calculée le long du trajet, généralement pour chaque point topographique, garantissant ainsi une résolution comparable aux données de terrain. Typiquement :

La première zone de Fresnel ($n=1$) détermine les pertes par obstruction.

Si le dégagement entre le terrain et la ligne de visée est inférieur à $0,6F$ (60% du rayon de la première zone), une atténuation par diffraction se produit.

Les profils de trajet incluent souvent la première zone de Fresnel avec un ratio de 0,6 pour identifier visuellement les obstacles. Certains ingénieurs utilisent un ratio de 100% pour une marge de sécurité.

3.1.1 Effets de la Réfraction Atmosphérique

Les variations de l'indice de réfraction (exprimées par le facteur k du rayon terrestre) peuvent amener des irrégularités topographiques à intercepter partiellement ou totalement la zone de Fresnel.

Critères de Dégagement :

3.1.1.1 Conditions normales ($k = 4/3$)

Dégagement $\geq 100\%$ du rayon F_1 .

3.1.1.2 Cas critique (k minimal)

Dégagement $\geq 60\%$ du rayon F_1 .

3.1.1.3 Diversité d'espace

Dégagement $\geq 60\%$ à $k = 4/3$ + marge pour la croissance de végétation/bâtiments (≥ 3 m).

3.1.2 Réflexions et Zones Paires

Les zones de Fresnel paires ($N=2,4,\dots$) introduisent un risque d'interférences destructives si une surface réfléchissante (lac, route, désert) coïncide avec leur tangente. La différence de trajet entre le signal direct et réfléchi devient un multiple de demi-longueur d'onde, annulant partiellement le signal.

4. Plan de fréquence

Les bandes de fréquences sont des segments du spectre qui se tournent vers des usages particuliers, dans le domaine des FH les bandes de fréquences allouées pour l'entreprise Mobilis par l'ANF (Agence Nationale des Fréquences) sont : 6, 8, 11, 15, 18, 23 et 38,42GHz pour les bandes traditionnelles, ces bandes de fréquences sont divisées en canaux dans le but de transmettre un signal sans interférence et optimiser l'utilisation du spectre, leurs largeurs est de : 7, 14, 28, 56 et 112 MHz

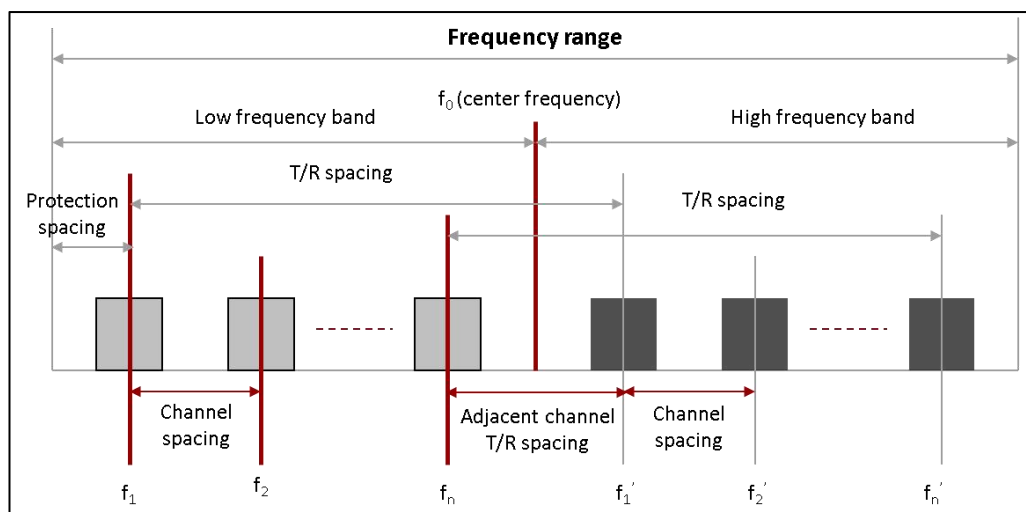


Figure II.23. Plan de fréquence [22]

Fréquence centrale : Elle représente le milieu du spectre utilisé par le signal délimitant les Fréquence haute (High) des Fréquence basse (Low) de la bande

High/low: Les radios, antennes, et filtres doivent être accordés précisément entre la fréquence low et high sinon ça engendre des distorsions et interférences.

Channel Spacing: représente la distance entre chaque canal évitant ainsi le chevauchement et assurant une isolation fréquentielle

La largeur du canal est déterminée par le spectre des signaux transmis, c'est-à-dire la capacité et le mode de modulation utilisés.

4.1 Modulation en FH

La modulation a pour objectif d'adapter le signal à émettre au canal de transmission. Cette opération consiste à modifier un ou plusieurs paramètres d'une onde porteuse centrée sur la bande de fréquence du canal, les paramètres modifiables sont :

L'amplitude : la base de la modulation ASK (Amplitude Shift Keying)

La fréquence : principe de la modulation FSK (Frequency Shift Keying)

La phase : modulation PSK (Phase Shift Keying)

La modulation QAM (Quadrature Amplitude Modulation) est une technique qui combine à la fois la modulation d'amplitude et la modulation de phase pour transmettre plus de bits par symbole. Utilisée fréquemment dans les technologies de communication

numérique, la liaison hertziennes repose principalement sur cette modulation, permettant d'envoyer plus de données sur une même bande passante.

			Channel Size 56MHz
Bits per Symbol	Modulation		Capacity Mbps
8	256	QAM	370
9	512	QAM	421
10	1024	QAM	472
11	2048	QAM	523
12	4096	QAM	575

Figure II.24 Capacité en fonction de la modulation (taille du canal 56 Mhz)

L'inconvénient de la modulation QAM est sa fragilité au bruit plus on envoie de bits par symbole, ainsi il faut garantir un SNR (rapport signal sur bruit) optimal, il existe un moyen pour garantir un débit maximal dépendamment des intempéries est la technique de codage AMC (Adaptative modulation and coding) Assurant une adaptation dynamique du niveau de modulation QAM

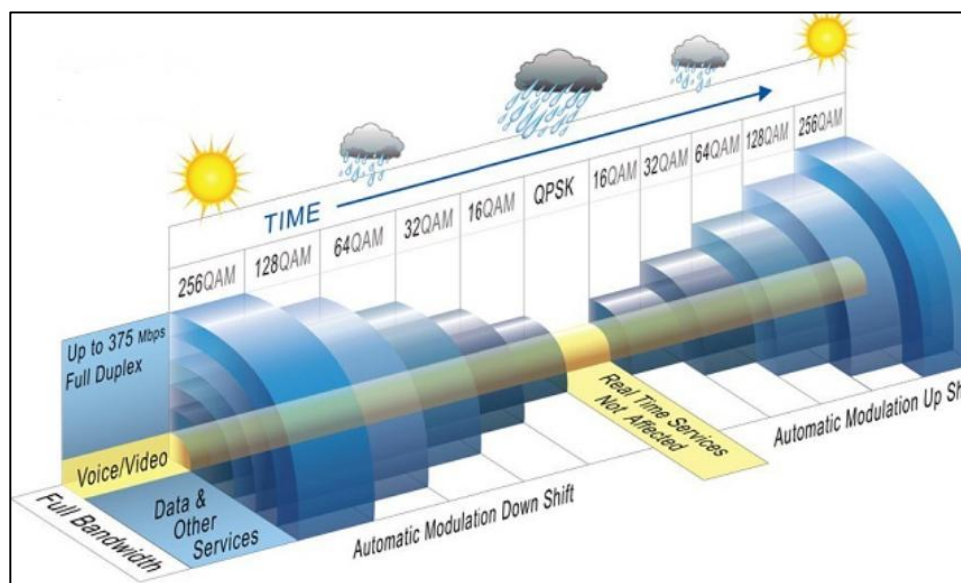


Figure II.25. Illustration de la modulation adaptative [23]

On a vu que chaque modulation plus dense nécessite un SNR plus élevé pour maintenir un faible taux d'erreur, n'empêche la limite théorique est donnée par Shannon-Hartley

4.2 Théorèmes de Shannon-Hartley

La limite de Shannon indique le débit d'information le plus élevé qui peut être atteint avec un taux d'erreur arbitrairement faible, compte tenu de la bande passante et du rapport signal-bruit. Elle établit une frontière théorique pour toute amélioration dans la conception des systèmes de communication modernes.

La capacité du canal est le débit maximal auquel l'information peut être envoyée avec une probabilité d'erreur qui peut être rendue aussi faible que voulu. La formule pour calculer ce taux maximal, en bps (bits par seconde) est :

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (4.2.1)$$

5 Le bilan de liaison

Le premier pas dans la conception d'un réseau FH est l'établissement d'une analyse du bilan de liaisons de l'installation. Le bilan de liaison déterminera quelle antenne de quelle dimension utiliser, la puissance exigée, la disponibilité du lien et le taux d'erreur, et en général, la satisfaction totale du client

5.1 Schéma d'une liaison hertzienne

Le schéma général d'une liaison FH est comme représenté dans la figure :

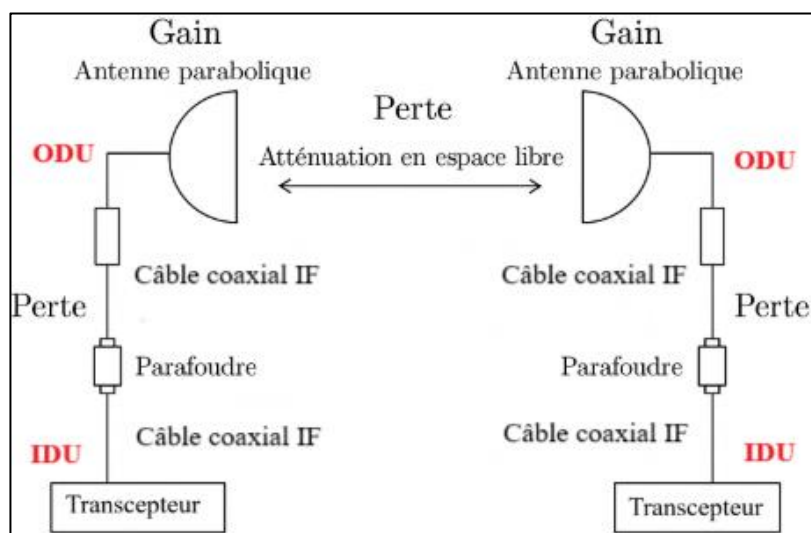


Figure II.26 Schéma d'une liaison hertzienne

À chaque extrémité de la liaison, on retrouve les éléments suivants :

Pylône d'une trentaine à une centaine de mètres, supportant l'antenne.

Antenne directive généralement parabole de 0,3–3,2 m de diamètre avec directivité élevée, qui transforme l'onde électrique en onde électromagnétique, et inversement pour l'émission/réception, elle est caractérisée par son Gain d'antenne G_E , exprimé en dBi.

ODU (Outdoor Unit), équipement radio extérieure installée auprès de l'antenne.

IDU (Indoor Unit), équipement intérieure de traitement, caractérisé par sa puissance émise P_E , exprimé en dBm.

Câble coaxial IF reliant l'IDU à l'ODU, à plus haute fréquence elle peut être réalisé en guide d'onde, caractérisée par son atténuation L_E , exprimée en dB.

Alimentation électrique –48 V DC Elle est caractérisée par son Gain d'antenne G_E , exprimé en dBi

Distance d : c'est la distance entre l'émetteur et le récepteur, on peut montrer qu'elle introduit une atténuation A_{EL} (pour atténuation en espace libre) en db égale à :

$$P_R = P_E - L_E + G_E - A_{EL} + G_R - L_R \quad (5.1.1)$$

5.2 Fade Margin

La valeur pour laquelle le niveau du signal reçu peut être réduit sans que les performances du système ne tombent en dessous d'un seuil spécifié, la valeur idéale se situe généralement entre 30 et 35 dBm.

$$\text{Fade Margin(dBm)} = \text{PRX (dBm)} - \text{Rx Sensitivity(dBm)} \quad (5.2.1)$$

5.3 principales perturbations

La sensibilité d'un récepteur est l'amplitude du signal qu'il faut appliquer à son entrée pour obtenir à la sortie du démodulateur un rapport signal/bruit déterminé, c'est la puissance minimale en dessous de laquelle la qualité de la liaison est dégradée : craquements importants pour une liaison audio, image dégradée en transmission vidéo et taux d'erreur important en transmission numérique

Pour qu'une liaison hertzienne fonctionne correctement, il faut que la puissance reçue soit supérieure à cette sensibilité, c'est pour ça que les cause d'atténuation sont pris en compte pour le choix du matériel

On retrouve comme cause :

5.3.1 Perte en espace libre

Atténuation due à la dispersion de l'onde dans l'espace et peut être très élevée (de l'ordre de 100–150 dB sur des dizaines de km), défini par la formule suivante:

$$FSPL(dB) = 20 \log_{10} (d_{km}) + 20 \log_{10} (f_{GHz}) + 92.45 \quad (5.3.1)$$

5.3.2 Perte pour cause de pluie

La pluie (Rain) est le facteur impactant au-dessus de 10 GHz. En cas de forte pluie, on mesure 5 dB/km d'atténuation à 13–15 GHz.

À 20–40 GHz, cette atténuation peut dépasser 10 dB/km, limitant la portée à quelques kilomètres même entre deux antennes de fort gain.

5.3.3 Perte pour cause Troposphérique

Les constituants gazeux et la température de l'atmosphère influencent la propagation des ondes à la fois par absorption d'énergie et par des variations de l'indice de réfraction.

L'absorption par les gaz est généralement négligeable en dessous de 12 GHz mais devient très importante dans des bandes tel que 60 GHz et 180GHz

5.4 Performance d'une liaison FH

La disponibilité d'un lien FH est la probabilité qu'il reste opérationnel à tout instant.

Les opérateurs visent généralement une disponibilité très élevée, soit 99,999 % du temps, ce qui correspond à environ 6 minutes de hors-service (downtime) par an, Cet objectif inclut les pertes causées par les perturbations citées

Afin d'assurer la disponibilité (availability) on utilise la technique de modulation dynamique ACM ainsi que ATPC Automatic Transmit Power Control, ce dernier permettant d'augmenter la puissance d'émission Tx pour compenser l'atténuation jusqu'à la fin des perturbations assurant l'acheminement du trafic prioritaire.

6 Classification des liaisons FH

Les liaisons FH se situent dans les gammes SHF (Super High Frequency, 3–30 GHz) et EHF (Extremely High Frequency, 30–300 GHz) définies par l'UIT.

Dans les bandes de fréquences traditionnelles, les FH peuvent atteindre un débit 300 Mbps à 1 Gbps. Grâce à l'exploitation de nouvelles bandes de fréquences (V Band & E Band) les FH pourront alors atteindre un débit 10 à 25 fois supérieur d'ici à 2025, mais sur de plus courtes distances. [24]

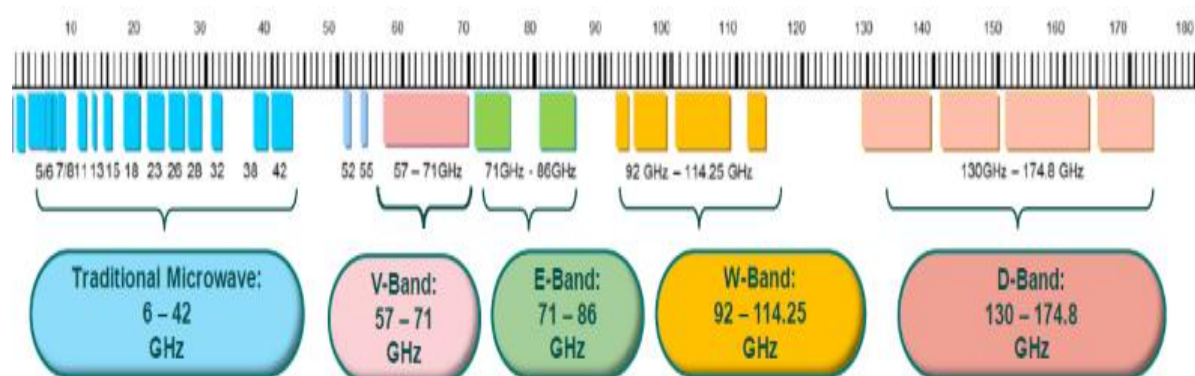


Figure II.27. La classification des bandes de fréquence FH [24]

V-band : la v-band est défini par l'IEEE comme étant la gamme de fréquence de 40 à 75 GHz. Souvent théorisé pour des communications a haute capacité, l'entrepris Mobilis a fait des tests sur cette band n'empêche, présentant beaucoup d'instabilité causé par les perturbations troposphérique elle fut abandonnée pour la E-band

E-Band : (généralement 71–76 GHz et 81–86 GHz) a acquis une importance particulière pour les FH ultra-haut débit

Elle a l'avantage d'avoir un large spectre, environ de 10 GHz (divisé en deux sous-bandes), ce qui permet des canaux extrêmement larges (jusqu'à 1–2 GHz voire plus). Permettant des débits de l'ordre de 10–20 Gbit/s par site

La très haute fréquence implique une atténuation plus forte, la portée pratique se limite de 1 à 3 km en conditions normales assurant le five 9s de disponibilité

La bande E complète la bande traditionnelle par des capacités beaucoup plus élevées sur courte distance, une solution multibande exploitent les deux (bande E + bande SHF) en parallèle pour combiner débit et portée [29]

7 Technologies et fonctionnalités utilisées dans les réseaux FH

Avec la 5G qui se répand dans le monde entier, il est impératif d'avoir une capacité de backhaul élevée pour obtenir des performances du réseaux d'accès radio (RAN) supérieures, non seulement en ville, mais aussi en banlieue et à la campagne. Les FH offrent de nombreuses façons d'augmenter la capacité des sites existants et de fournir une capacité élevée aux nouveaux sites, on retrouve les technologies suivantes :

7.1 Technique Multi-band booster (MBB)

La technologie Multi-band Booster d'Ericsson combine les avantages des bandes FH traditionnelles avec ceux de la bande E (70/80 GHz) cette approche hybride permet d'augmenter la capacité des bandes traditionnelles jusqu'à dix fois et d'étendre la portée de la bande E jusqu'à trois fois, cela signifie que la bande E peut être utilisée non seulement dans les zones urbaines denses, mais aussi dans les zones suburbaines sur de plus longues distances. [29]

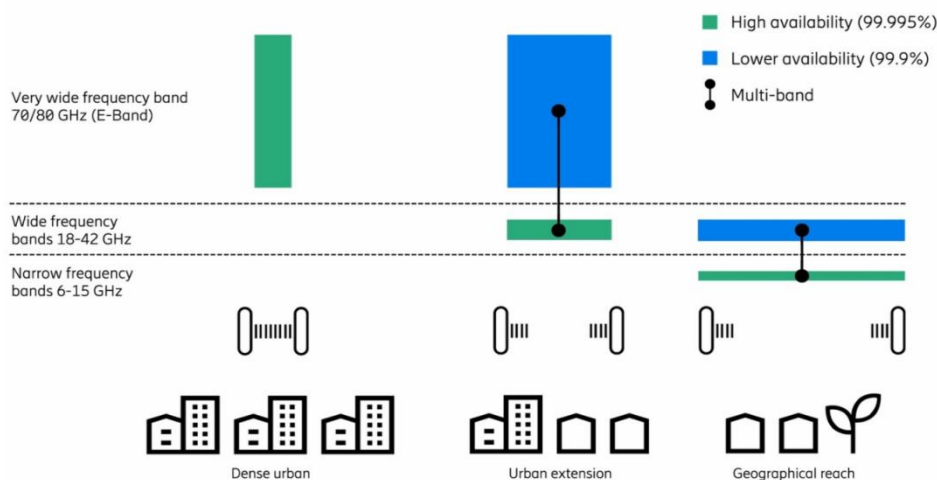


Figure II.28. Principe de la technologie Multibande Booster [29]

7.2 Fonctionnalité ACM/ATPC

L'ACM ajuste la modulation QAM selon la qualité du canal. L'ATPC ajuste automatiquement la puissance d'émission : en cas de pluie ou brouillard, la puissance transmise monte pour compenser l'atténuation, puis redescend lorsque qu'il n'y a plus de perturbation satisfaisant la disponibilité

7.3 Technique Agrégations de porteuses (Carrier Agrégation)

Plusieurs bandes de fréquences sont regroupées et attribuées à un utilisateur ce qui permet d'augmenter la vitesse maximale de transfert des données qui devient proportionnelle au nombre de porteuses utilisées. Les ressources peuvent ainsi être distribuées avec plus de souplesse entre les utilisateurs d'un réseau.[25]

7.4 Fonctionnalité Agrégation physique RLB /HRLB :

Agrégation physique (RLB, Radio Link Bonding) : ce procédé consiste à agréger plusieurs équipements FH sur le même chemin en les faisant fonctionner simultanément, par exemple, on peut lier deux radios E-band pour doubler le débit, ou agréger un lien de la bande traditionnel et un lien E-band.

Le HRLB (Hierarchical RLB) est une évolution du RLB classique. Il permet une agrégation hiérarchique de plusieurs groupes de liens radio à différents niveaux, par exemple, un système peut agréger deux liens de la bande traditionnel (intra-bande) dans un premier niveau de bonding, puis associer ce groupe avec un lien E-band (inter-bande) dans un second niveau de hiérarchie.

Il permet un ajout progressif de capacité et l'optimisation de l'usage spectre et coût [31]

7.5 Fonctionnalité XPIC (Cross-Polarization Interference Cancellation)

La technologie XPIC est une configuration spéciale visant à doubler la capacité sur un seul canal RF en utilisant la polarisation. Deux modems transmettent simultanément deux flux distincts sur la même fréquence, l'un en polarisation horizontale et l'autre en verticale. L'antenne dispose d'un duplexeur/coupleur (OMT) pour superposer ces deux signaux sur la même antenne, malgré l'orthogonalité, les signaux interfèrent mutuellement à cause d'imperfections et de parcours de propagation, d'où l'algorithme XPIC. À la réception, un processeur XPIC corrige l'interférence croisée en combinant les deux voies reçues, ce qui permet de récupérer les deux flux indépendants

En pratique, XPIC double ainsi la capacité (liaison 2x débit sur canal unique) tout en optimisant l'usage du spectre, cette solution exige deux modems, deux câbles IF et un OMT, et elle est plus coûteuse ; elle est utilisée quand la bande de fréquence est rare pour augmenter le débit sans devoir acquérir de nouvelle bande.[21]

7.6 Technique MIMO

Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) est une technologie d'antennes utilisée pour améliorer l'efficacité spectrale et la fiabilité dans les communications sans fil.

L'objectif principal de l'utilisation du MIMO dans les liaisons FH est d'augmenter la capacité jusqu'à N fois par rapport à un seul flux, en utilisant un seul canal mais plusieurs flux (N flux) et plusieurs antennes, dans les pays où le spectre est limité ou coûteux, elle représente une méthode importante pour répondre aux exigences de la 5G.

En MIMO 2×2 , deux antennes transmettent simultanément deux flux indépendants. En MIMO 4×4 , on utilise deux antennes physiques dual-pol (2×2 polarisations) pour obtenir quatre flux, l'idée est similaire au XPIC (flux parallèles sur un même canal RF), mais le MIMO repose sur la propagation spatiale et la désintégration des signaux multi-path plutôt que sur la polarisation.[25]

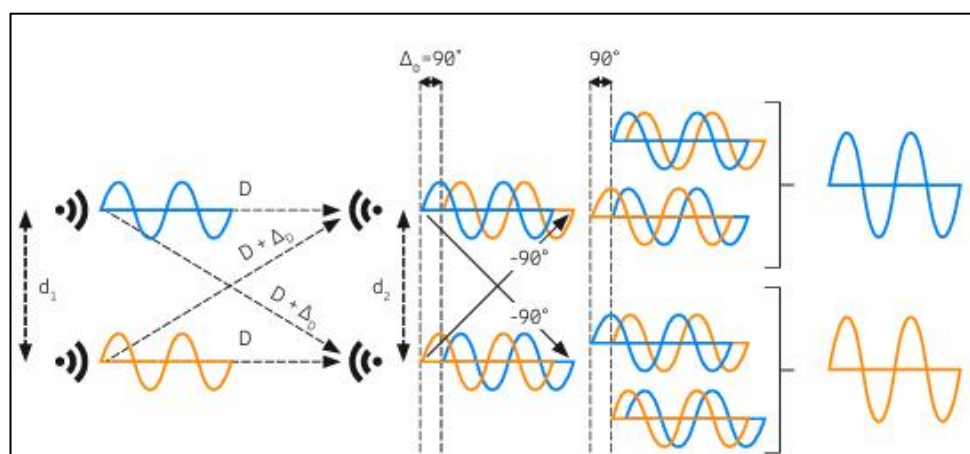


Figure II.35. Visualisation de la technologies MIMO[25]

8 Structure d'une liaison hertzienne

Chacun des éléments cités dans le sous-titre 5.1 est dimensionné selon les exigences de portée, de débit et de fiabilité de la liaison.

8.1 Équipement

8.1.1 Unité intérieure (IDU)

L'IDU est l'équipement intérieur (souvent monté en rack 19") qui réalise la conversion entre le trafic utilisateur et les signaux radio du faisceau. Il assure la modulation

numérique des données entrantes et la démodulation des signaux reçus et gère la matrice de canaux et la synchronisation du lien.



Figure II.29. Exemple d'un IDU du fournisseur ERICSSON [26]

8.1.2 Unité extérieure (ODU)

L'ODU est l'unité radio fixée à l'antenne. Elle reçoit le signal IF de l'IDU via le câble coaxial et effectue la conversion vers la fréquence porteuse RF pour l'émission. En sens inverse, elle convertit le signal RF reçu en signal IF renvoyé à l'IDU, L'ODU contient les émetteurs (amplificateur HF) et récepteur, ainsi que les filtres et le traitement de polarisation (horizontal/vertical). Il est conçu pour fonctionner en extérieur (boîtier étanche) sur le toit ou le pylône, parfois monté directement sur la même plaque que l'antenne via un guide d'onde



Figure II.30. Exemple d'ODU[27]

8.1.3 Antennes

Les antennes FH sont principalement des paraboles à haut gain, elles focalisent l'énergie électromagnétique en un faisceau étroit (ouverture de quelques degrés) pour atteindre l'autre site, la polarisation (Verticale ou Horizontale) est choisie selon la configuration du lien, l'antenne réalise en réception la transformation inverse en transformant l'onde reçue en signal électromagnétique, sa taille dépend de la fréquence et de la portée souhaitées : plus la distance et la bande de fréquence sont élevées, plus le diamètre de la parabole est grand (jusqu'à ~3 m) pour compenser les pertes en espace libre



Figure II.31. Antenne parabolique FH

8.2 Configuration des liaisons hertziennes

Dépendamment de ce qu'on cherche à réaliser en termes de capacité ou de fiabilité, on peut opter pour différentes configurations

8.2.1 Configuration 1+0

La configuration 1+0 est la plus simple : un seul lien radio actif dans les deux sens, sans protection elle offre la capacité de base de la liaison mais sans redondance.

Cette solution à coût moindre est adaptée aux liaisons peu critiques où un arrêt temporaire est tolérable, en cas de panne d'équipement, la liaison s'arrête totalement. Le 1+0 est donc simple à déployer et économique, mais la disponibilité est limitée par la MTBF (Temps moyen entre pannes) de l'équipement.

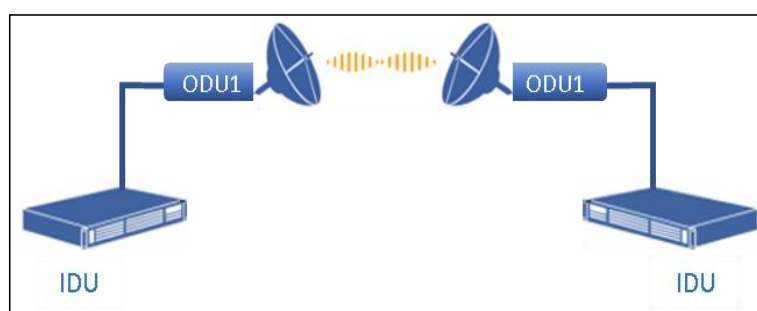


Figure II.32. Configuration 1+0 sans protection

8.2.2 Configuration 1+1 (Hot Standby)

La configuration 1+1 vise la haute disponibilité : deux liaisons indépendantes sont installées en parallèle, l'une active et l'autre en veille (protection). Dans le mode hot-standby, un seul équipement transmet à la fois et le second reste inactif jusqu'à un basculement en cas

de défaillance, Le basculement automatique prend quelques dizaines de millisecondes, avec une courte interruption de service.

En mode HSB le second lien est synchronisé en permanence : la commutation n'est pas interrompue.

Le 1+1 double le coût (deux fois l'IDU, ODU et l'antenne) mais garantit une continuité de service. Cette configuration est utilisée pour des liens critiques

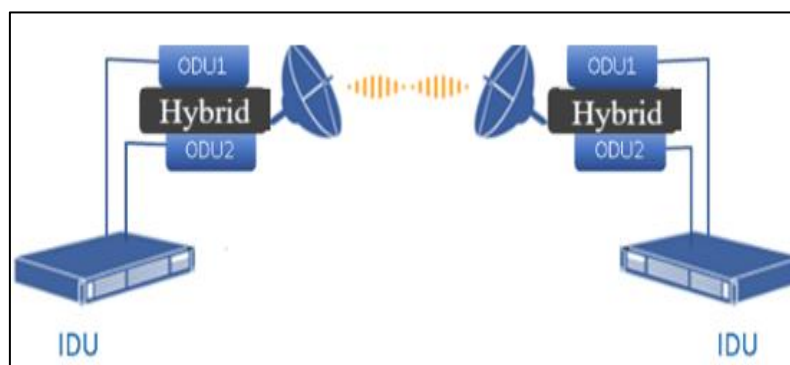


Figure II.33. Configuration 1+1 avec protection

8.2.3 Configuration 2+0

La configuration 2+0 emploie deux liaisons radio actives en parallèle sans aucune redondance, l'objectif est d'augmenter le débit en installant deux radios (deux ODU et deux antennes) qui transportent deux canaux distincts de données, il existe plusieurs variantes :

2+0 en bande dédiée (split) : on utilise deux fréquences ou porteurs distincts, chaque radio ayant son propre canal. Cela double le débit mais ne protège pas contre la perte d'un des canaux.

2+0 XPIC : deux radios utilisent la même fréquence mais avec une polarisation orthogonale différente (H/V). Chaque radio dispose d'une polarisation exclusive, cela double la capacité spectrale sans consommer de largeur de bande supplémentaire.

Dans les deux cas, le 2+0 double la capacité de la liaison (par rapport à 1+0) mais n'offre pas de protection, si l'une des radios tombe en panne, on perd la moitié du débit. Le 2+0 est donc un compromis entre la capacité et le coût, plus de matériel mais prix inférieur au 1+1, car on n'ajoute pas de protection active).

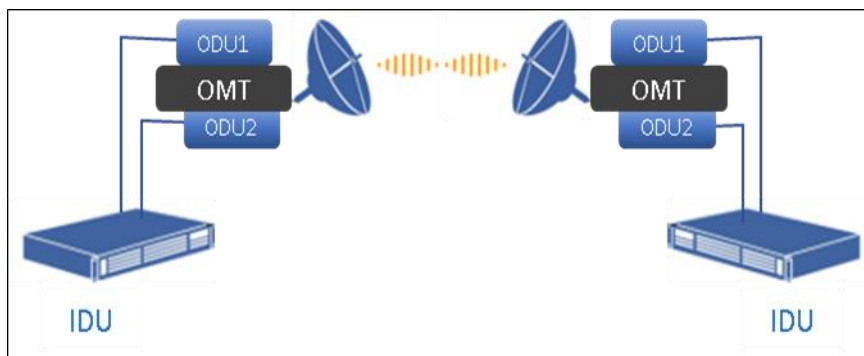


Figure II.34. Configuration 2+0 XPIC

8.2.4 Configuration 4+0

La configuration 4+0 étend le concept du 2+0, quatre canaux actifs (quatre radios/antennes) sont déployés en parallèle, chacun sur une fréquence ou polarisation différente, on obtient ainsi une multiplication par quatre de la capacité possible, la fiabilité globale augmente (la perte d'un seul canal n'interrompt pas totalement la liaison)

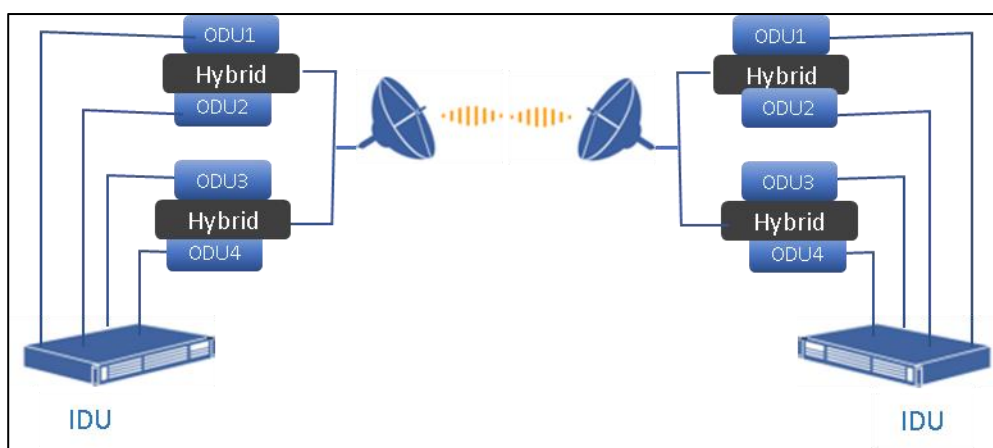


Figure II.34 Configuration 4+0

9. Conclusion

La fibre optique représente le moyen le plus rapide pour transporter les informations, mais son coût élevé ainsi que son temps de déploiement très long en font un désavantage, c'est pour ça que les faisceaux hertziens sont un bon candidat pour assurer les réseaux de transport moderne avec les nouvelles technologies dans le domaine.

Chapitre III :

Dimensionnement d'un réseau de transport 5G

1. présentation du logiciel de planification « Ellipse »

Tous les opérateurs télécoms passe par la phase de planification et de dimensionnement d'un réseau, cette étape est primordiale avant le déploiement de son réseau. Plusieurs logiciels de dimensionnement existent tel que : Pathloss 6, Ellipse

Ellipse est un outil de planification et d'ingénierie de réseaux de transport télécom, développé par la société Infosim (anciennement Marconi / Ericsson selon les versions). Il est spécialement conçu pour assister les opérateurs et ingénieurs dans la conception, l'optimisation et la gestion des réseaux de transport, notamment FH (Faisceaux Hertziens), SDH, ou fibre optique.

Dans notre projet de fin d'étude nous allons utiliser le logiciel « Ellipse version : 8.7.0.117 » qui est l'outil de simulation utilisé par ATM Mobilis, il nous permettra de dimensionner un réseau 5G.

Notre travail consiste à :

Créer 39 sites situés dans la wilaya de Tizi-Ouzou pour réaliser un réseau de 4ème génération puis initier l'évolution de l'infrastructure urbaine vers une architecture de Smart City en intégrant la 5G sur des points stratégiques du centre-ville.

Voici les étapes suivies dans notre projet :

1.2 L'ouverture du logiciel de planification



Figure III.36. Ouverture du logiciel Ellipse

Dans la page d'accueil on trouve plusieurs icônes :

Une icône «New Project » pour créer un nouveau projet

Des icônes complémentaires pour faire une démonstration et pour avoir une aide sur le fonctionnement du logiciel (Demo Project, Take a Tour, Help)

En bas on trouve les projets récents ainsi que l'édition et la version d'Ellipse

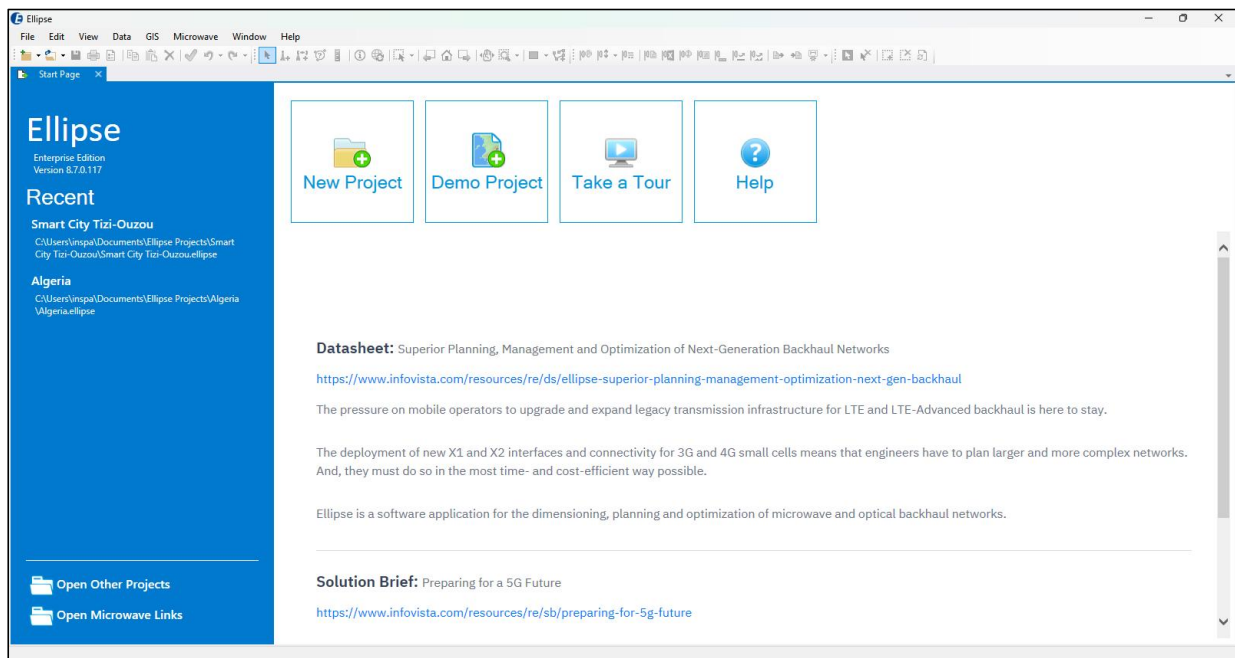


Figure III.37. Page d'accueil du logiciel Ellipse

Configuration du nouveau projet : ce qui implique :

- Attribution du nom du projet: Smart City Tizi-Ouzou
- Importation des données géographiques nécessaires de la région de Tizi-Ouzou comportant :
 - la projection UTM (Transverse universelle de Mercator),
 - L'élévation par rapport au niveau de la mer
 - les délimitations de la carte

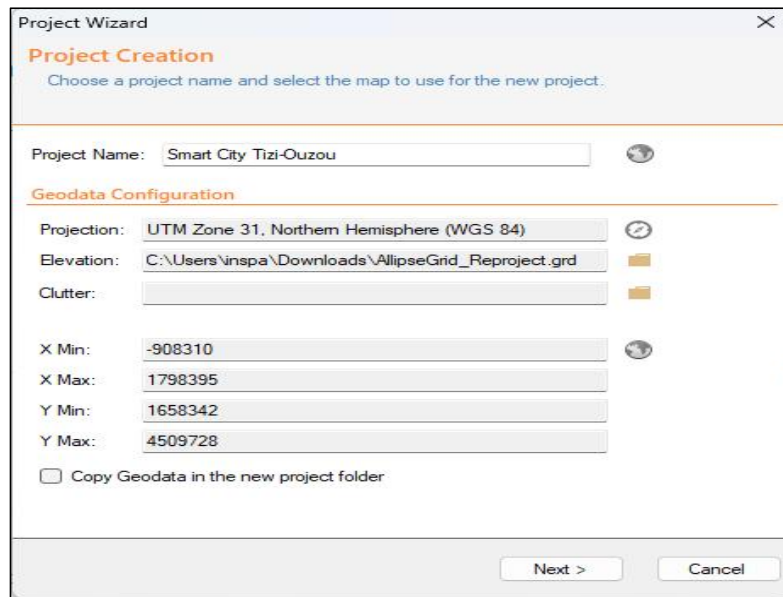


Figure III.38. Paramétrage de création de projet

Après avoir cliqué sur suivant 'next', on a eu une fenêtre de la région de Tizi-Ouzou (avec les reliefs) qui est la région de notre projet

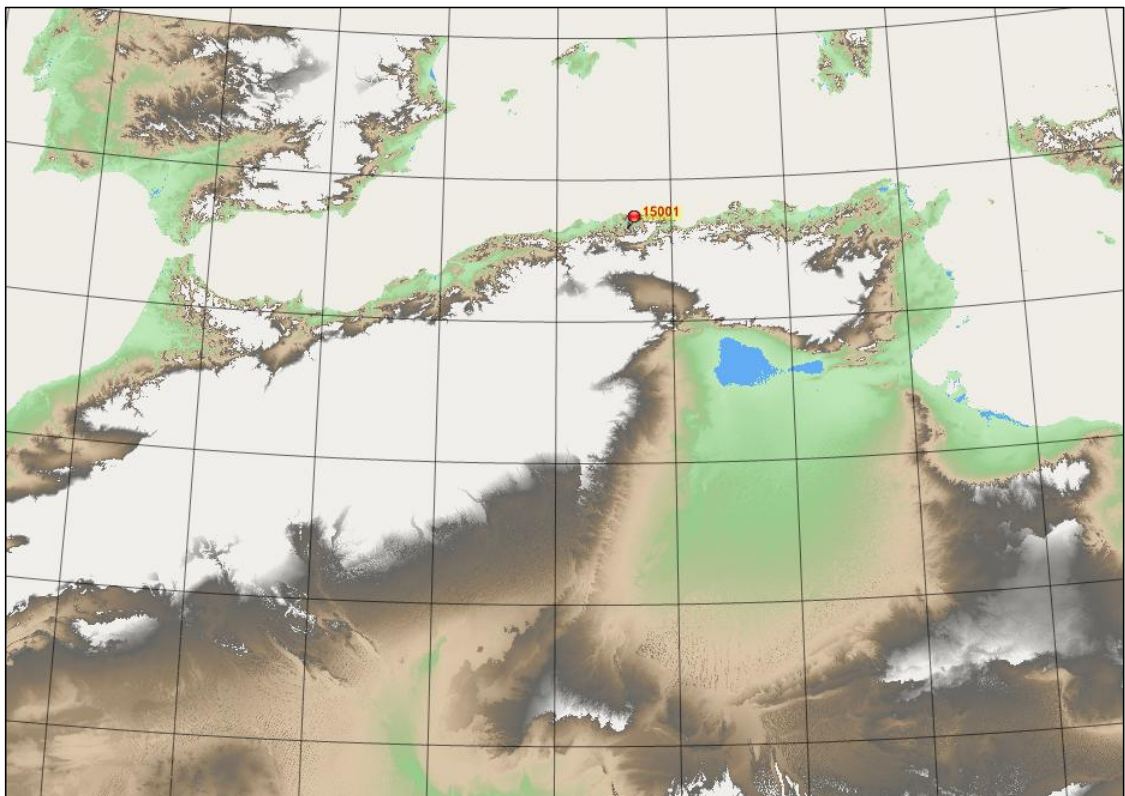


Figure III.39. la représentation géographique de Tizi-Ouzou sur Ellipse

Créer un site : en cliquant sur l'icône «Site creation» pour rajouter un nouveau site

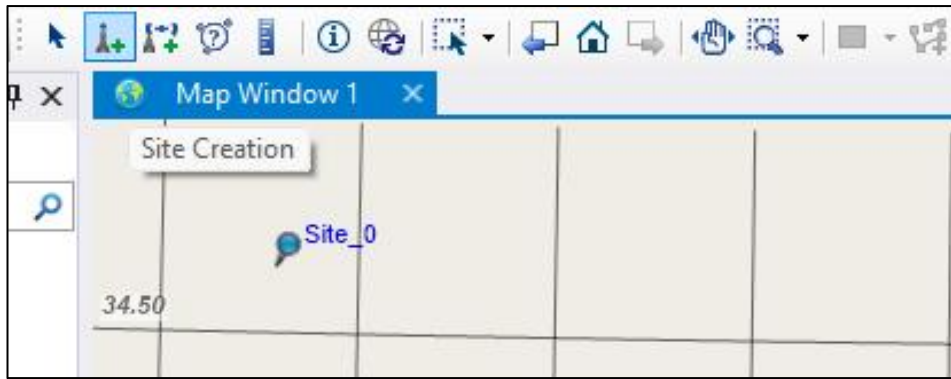


Figure III.40. la représentation géographique de Tizi-Ouzou sur Ellipse

- on pourra introduire plusieurs paramètres pour chaque site tel que :

-**Nom du site** : sous le format : numéro de wilaya + un chiffre donné par défaut

-**Longitude** : Distance angulaire à un méridien d'origine, vers l'Est ou l'Ouest du site

-**Latitude** : Distance angulaire à un méridien d'origine, vers le Nord ou le Sud du site

-**Élévation** : élévation par rapport à la mer qui est contenue dans le fichier Geodata

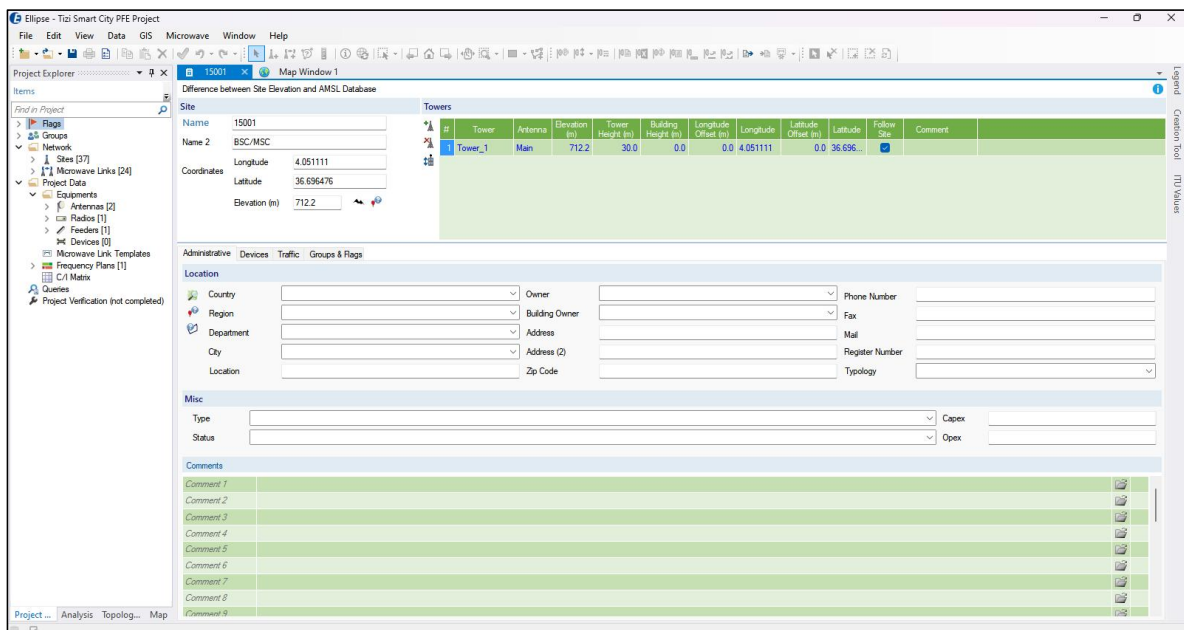


Figure III.41. fenêtre des paramètres du site et des coordonnées GPS

- Le «Microwave Link Creation» permet de créer une liaison entre deux sites

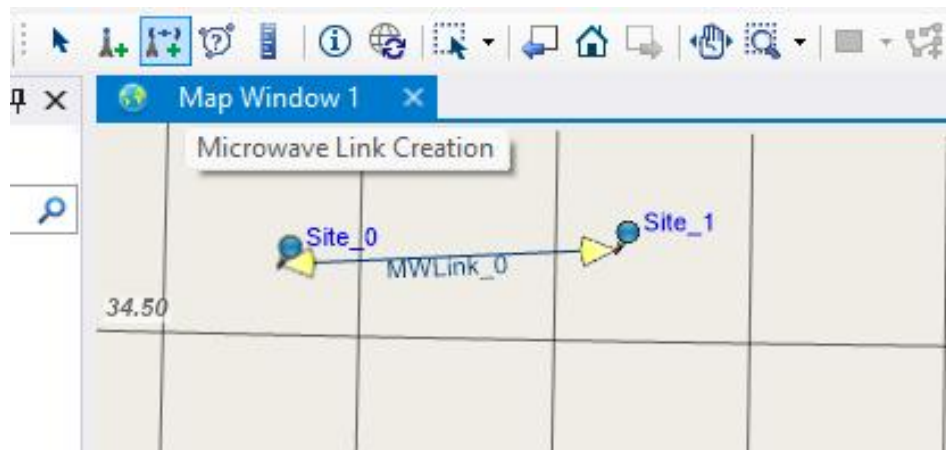


Figure III.42. Création d'une liaison

1.3 La ligne de mire (LOS) : Pour s'assurer de la visibilité, on distingue trois cas :

- **Visibilité totale :** aucun obstacle entre les deux antennes

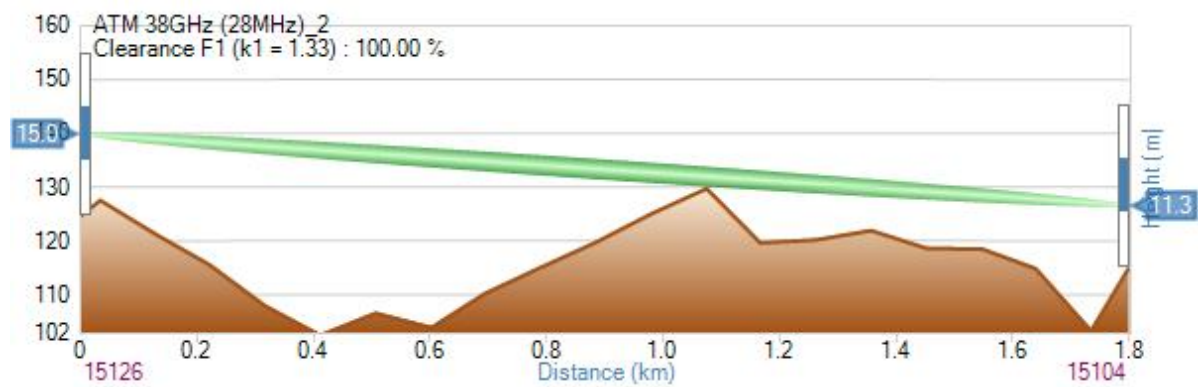


Figure III.43. LOS

- **Near LOS :** Visibilité moyenne pas idéal mais la ligne de mire est praticable

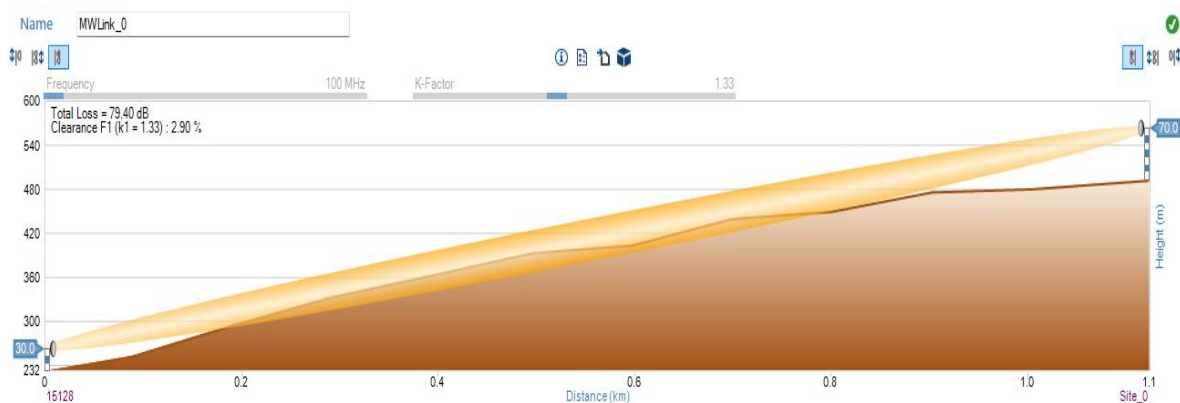


Figure III.44. Near LOS

- **NON LOS** : aucune visibilité, dans ce cas, les ondes électromagnétiques, comme les faisceaux hertziens, ne peuvent pas se propager en ligne droite, ce qui empêche ou dégrade fortement la communication.

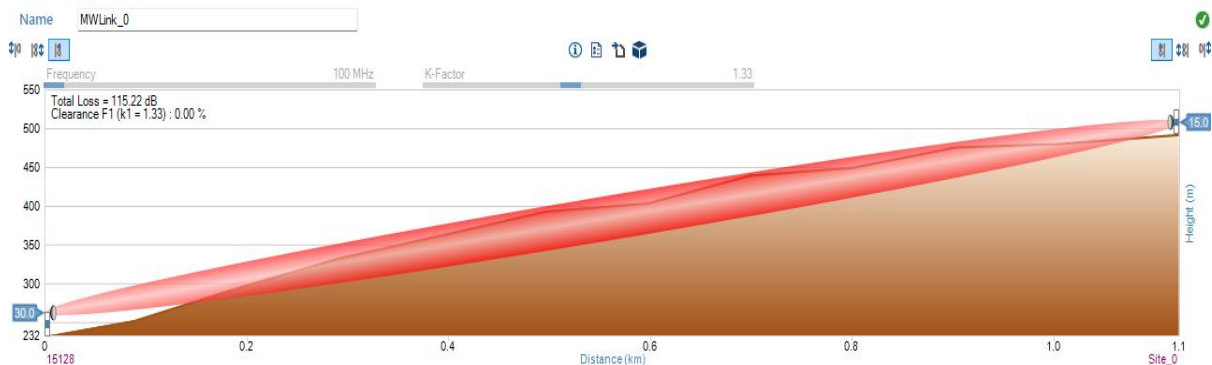


Figure III.45. NLOS

2. Dimensionnement et planification d'un cas pratique

Dans cette partie nous décrirons en détail les diverses étapes que nous avons mises en place pour concevoir un réseau de quatrième génération (4G) à Tizi-Ouzou. Ce réseau comprend 38 liaisons qui connectent 39 sites radio, dont : 2 sites sont des sites appelés sites HUB (un localisé au GIR de Tizi, le 15002, et le second à Baloua c'est le 15003), et un BSC/RNC et en même temps MSC/MME (en plein centre-ville de Tizi-Ouzou, le 15001)

Tout d'abord, Nous avons mis en place les 38 sites, chaque site possède ses propres informations (le nom, les coordonnées GPS et l'élévation)

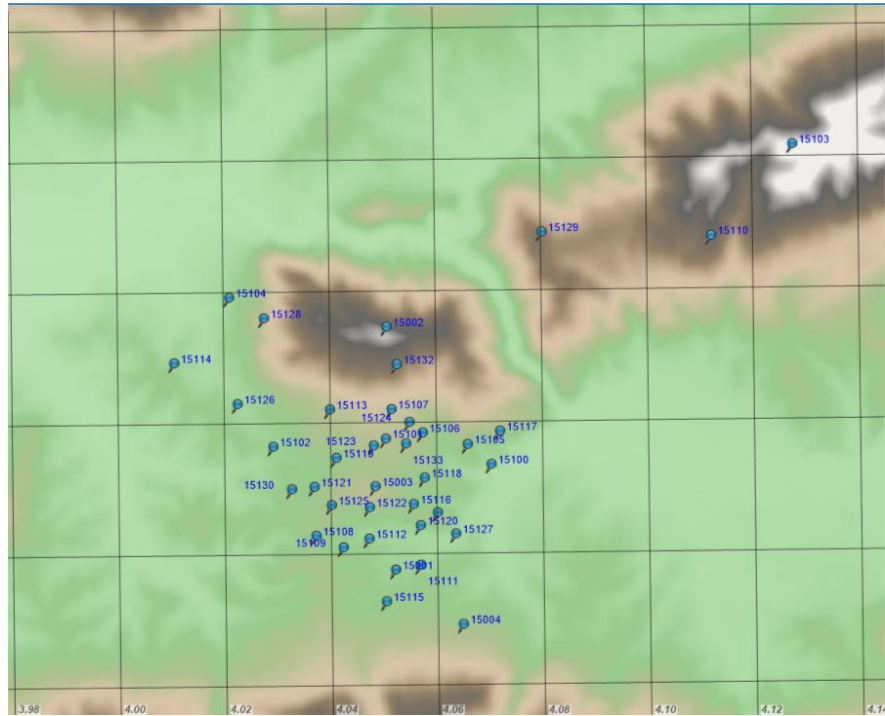


Figure III.46. les 38 sites créés sur Ellipse

Ensuite, Nous avons créé des liaisons FH pour relier de façon optimal tous les sites à la station de base MSC/BSC

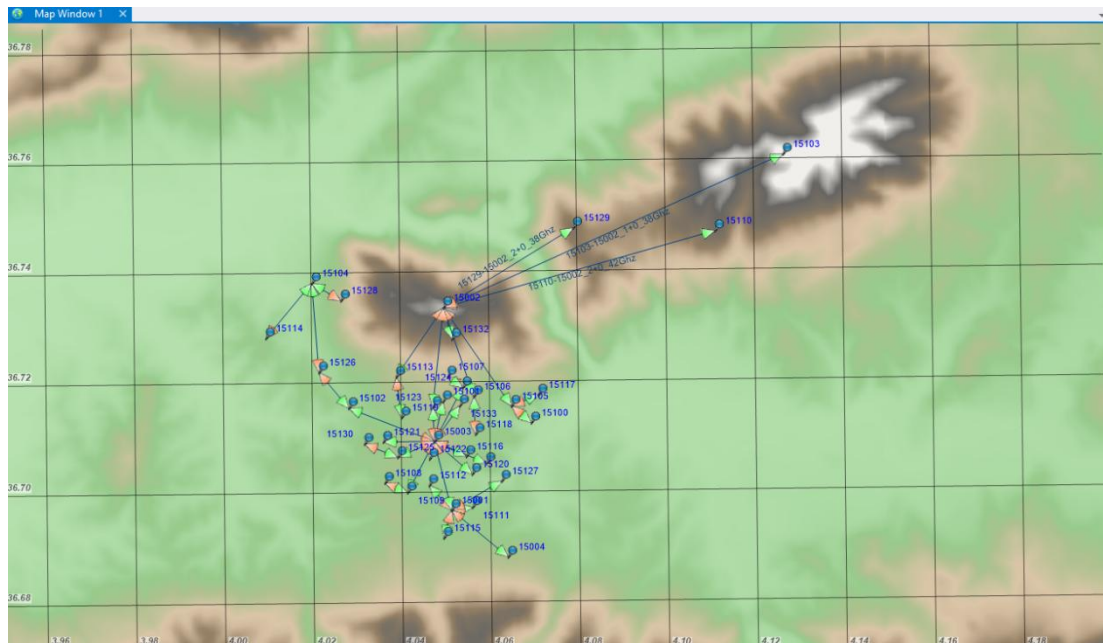


Figure III.47. les 37 liaisons de la région de Tizi-Ouzou

Nous trouvons 3 types de sites après les avoir tous relié :

Les sites terminaux : sont connecté vers un seul autre site càd se situent au bout de la chaîne transmission par exemple les sites (15129, 15103, 15110).

Les sites relais : sert d'un intermédiaire entre un ou plusieurs sites (par exemple le site 15125, 15105, 15106) afin d'étendre la portée du réseau et de pallier les différents problèmes tel que NLOS en contournant les obstacles.

Les sites hub : accueille plusieurs sites, généralement supérieur à 3 sites jusqu'à une trentaine, on retrouve par exemple le (15002 et le 15003)

2.1 Paramétrage et dimensionnement du notre réseau

2.1.1 Le choix de l'antenne

Le choix des antennes et des radios est primordial, la figure suivante montre l'espace de paramétrage de l'antenne :

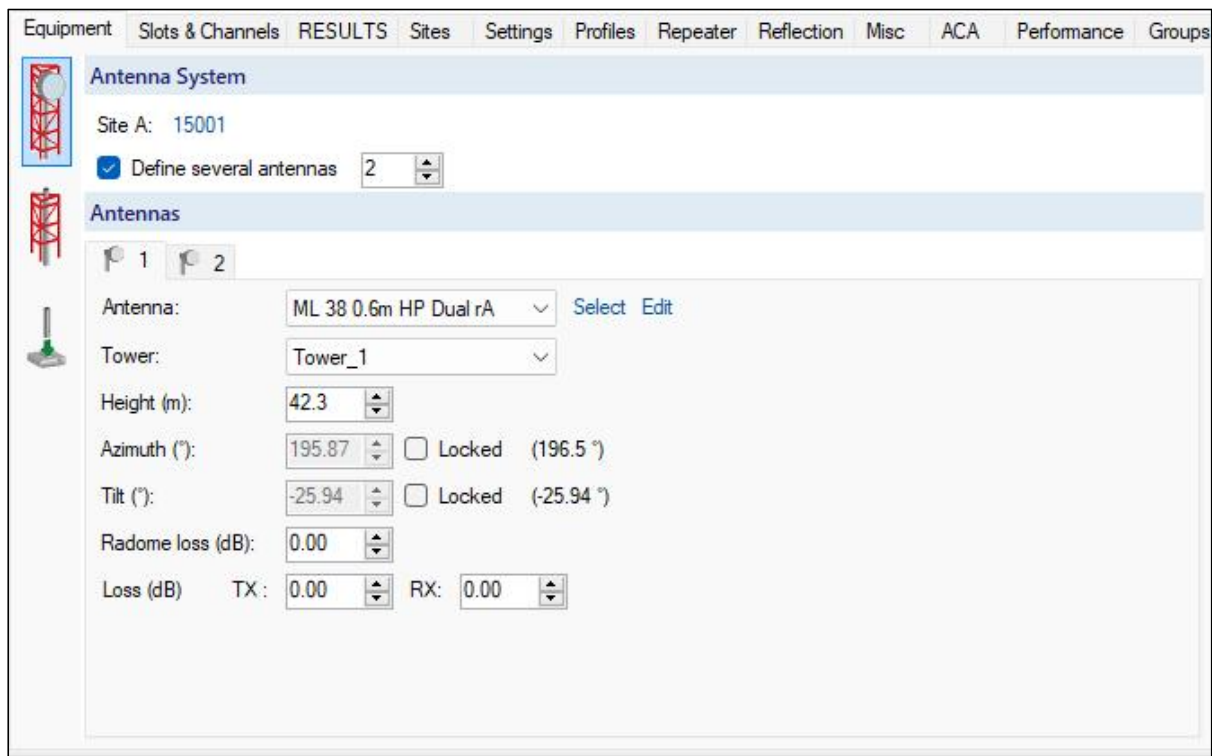


Figure III.48. Onglet du choix d'antenne sur Ellipse

Comme étant que la longueur de base d'une antenne doit correspondre au moins à la moitié de la longueur d'onde des ondes radioélectriques qu'elle doit émettre ou recevoir, on se retrouve avec le tableau suivant :

Table III.1 Diamètre d'antenne en fonction de la distance

Diamètre d'antenne	Distance à parcourir
0.2 - 0.6	<10 Km
0.6 - 1.2	10 -15 Km
1.2 - 2.4	10 - 30 Km
1.8 - 2.4	25 - 40 Km

Le nom d'une antenne sur Ellipse indique ses différentes spécificités, si on prend comme exemple la **ML FQ 0.6m HP Dual rA** on retrouve :

ML: C'est un modèle de l'antenne fabriqué par Ericsson 'Mini Link'

FQ: Représente la bande de fréquence adapté pour cette antenne

0.6m : C'est le diamètre de l'antenne

HP DualrA : Signifie qu'elle l'antenne est compatible avec la double polarisation H/V

2.1.2 Choix de la radio

Le choix des caractéristiques de nos **radios** s'est basé sur :

La distance entre les sites : ainsi plus la distance est basse plus la fréquence qu'on devra choisir sera élevée

Table III.2 Fréquence en fonction de la distance

Frequency link band	Distance maximale permise
7 GHz	>30 Km
13/15/18 Ghz	15 Km jusqu'à 30 Km
23/26 GHz	5 Km jusqu'à 15 Km
38 GHz	< 5 km

L'espacement des canaux : 7 MHz, 14 MHz, 28 MHz, 56 MHz ,112MHz

La modulation: 4QAM, 8QAM, 16QAM, 32QAM, 64QAM, 128QAM, 256QAM, 512QAM, 1024QAM, 2048QAM, 4096QAM, 8KQAM

2.2 La configuration des liaisons hertziennes correspondantes

En fonction de la bande de fréquence disponible et des exigences de capacité, nous avons adopté différentes configurations de liaison FH, notamment en 1+0, 2+0 et 4+0. nous avons mis en place une modulation adaptative, avec comme modulation de référence le 64 QAM. Cette dernière sert de seuil d'évaluation de la qualité de la liaison, notamment pour garantir un taux de disponibilité de 99,999 % de l'année ainsi qu'une marge de tolérance suffisante (Fade Margin) face aux affaiblissements.

2.2.1 Marge de tolérance (Fade Margin)

C'est la différence entre la puissance du signal reçu à l'entrée du démodulateur et le seuil de puissance minimal que doit recevoir le récepteur pour assurer une démodulation correcte, cette marge doit être en général dans les environs de 30 dBm pour la bande traditionnelle et ~27dBm pour la bande E pour satisfaire les objectifs de disponibilité et les performances fixés.

Grâce à l'outil «Power optimization» le logiciel calcule directement les puissances optimales pour correspondre à la marge de tolérance indiquée.



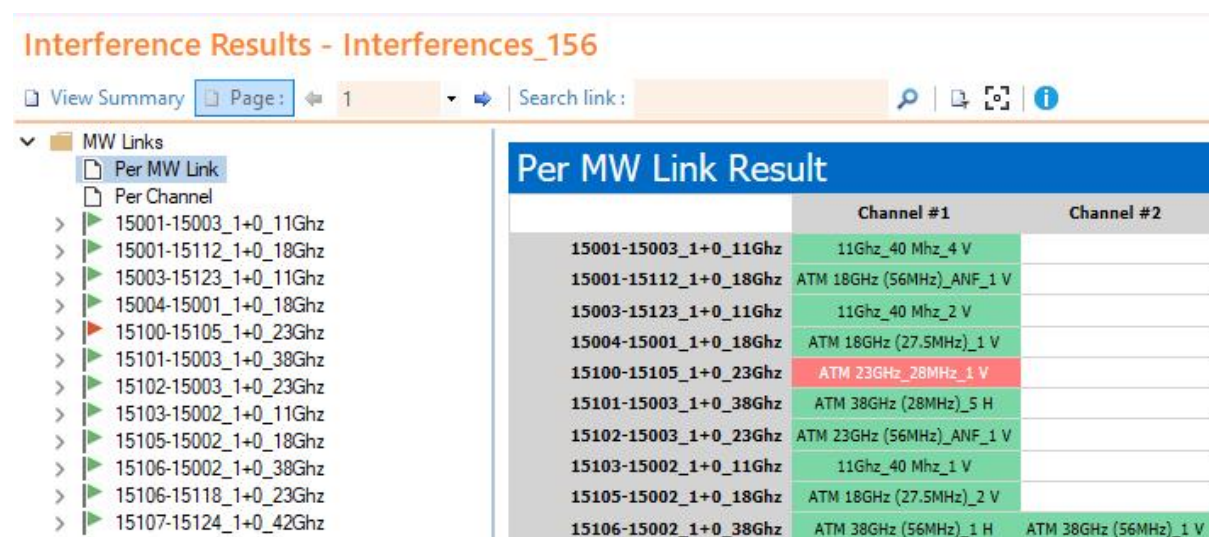
Figure III.49. l'interface "Power optimization" pour la liaison 15128-15104

2.3 Calcule d'interférence

Après avoir configuré nos liaisons on utilise l'outil intégré sur Ellipse 'Interference analysis'.

C'est un outil majeur qui sera utilisé après le paramétrage de chaque liaison afin de s'assurer que ça ne crée pas une interférence avec une autre liaison de notre réseau mobile.

Cette option vérifie les interférences et nous les affiche en précisant les liaisons concernées ainsi que le type d'interférence, après cela on va procéder aux correctifs nécessaires pour ne plus avoir de problèmes entre les liaisons.



The screenshot shows the 'Interference Results - Interferences_156' interface. On the left, there is a tree view under 'MW Links' with 'Per MW Link' and 'Per Channel' expanded. The tree lists various frequency ranges like '15001-15003_1+0_11Ghz'. On the right, a table titled 'Per MW Link Result' displays the following data:

	Channel #1	Channel #2
15001-15003_1+0_11Ghz	11Ghz_40 Mhz_4 V	
15001-15112_1+0_18Ghz	ATM 18GHz (56MHz)_ANF_1 V	
15003-15123_1+0_11Ghz	11Ghz_40 Mhz_2 V	
15004-15001_1+0_18Ghz	ATM 18GHz (27.5MHz)_1 V	
15100-15105_1+0_23Ghz	ATM 23GHz_28MHz_1 V	
15101-15003_1+0_38Ghz	ATM 38GHz (28MHz)_5 H	
15102-15002_1+0_11Ghz	ATM 23GHz (56MHz)_ANF_1 V	
15102-15003_1+0_23Ghz	11Ghz_40 Mhz_1 V	
15103-15002_1+0_18Ghz	ATM 18GHz (27.5MHz)_2 V	
15106-15002_1+0_38Ghz	ATM 38GHz (56MHz)_1 H	ATM 38GHz (56MHz)_1 V

Figure III.50. Test d'interférence entre les liaisons

On a eu affaire à deux types d'interférences :

2.3.1 Interférence sur le canal adjacent :

Lors d'une transmission FH, on utilise une communication bidirectionnelle avec des canaux en duplex, c'est à dire qu'on utilise une voie aller et une voie retour.

Les deux voies utilisent des fréquences différentes dans la bande : l'une en haute fréquence et l'autre en basse fréquence, autrement appelé la parité d'un lien FH.

Exemple sur liaison entre le site 15003 et le BSC/MSC/MME 15001 :

Site 15001 émet en basse fréquence

Site 15003 émet également en basse fréquence

Ce qui crée un conflit qu'on peut régler en inversant la parité d'un des deux sites :

NB: Lorsqu'un site est attribué d'une haute ou basse fréquence il devra le rester avec toutes les autres liaisons du réseau.

2.3.2 Conflit de polarité :

La polarité c'est l'orientation du champ magnétique lors de l'émission on retrouve :

La polarisation horizontale (H)

La polarisation verticale (V)

On peut configurer une antenne pour une polarisation **H** ou **V** l'autre, mais grâce à l'**XPIC** on peut utiliser les deux en simultanément.

Quand on a deux liaisons proches géographiquement on peut se retrouver avec des conflits de polarité ce qui peut entraver les performances de notre liaison et augmenter le taux de perte (BER)

2.4 Bilan de liaison

Disponibilité de la liaison 15XXX-15XXX							
Channel - ATM xxGHz_xxMHz_V/H							
Scheme	TX Power (dBm)	Threshold (dBm)	RX Level (dBm)	Rain (Av. %) Annual / Worst Month	Multipath (Av. %) Annual / Worst Month	% Time Annual / Worst Month	Maximum Throughput (Mbit/s)
Adaptive Modulation							
559Mbps-4096QAM_light	A: 0 B: 0	B: -49 A: -49	B: -38.08 A: -37.78	AB: 99.99999345 / 99.99992139 BA: 99.99999725 / 99.99996699	AB: 100 / 99.99999998 BA: 100 / 99.99999998	AB: 99.99999345 / 99.99992137 BA: 99.99999725 / 99.99996698	IP : 559.000 Mbit/s
534Mbps-4096QAM_std	A: 0 B: 0	B: -50.5 A: -50.5	B: -38.08 A: -37.78	AB: 99.99999922 / 99.99999064 BA: 100 / 100	AB: 100 / 99.99999999 BA: 100 / 99.99999999	AB: 99.99999922 / 99.99999063 BA: 100 / 99.99999999	IP : 534.000 Mbit/s
517Mbps-2048QAM_light	A: 0 B: 0	B: -52.5 A: -52.5	B: -38.08 A: -37.78	AB: 100 / 100 BA: 100 / 100	AB: 100 / 99.99999999 BA: 100 / 99.99999999	AB: 100 / 99.99999999 BA: 100 / 99.99999999	IP : 517.000 Mbit/s
492Mbps-2048QAM_std	A: 0 B: 0	B: -54 A: -54	B: -38.08 A: -37.78	AB: 100 / 100 BA: 100 / 100	AB: 100 / 99.99999999 BA: 100 / 99.99999999	AB: 100 / 99.99999999 BA: 100 / 99.99999999	IP : 492.000 Mbit/s
473Mbps-1024QAM_light	A: 0 B: 0	B: -56 A: -56	B: -38.08 A: -37.78	AB: 100 / 100 BA: 100 / 100	AB: 100 / 100 BA: 100 / 100	AB: 100 / 100 BA: 100 / 100	IP : 473.000 Mbit/s
448Mbps-1024QAM_std	A: 0 B: 0	B: -57.5 A: -57.5	B: -38.08 A: -37.78	AB: 100 / 100 BA: 100 / 100	AB: 100 / 100 BA: 100 / 100	AB: 100 / 100 BA: 100 / 100	IP : 448.000 Mbit/s
427Mbps-512QAM_light	A: 0 B: 0	B: -59 A: -59	B: -38.08 A: -37.78	AB: 100 / 100 BA: 100 / 100	AB: 100 / 100 BA: 100 / 100	AB: 100 / 100 BA: 100 / 100	IP : 427.000 Mbit/s
402Mbps-512QAM_std	A: 0 B: 0	B: -60.5 A: -60.5	B: -38.08 A: -37.78	AB: 100 / 100 BA: 100 / 100	AB: 100 / 100 BA: 100 / 100	AB: 100 / 100 BA: 100 / 100	IP : 402.000 Mbit/s
377Mbps-256QAM_std	A: 0 B: 0	B: -63.5 A: -63.5	B: -38.08 A: -37.78	AB: 100 / 100 BA: 100 / 100	AB: 100 / 100 BA: 100 / 100	AB: 100 / 100 BA: 100 / 100	IP : 377.000 Mbit/s
327Mbps-128QAM_std	A: 0 B: 0	B: -66.5 A: -66.5	B: -38.08 A: -37.78	AB: 100 / 100 BA: 100 / 100	AB: 100 / 100 BA: 100 / 100	AB: 100 / 100 BA: 100 / 100	IP : 327.000 Mbit/s
277Mbps-64QAM_std*	A: 0 B: 0	B: -69.5 A: -69.5	B: -38.08 A: -37.78	AB: 100 / 100 BA: 100 / 100	AB: 100 / 100 BA: 100 / 100	Not Computed	AB: 100 / 100 BA: 100 / 100

Figure III.51. Bilan de liaison d'une liaison hertzienne sur Ellipse

Le bilan de liaisons est établi par Ellipse dans l'onglet 'Résultats' ce qui nous permet de visualiser le **TX/RX**, qui sont respectivement la puissance d'émission et de réception

Le Threshold qui représente le niveau minimal de puissance du signal nécessaire pour une détection fiable, en dessous de ce seuil le signal est trop faible et le taux d'erreur inacceptable

La disponibilité de chaque canal sur l'année, et ce, dépendamment des différentes modulations car on a appliqué la technologie AMC, ce qui permettra à la liaison de s'adapter aux intempéries.

On se réfère à la modulation 64 QAM pour vérifier la qualité de notre liaison.

2.4.1 Calculs de la capacité

Chaque site requiert une capacité minimale pour assurer un service correct, les sites hub accueillent un grand nombre de sites ce qui fait augmenter la capacité nécessaire pour faire circuler toutes les données des utilisateurs.

En réseau mobile de type 4G nous avons une capacité minimale de 200 Mbps par sites qui se cumule avec tous les autres sites tout le long de la chaîne de transmission jusqu'au site 15001 qui est un MSC/MME et en même temps un BSC/RNC



Figure III.52. Site 15001 (MSC/MME et BSC/RNC)

2.5 Exemples de paramétrage et planification:

2.5.1 Exemple d'une liaison 1+0

2.5.1.1 Etape de planification :

On prend comme exemple la liaison 15111-15001, les deux sites sont éloignés de 0.4km et la capacité de la liaison doit être de 200Mbps avec une ligne de mire dégagée.

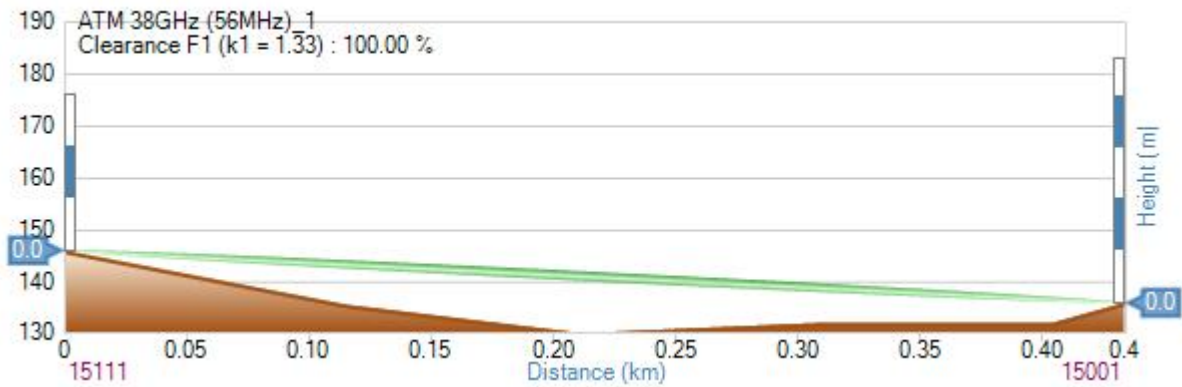


Figure III.53. Vérification du LOS de la liaisons 15111-15001

Table III.3 Planification d'une liaison 1+0

Description		Caractéristique
ID		15111-15001
Distance		0.4Km
Configuration		1+0
Fréquence		38GHz
Polarisation		V
Capacité	CS	56Mhz
	Modulation	64QAM*
Choix de la radio		ML6600_6365_38SA_360_056_A
Choix de l'antenne		ML 38 0.3m HP Dual rA

Le choix de fréquence s'est basé sur la distance et la capacité requise de la liaison comme indiqué sur le tableau III.1


2.5.1.2 Etape de dimensionnement

Dans le cadre de la mise en œuvre du dimensionnement des différentes liaisons, nous avons utilisé des équipements de la gamme MINI-LINK 6000 développée par Ericsson, ainsi on retrouve le matériel suivant pour les sites terminaux tel que le 15111

Pour l'IDU (15111) : un Mini-Link 6651

Table III.4 Caractéristiques de l'IDU Mini-Link 6651 [26]


Caractéristique	Details
Nom	Mini-Link 6651
Format	1U (rack 19 pouces)
Types de version	2 porteuses unidirectionnelles 2 porteuses bidirectionnelles 1 porteuse simple Multi-band booster
Interfaces cuivre	2 × FE/1GE RJ45
Interfaces fibre	4 × 1GE/2.5GE SFP
Interfaces TDM	8 × E1 (G.703)
Capacité maximale	Jusqu'à 2,5 Gbit/s par direction
Alimentation	48 VDC
Température de fonctionnement	-33 °C à +55 °C
Fonctions avancées	Agrégation de porteuses, XPIC, QoS, synchronisation



- **FE/1GE RJ45** : Ports Ethernet cuivre pouvant fonctionner en Fast Ethernet (100 Mbps) ou Gigabit Ethernet (1 Gbps), via connecteur RJ45.
- **1GE/2.5GE SFP** : Emplacements pour les modules SFP (Small Form-factor Pluggable) permettant des liaisons fibre optique à 1 Gbit/s ou 2,5 Gbit/s selon le module utilisé.
- **E1 (G.703)** : Interfaces de transmission TDM utilisées pour les interconnexions traditionnelles. Chaque port E1 fournit un débit de 2.048 Mbps.

Pour l'ODU (15111) : 1x Mini-Link 6365 / 1x parabole simple polarisation

Table III.5 Caractéristiques de l'ODU Mini-Link 6365 [27]

Caractéristique	Détails
Nom	
Type	Radio extérieure (1T1R)
Bande de fréquences	6 – 42 GHz
Agrégation de porteuses	2×28 – 2×112 MHz (adjacentes ou non), jusqu'à 224 MHz total
Capacité radio maximal	2,5 Gbps
Modulation	QPSK jusqu'à 16k QAM
Puissance TX	-10 à +30 dBm
Connection avec l'indoor	Cable coaxial
Dimensions	179×197×79 mm
Poids	2,5 kg
Alimentation	+57 VDC
Puissance consommée	~24 W
	

Concernant le site 15001 qui est interconnecté à 8 sites différents on va utiliser comme IDU le Mini-Link6693 car il possède les 8 directions nécessaires.

Table III.6 Caractéristiques de l'IDU Mini-Link 6693 [26]

Caractéristique	Détail
Nom	Mini-Link 6693
Format	1.5 RU (66×446×238 mm)
Capacité de switching	45–90 Gbps


Interfaces	1 GE, 10 GE, 25 GE
	
<p>Avec les modules: 4x MMU 1002, NPU 1003, PFU 1101, FAU 1101</p>	

Table III.7 Fonctions des Modules du Mini-Link 6693

Module	Fonction
NPU 1003	(Node Processor Unit) cœur de traitement : routage IP/MPLS, agrégation, synchronisation, permet une capacité de commutation de 65,5 Gbps (dont 43 Gbps utilisables), avec interfaces 1 GbE et 10 GbE
MMU 1002	(Modem dual-porteuse) prend en charge plusieurs topologies (1+0, 2+2, XPIC...), modulation jusqu'à 4096 QAM, canaux jusqu'à 112 MHz, trafic mixte Ethernet + TDM, header compression.
PFU 1101	(Power Filter Unit) filtre et protège l'alimentation -48 V DC, permet redondance d'alimentation via une double entrée.
FAU 1101	(Fan Unit) ventilateur latéral (slot S0) assurant le refroidissement intelligent du nœud

Ainsi, on aura montage suivant pour la liaison 15111-15001

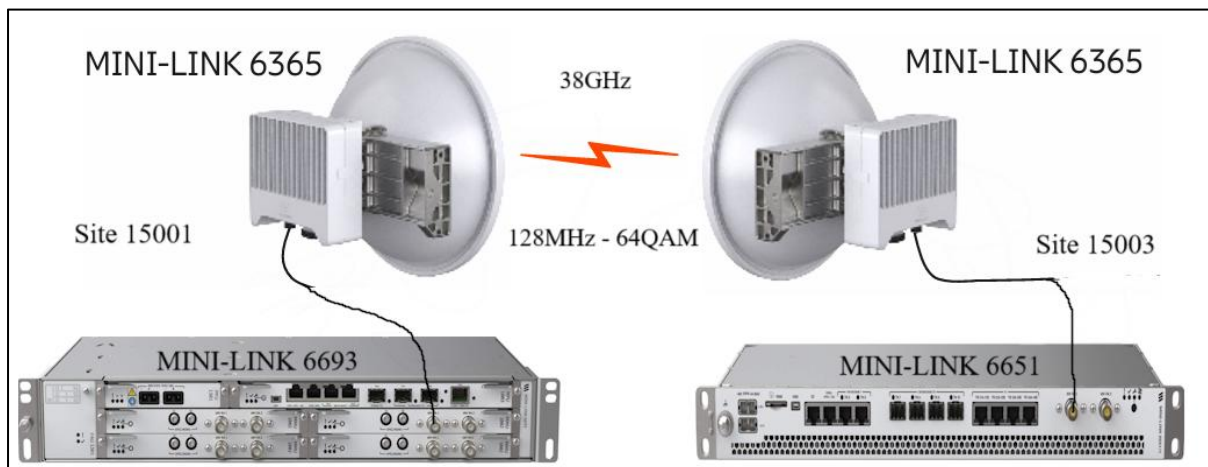


Figure III.54. Montage IDU/ODU de la liaisons 15111-15001

Vérification du bilan de liaisons fourni par Ellipse dans l'onglet 'Results' pour assurer la capacité de 200Mbps

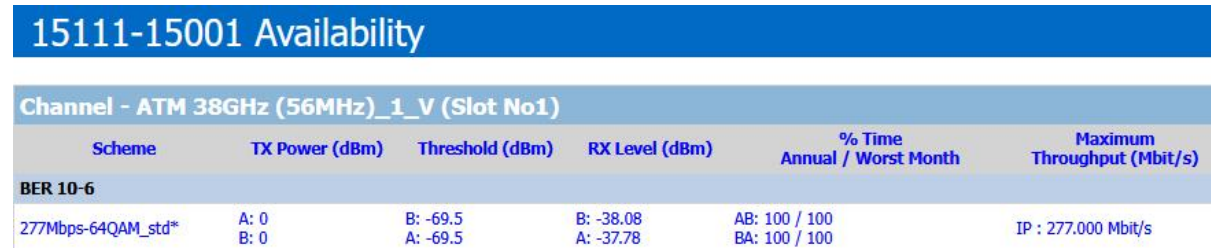


Figure III.55. Bilan de liaisons du lien (15111-15001)

On a un Fade Margin de 31.8 ce qui est correct ainsi qu'une capacité de 277 Mbps, ce qui fait que les exigences de capacité de la liaison sont respectées

2.5.2 Exemple d'une liaison 2+0 XPIC (15105-15002)

Les sites relais comme le 15105 servent d'intermédiaire entre un ou plusieurs sites afin de garantir l'acheminement du trafic le long de la chaîne de transmission, ils doivent avoir une capacité plus accrue afin de garantir la transmission jusqu'au HUB.

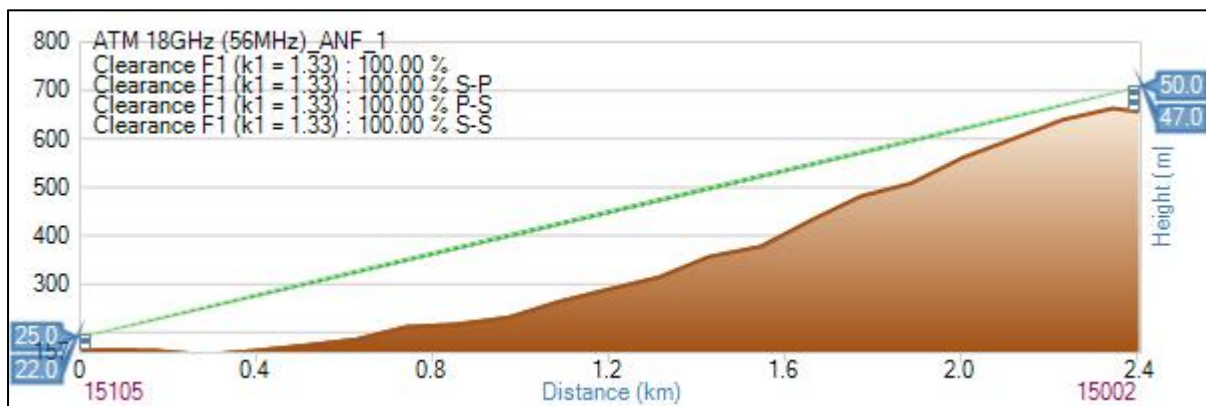


Figure III.56. Vérification du LOS de la liaisons 15105-15002

La liaisons 15105-15002 se compose d'un site relais (15105) et d'un site hub (15002) espacé de 2.4km avec une capacité attendue de 3 x 200Mbps, c'est pour cela on va utiliser la technologie XPIC ainsi qu'une modulation 128Qam pour un CS de 56Mhz ce qui permettrait d'atteindre un débit supérieur à 600Mbps


Table III.8 Planification d'une liaison 2+0 XPIC

Description		Caractéristique
ID		15105-15002
Distance		2.4Km
Configuration		2+0 XPIC
Fréquence		18GHz
Polarisation		V/H
Capacité	CS	56Mhz
	Modulation	128 QAM
Choix de la radio		ML6600_6365_18SA_360_056_A
Choix de l'antenne		ML18 0.3m HPX_2 R3

Pour les sites relais on utilise le matériel suivant **Unité Indoor : Mini-Link 6691**

Table III.9 Caractéristiques de l'IDU Mini-Link 6691 [26]

Caractéristique	Détail
Nom	Mini-Link 6691
Format	1 RU (44×448×240 mm)
Capacité de commutation	Jusqu'à 45 Gbps (dépend de la configuration modulaire)
Interfaces Ethernet	Ports 1 GE, 10 GE, 25 GE
Nombre de direction	4 directions maximum




Avec les modules: 2x MMU 1002, NPU 1005, PFU 1101, FAU 1101

Pour l'unité Outdoor (15105) : 2x MINI-LINK 6365 / x1 Antenne double polarisation / x1 OMT

Le site hub 15002 aura le dimensionnement suivant :

Table III.10 IDU et ODU du site 15002

Parti Indoor	<p>MINI-LINK 6693</p> 
Partie Outdoor	<p>2x ML 6665</p> <p>1x Antenne dual polarisation</p> <p>1x OMT</p>

Ainsi, on aura montage suivant pour la liaison 15105-150012

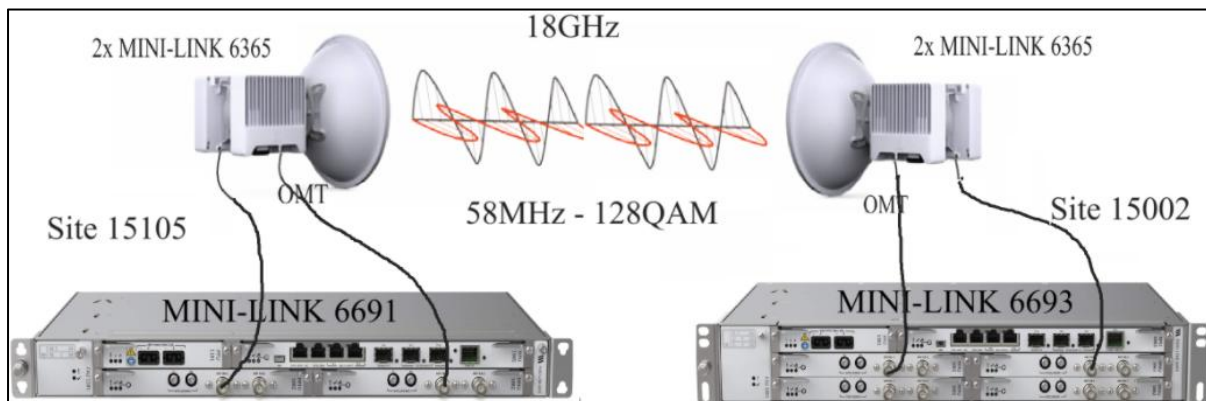


Figure III.57. Montage IDU/ODU de la liaisons 15105-15002

Vérification du bilan de liaisons si nous avons atteint les 600Mbps attendu

15105-15002_2+0_18Ghz Availability

Channel - ATM 18GHz (56MHz)_1_V (Slot No1)					
Scheme	TX Power (dBm)	Threshold (dBm)	RX Level (dBm)	Total (Av. %) Annual / Worst Month	Maximum Throughput (Mbit/s)
BER 10-6					
318Mbps-128QAM_std*	A: 7 B: 7	B: -68.5 A: -68.5	B: -39.78 A: -39.78	AB: 100 / 100 BA: 100 / 100	IP : 318.000 Mbit/s

Channel - ATM 18GHz (56MHz)_1_H (Slot No2)					
Scheme	TX Power (dBm)	Threshold (dBm)	RX Level (dBm)	Total (Av. %) Annual / Worst Month	Maximum Throughput (Mbit/s)
BER 10-6					
318Mbps-128QAM_std*	A: 7 B: 7	B: -68.5 A: -68.5	B: -39.78 A: -39.78	AB: 99.99999926 / 99.99999116 BA: 100 / 100	IP : 318.000 Mbit/s

Figure III.58. Bilan de liaisons du lien (15105-15002)

On a un Fade Margin de 28.7 ce qui est correct ainsi qu'une capacité de 2x 318Mbps, ce qui fait que les exigences de capacité de la liaison sont respectées

2.5.3 Exemple d'une liaison E-band_1+0


On a besoin d'une capacité de 2Gbps sur le lien 15123-15003 pour faire transiter les données du Hub 15003 jusqu'au Hub 15002, ainsi on opte pour la planification suivante :

Table III.11 Planification d'une liaison E-band 1+0

ID		15123-15003
Distance		1.2Km
Configuration		1+0
Fréquence		80GHz
Polarisation		V
Capacité	CS	500Mhz
	Modulation	64Qam*
Choix de la radio		ERI_6352080AAA_500_BCA
Choix de l'antenne		ML80 0.3m HPX_2 R2

La technologie E-band serait idéale au vu de la faible distance ainsi que la forte capacité, on opte pour un équipement full-outdoor qui est MINI-LINK 6352

Table III.12 Caractéristiques du Mini-Link 6352 [27]

Caractéristique	Détail
Type	Radio tout-extérieur E-band (70/80 GHz)
Débit maximal	Jusqu'à 10 Gbps via canal de 2000 MHz
Modulation	BPSK jusqu'à 512 QAM
XPIC	Support pour double polarisation (2+0)
Interfaces Ethernet	Plusieurs ports 10 GE
Synchronisation	PTP IEEE 1588v2, transport sync via la radio
Poids / Dimensions	4 kg, 108×259×321 mm
	

Il se monte directement sur le mât, derrière la parabole, et ne nécessite aucune unité intérieure comme les modèles split-mount (exemple 6365 + 6651/6693)

Vérification du bilan de liaisons du lien

15123-15003_1+0_80Ghz (2.2Gbps) Availability						
Channel - ATM 80Ghz (500Mhz)_1_V (Slot No1)						
Scheme	TX Power (dBm)	Threshold (dBm)	RX Level (dBm)	% Time Annual / Worst Month	Maximum Throughput (Mbit/s)	
BER 10-6						
2242Mbps-64QAM_std*	A: 10 B: 10	B: -55 A: -55	B: -26.16 A: -27.25	AB: 99.99995911 / 99.99956652 BA: 99.99992697 / 99.99928201	IP : 2242.000 Mbit/s	

Figure III.59. Bilan de liaisons du lien (15123-15003)

On a un fade Margin de 27,75 ce qui est optimal pour une liaison e-band d'autant plus que le débit dépasse les 2Gbps avec une disponibilité de 99.9999%

2.6 Test d'interférence générale

Maintenant on doit appliquer une analyse d'interférence globale entre les liaisons afin d'assurer que notre réseau mobile 2G,3G,4G est fonctionnel.

L'outil d'analyse d'Ellipse nous montre ceci :

Per MW Link Result				
	Channel #1	Channel #2	Channel #3	Channel #4
15001-15003_1+0_80Ghz	ATM 80Ghz (250Mhz)_1 V			
15001-15112_2+0_18Ghz	ATM 18Ghz (56Mhz)_ANF_1 V	ATM 18Ghz (56Mhz)_ANF_1 H		
15003-15123_1+0_80Ghz (2.2Gbps)	ATM 80Ghz (250Mhz)_1 V	ATM 80Ghz (250Mhz)_2 V	ATM 80Ghz (250Mhz)_2 H	ATM 80Ghz (250Mhz)_1 H
15004-15001_2+0_18Ghz	ATM 18Ghz (27.5Mhz)_1 V	ATM 18Ghz (27.5Mhz)_1 H		
15100-15105_2+0_23Ghz (550Mbps)	ATM 23Ghz_28Mhz_2 V	ATM 23Ghz_28Mhz_2 H		
15101-15003_4+0_38Ghz	ATM 38Ghz (28Mhz)_5 H	ATM 38Ghz (28Mhz)_4 V	ATM 38Ghz (28Mhz)_4 H	ATM 38Ghz (28Mhz)_5 V
15102-15003_2+0_23Ghz (5.5Gbps)	ATM 80Ghz (250Mhz)_3 V	ATM 80Ghz (250Mhz)_3 H		
15103-15002_1+0_38Ghz	ATM 38Ghz (56Mhz)_1 V			
15105-15002_2+0_18Ghz	ATM 18Ghz (56Mhz)_ANF_1 H	ATM 18Ghz (56Mhz)_ANF_1 V		
15106-15002_4+0_38Ghz	ATM 38Ghz (56Mhz)_1 H	ATM 38Ghz (56Mhz)_1 V	ATM 38Ghz (56Mhz)_2 V	ATM 38Ghz (56Mhz)_2 H
15106-15118_2+0_23Ghz	ATM 23Ghz (56Mhz)_ANF_1 V	ATM 23Ghz (56Mhz)_ANF_1 H		
15107-15124_2+0_42Ghz	ATM 42Ghz (56Mhz)_2 V	ATM 42Ghz (56Mhz)_2 H		
15108-15109_1+0_80Ghz	ATM 80Ghz (250Mhz)_3 V			
15109-15003_1+0_80Ghz	ATM 80Ghz (250Mhz)_2 H			
15110-15002_2+0_42Ghz	ATM 42Ghz (56Mhz)_1 V	ATM 42Ghz (56Mhz)_1 H		
15111-15001_2+0_38Ghz	ATM 38Ghz (56Mhz)_1 V			
15113-15002_2+0_80Ghz	ATM 80Ghz (250Mhz)_2 V	ATM 80Ghz (250Mhz)_2 H		
15114-15104_1+0_80Ghz	ATM 80Ghz (250Mhz)_4 V			
15115-15001_2+0_23Ghz	ATM 23Ghz (56Mhz)_ANF_1 V			
15116-15003_4+0_11Ghz	11Ghz_40 Mhz_1 H	11Ghz_40 Mhz_1 V	11Ghz_40 Mhz_2 V	11Ghz_40 Mhz_2 H

Figure III.60. Analyse d'interférence globale

Avec ceci, nous avons créé sur Ellipse un réseau de transport dans la région de Tizi-Ouzou qui supporte la 2G,3G,4G tout en ayant assuré la non présence d'interférence et que le LOS entre les différents ODU est dégagé

Partie 3 : Transition vers la 5G NSA (Non-Stand Alone)

Cette partie traite l'évolution du réseau de transport 4G crée et optimisé auparavant à un réseau de 5ème génération.

Nous allons moderniser notre infrastructure en déployant progressivement la 5G, en répondant à toutes les exigences techniques et en intégrant les technologies clés pour procurer à la ville de Tizi-Ouzou les services lié à l'eMBB (enhanced Mobile Broadband), l'URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communications), et l'eMTC (enhanced Machine-Type Communication) surtout que l'architecture 5G NSA (Non-Standalone) offre une transition réaliste et économique, en s'appuyant sur le réseau 4G actuel pour une évolution optimisée.

Objectif :

- Répondre à la demande de capacité croissante afin de garantir une capacité radio de 1.1 Gbps par site.
- Assurer une latence réduite à 10 ms
- Supporter les technologies 5G (eMBB, URLLC, eMTC)
- Garder l'architecture de transport FH et renforcer les sites critique

3.1 Ajustement des choix de bande :

En vue de l'augmentation de la capacité requise la bande traditionnelle n'est pas capable de transmettre une si grande capacité de 1.1 Gbps par sites. Notamment le liaison 15003-15002 qui doit transport 11Gbps ainsi que la liaison 15003-15001 qui transport la totalité du trafic vers le CORE (MSC/MME ,15001) cette dernière nécessite une capacité de 33 Gbps.

3.2 La technologie Multi-Bande (Multi-band booster MMB) utilisant la technique HRLB

Afin d'exploiter pleinement les avantages du multiband, nous avons associé cette technologie à la fonction HRLB (Hierarchical Radio Link Bonding).

Le Multiband consiste à utiliser simultanément deux bandes de fréquences différentes, dans notre cas, la bande E pour la haute capacité, et la bande traditionnelle 38GHz pour la robustesse.

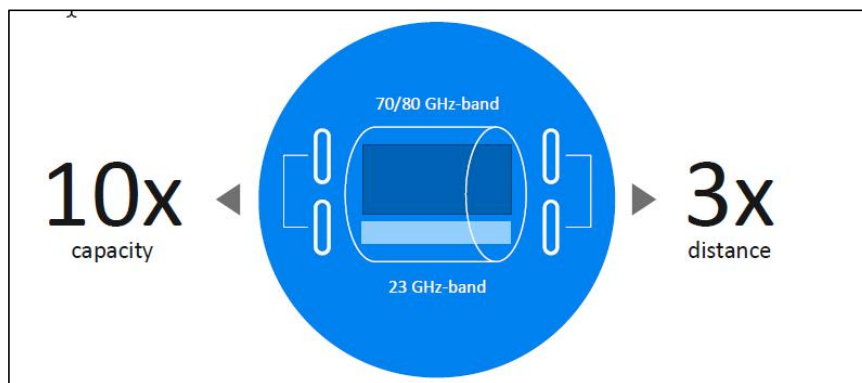


Figure III.61. Schéma illustrative de la technologie MBB/hRLB [29]

Grâce à la technique hRLB, ces deux liaisons hertziennes sont agrégées logiquement au sein d'un même canal de transport, ce qui permet :

- D'additionner les capacités des deux bandes lorsque les conditions radio sont bonnes,
- Assurer la continuité du service si la bande haute devient instable (pluie, fading).

Cette approche garantit à la fois un débit cumulé élevé et une très haute disponibilité, en s'adaptant dynamiquement aux conditions réelles du lien.

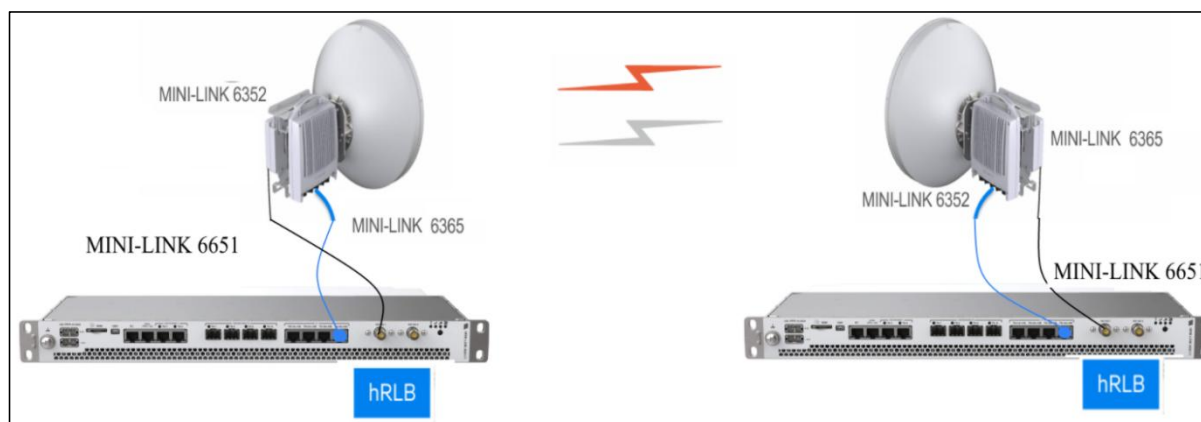


Figure III.62. Schéma illustrative du montage hRLB

3.3 Augmentation de la capacité par changement de largeur de canal (CS)

Les liaisons où la bande passante traditionnelle comme la 23 GHz fût gardé, on y a augmenté la largeur de canal pour croître le débit et la capacité, plus l'espacement des canaux (Channel Spacing) est élevé plus la quantité de donnée qu'on peut transmettre par seconde augmente.

Faire ceci consomme plus de place dans le spectre radio.

Par exemple : 15114-15104_1+0_/23Ghz& 80Ghz initialement installé en 38Ghz/28Mhz en 4G

- Lien E-band :

Slot#	Red.	FD	Reverse H/L	Power A (dBm)	Frequency A (MHz)	Channel	Duplex Mode	Polarization	Frequency B (MHz)	Power B (dBm)
1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5.00	84000	ATM 80Ghz (250Mh...	Full	V	74000	5.00

- Lien Traditional-band :

Slot#	Red.	FD	Reverse H/L	Power A (dBm)	Frequency A (MHz)	Channel	Duplex Mode	Polarization	Frequency B (MHz)	Power B (dBm)
1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5.00	23436	ATM 23Ghz (56MH...	Full	V	22428	5.00

-Avant le passage en 5G :

La liaison entre 15105-15003 été sur la bande 38 Ghz avec une largeur de bande de 28 Mhz

Slot#	Red.	FD	Reverse H/L	Power A (dBm)	Frequency A (MHz)	Channel	Duplex Mode	Polarization	Frequency B (MHz)	Power B (dBm)	Antenna Configuration	Adaptive Configuration	Data Rate
1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	12.00	37072	ATM 38Ghz (28MH...	Full	V	38332	30.00	Default	Robust: 75M...	277.000 Mbit/s

Figure III.63. Bilan de liaison du lien 15105-15003 en 4G

-Après le passage en 5G :

La liaison entre 15105-15003 est toujours sur la bande 38 Ghz avec une largeur de bande de 56 Mhz ce qui double la capacité de cette liaison FH.

Slot#	Red.	FD	Reverse H/L	Power A (dBm)	Frequency A (MHz)	Channel	Duplex Mode	Polarization	Frequency B (MHz)	Power B (dBm)	Antenna Configuration	Adaptive Configuration	Data Rate
1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	12.00	37088	ATM 38GHz (56MH...	Full	V	38348	30.00	Default	Robust: 75M...	277.000 Mbit/s

Figure III.64. Bilan de liaison du lien 15105-15003 en 5G

3.4 Implémentation des liaison E-band 2+0

Exemple la liaison 15113-15002_2+0_80Ghz

En 4G nous avons une capacité de 559Mbps, après avoir changé la configuration en 2+0

E-band nous avons atteint une capacité de 1.612Gbps

Slot#	Red.	FD	Reverse H/L	Power A (dBm)	Frequency A (MHz)	Channel	Duplex Mode	Polarization	Frequency B (MHz)	Power B (dBm)	Antenna Configuration	Adaptive Configuration	Data Rate
1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9.00	73500	ATM 80Ghz (250Mh...	Full	V	83500	30.00	Default	Robust: 75M...	806.000 Mbit/s
2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9.00	73500	ATM 80Ghz (250Mh...	Full	H	83500	30.00	Default	Robust: 75M...	806.000 Mbit/s

Figure III.65. Bilan de liaison du lien 15113-15002 en 5G

3.5 Implémentation des liaison 4+0 XPIC

Exemple la liaison 15133-15003_4+0_38Ghz

Slot#	Red.	FD	Reverse H/L	Power A (dBm)	Frequency A (MHz)	Channel	Duplex Mode	Polarization	Frequency B (MHz)	Power B (dBm)
1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-3.00	37128	ATM 38GHz (28MH...	Full	V	38388	-3.00
2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-3.00	37128	ATM 38GHz (28MH...	Full	H	38388	-3.00
3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-3.00	37100	ATM 38GHz (28MH...	Full	V	38380	-3.00
4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-3.00	37100	ATM 38GHz (28MH...	Full	H	38380	-3.00

Figure III.66. Bilan de liaison du lien 15133-15003 en 5G

Passer a une configuration 4+0 XPIC a permis de doubler la capacité, ainsi on avait une capacité 4G à 559Mbps, puis après implémentation de la nouvelle configuration nous avons atteint une capacité de 1,104Gbps pour le réseau 5G

3.6 Mise en place d'une boucle optique

Dans les réseaux 5G on retrouve souvent un mélange entre les FH et la fibre optique. La fibre optique offre une bien grande flexibilité et performance mais reste malgré tout couteuse et dur a placé ce qui n'est pas adapté à une transition naturelle vers la 5G, c'est pour cela qu'on doit mettre en place des fibres optique entre les liaisons qui ont besoin d'une grande bande passante.

Un des inconvénients de la fibre optique est sa fragilité aux coupures, ce qui veut dire, que n'importe quelle panne va entraîner l'arrête du trafic dans le réseau, c'est pour cela qu'on a mis en place une boucle optique dans le but de prévenir d'éventuels coupures et pannes, ainsi, les données pourront emprunter un autre chemin pour être acheminé à destination.

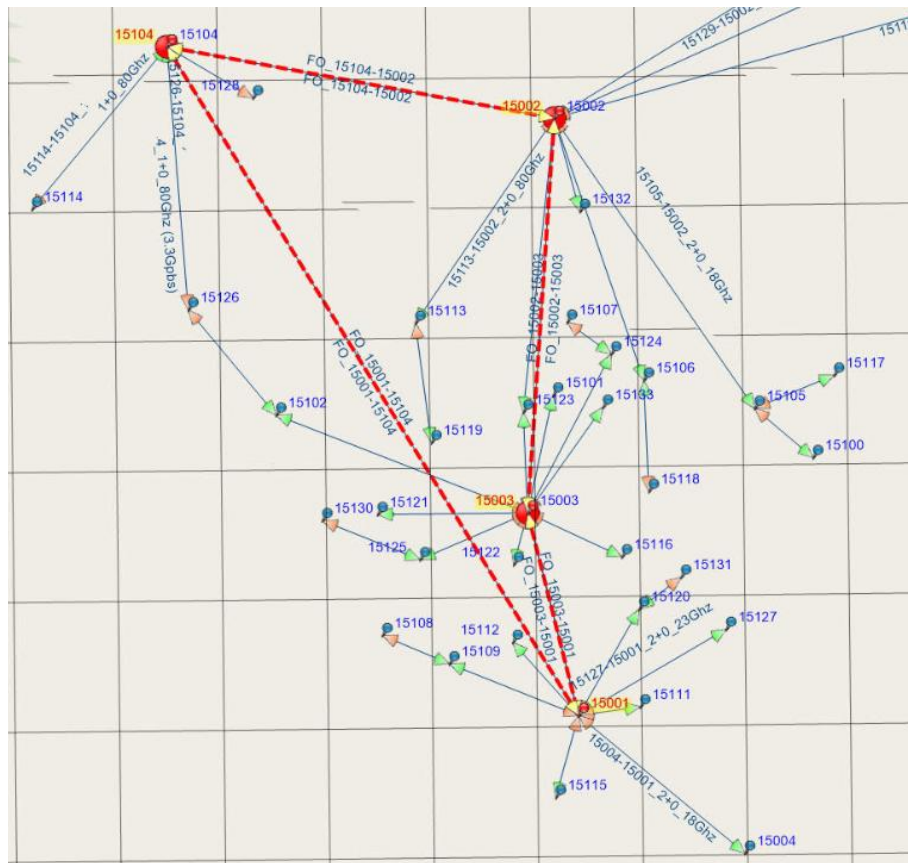


Figure III.67. Boucle optique reliant les sites 15001 15002 15003 15104

3.7 Exemples de paramétrage et planification de la liaisons 15003 -15001

Dans notre cas la liaison **15003** et **15001** doit transmettre 33.6 Gbps , or la E-band en 64Qam avec 1Ghz de bande passante alloué à Mobilis, dans des conditions idéales et en combinat avec la technologie XPIC, on atteint 8-10Gbs maximum, ce qui est insuffisant pour garantir la demande en capacité de cette liaison, c'est pour cela qu'on a choisi la fibre optique comme solution pour cette liaison spécifiquement, en utilisant les équipements suivants :

4x OSN 1800V

1x Cordon de raccordement fibre optique

4x SFP 1310nm

Table III.13 caractéristiques du OSN 1800V [30]

Paramètre	Description
Type d'équipement	Nœud DWDM multiservice compact, 2RU rackable
Capacité de commutation	Jusqu'à 1,6 Tbps
Cartes supportées	Muxponders/transpondeurs 10G, 25G, 100G, ROADM, amplificateurs, OSC
Interfaces optiques	SFP+, SFP28, XFP, QSFP28
Protocoles supportés	Ethernet, OTN, SDH, CPRI/eCPRI, Fibre Channel
Topologies	Point-à-point, anneau, maillage, passif ou avec ROADM
Protection	1+1, SNCP, OLP, ASON (selon carte)
Synchronisation	SyncE, 1588v2 (via cartes spécifiques)
Alimentation	-48V DC redondante



Table III.14 caractéristiques du SFP 1310nm

Paramètre	Description
Type de module	SFP (hot-pluggable)
Longueur d'onde	1310 nm
Fibre supportée	Monomode (OS1/OS2)
Portée typique	10 à 40 km selon puissance (standard = 10 km)
Débit supporté	100 Mbps, 1 Gbps ou 1.25 Gbps (ex. 1000BASE-LX/LH)
Connectique	LC duplex
Type de laser	FP (Fabry-Perot) ou DFB (Distributed Feedback) selon modèle
bilan optique	Environ 8,5 à 14 dB (selon modèle et portée)



Le bloqué synoptique du montage de la liaison optique se fait comme représenté sur la figure III.65

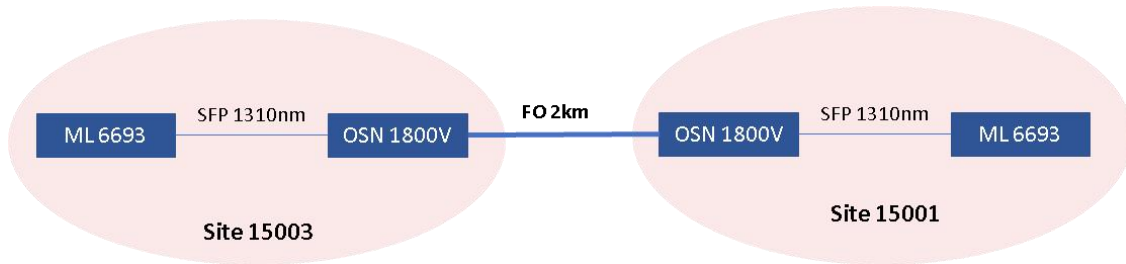


Figure III.68 Liaison optique entre le site 15003 et 15001

Les émetteurs/récepteurs SFP sont connectés au module NPU 1003 du MINI-LINK 6693 où on retrouve 3 ports SFP (TN6 à TN8)



Figure III.69 Port SFP utilisés sur le module NPU1003 [26]

3.8 la technologie Small cell et les services de la 5G

Les small cells sont de petites stations de base radio à faible puissance, conçues pour compléter la couverture et augmenter la capacité des réseaux mobiles, en particulier dans les environnements denses ou mal couverts.

Dans le contexte de la 5G, les small cells permettent de répondre aux exigences en très haut débit, de latence ultra faible ainsi qu'un très grand nombre d'utilisateur à la fois

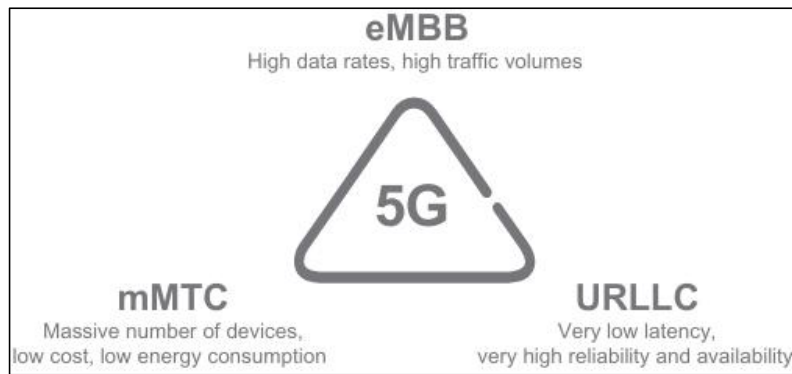


Figure III.70. Descriptif des aspects de la 5G eMBB, mMTC, URLLC [34]

Elles sont généralement installées à faible hauteur (lampadaires, murs, mobilier urbain) et assurent une couverture localisée sur des zones allant de quelques dizaines à quelques centaines de mètres.



Figure III.71. Exemple de small cell sur un lampadaire

3.9 la communication à faible latence ultra fiable (URLLC)

L' URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communication) qu'a apporté la 5G par ses performances offrent des perspectives d'utilisation dans les hôpitaux et la santé connectée en générale par sa très faible latence et sa très haute fiabilité.

Dans un environnement hospitalier, l'URLLC ouvre la voie à des usages critiques tels que :

La télé-chirurgie en temps réel, la surveillance médicale continue avec alerte instantanée, le pilotage à distance d'équipements médicaux connectés, la réactivité des systèmes d'urgence intelligents (robots d'assistance, brancards autonomes...).

C'est ainsi qu'en introduisant les small cells dans ces environnements, on peut accroître considérablement l'efficacité des hôpitaux

On prend exemple du CHU Nedir Mohamed de Tizi-Ouzou



Figure III.72. CHU Nedir Mohamed et le mât du site 15116

Après installation des différentes Small cell dans le bâtiment et reliage au site, on retrouve le schéma suivant

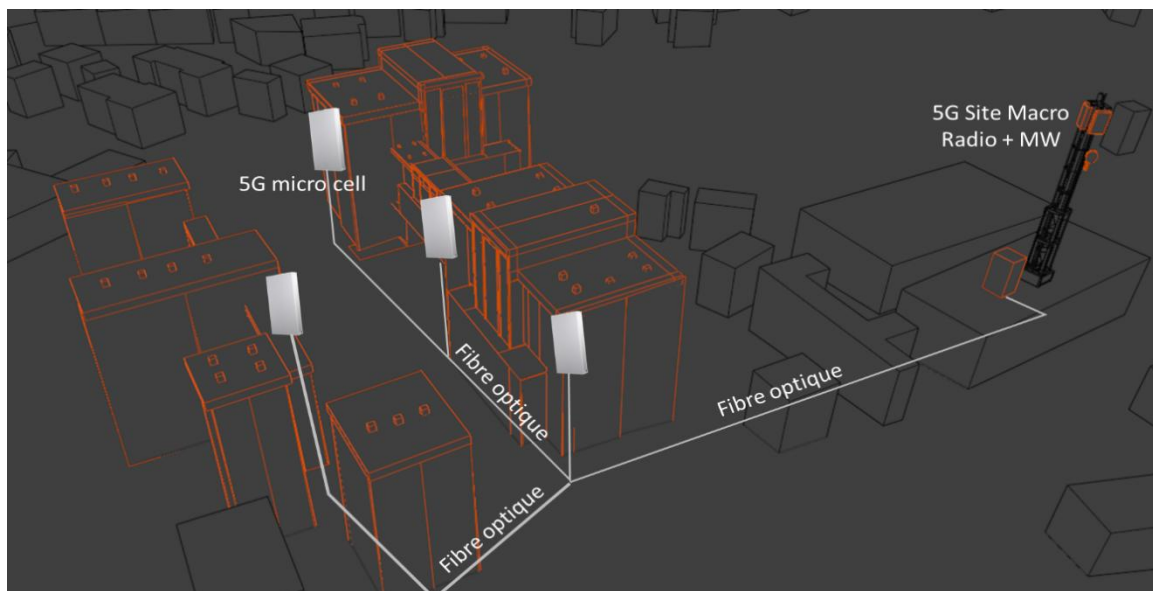


Figure III.73. Schéma d'installation des small cells et fibre optique jusqu'au site 15116

Après ça, le site 15116 est relié au site 15003 par fibre optique, monté de la même manière que sur la Figure 71

3.10 Communications massives de type machine (mMTC)

Le mMTC est un d'un pilier de la 5G, conçu pour connecter un très grand nombre d'objets peu exigeants en débit, mais qui doivent être simultanément connectés, bien adapté pour un boulevard pour ses nombreux capteurs, bornes, véhicules, caméras, feux tricolores intelligents...etc

Pour répondre à ces besoins, l'idée consiste à déployer des small cells par exemple au boulevard Krim Belkacem directement sur les lampadaires, discrètes et à faible portée, elles permettent de garantir une couverture dense et ciblée, elles sont ensuite connectées en fibre optique jusqu'au site 15120 qui se trouve sur le boulevard, assurant ainsi un acheminement rapide et fiable des données vers le cœur de réseau.



Figure III.74. boulevard Krim Belkacem de Tizi-Ouzou avec le mât du site 15120

Avec cette optique, on peut retrouver un montage des small cells de cette manière tout le long du boulevard assurant la connectivité des différentes machines.

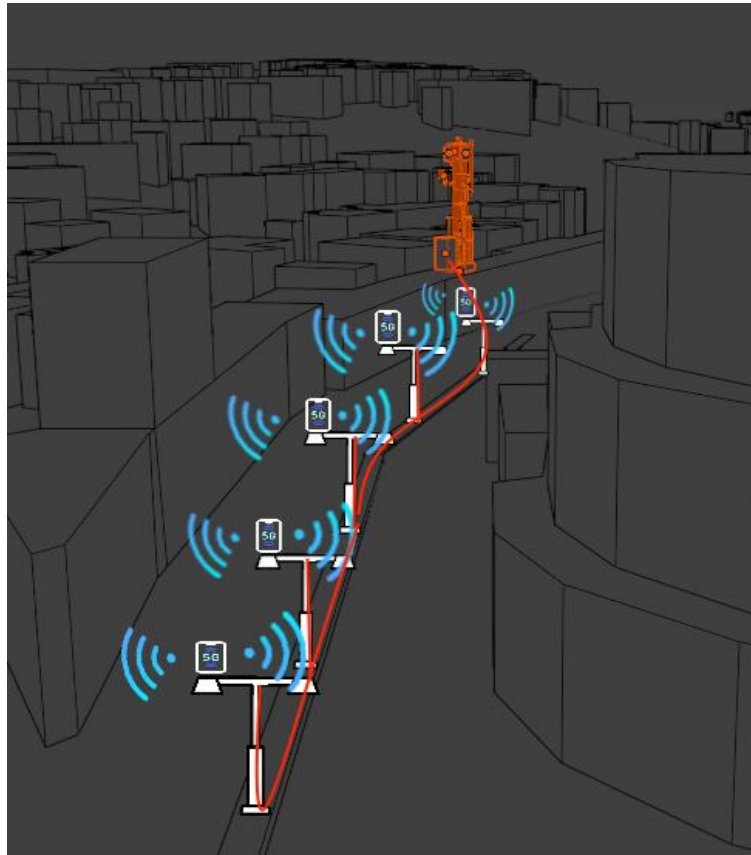


Figure III.75. Les différentes small cells du boulevard connecté au mât du site 15120

Le site sera ensuite relié au site 15001 par fibre optique.

3.11 Haut débit mobile amélioré (eMBB)

Le haut débit mobile amélioré est le 3eme pilier apporté avec la 5G, il nécessite une forte capacité, un cas d'usage est particulièrement pertinent dans un stade, où des dizaines de milliers de spectateurs utilisent simultanément leurs smartphones pour regarder des vidéos, partager du contenu, ou accéder à des services en temps réel.

On prend l'exemple du Stade Hocine-Aït-Ahmed de Tizi-ouzou situé au site 15104, l'idée est d'implémenter des antennes Radio Dot (Stadium Dots) sous les sièges, réparties parmi les tribunes et les couloirs, afin d'assurer une couverture radio homogène, de réduire les interférences et de maintenir un haut niveau de performance, même lorsque le stade est entièrement rempli.



Figure III.76. Schéma d'installation des radio dots et fibre optique jusqu'au site 15116

Le site 15116 est relié au site 15001 qui est un BSC/RNC et en même temps MSC/MME en fibre optique ce qui permet l'acheminement du trafic durant les périodes d'évènement sportif.

3.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu comment planifier et dimensionner un réseau de transport 4G en présentant les caractéristiques des équipements utilisés et des différentes configurations afin de satisfaire les critères de débit et de disponibilité, par la suite, nous avons entamé une évolution technologique afin d'atteindre les nouveaux critères exigés pour avoir un réseau NSA-5G pour la région de Tizi-Ouzou tout en développant les différents aspects d'amélioration des infrastructures du centre-ville pour en créer une smart city.

Conclusion et perspectives

Ce travail nous a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine du dimensionnement et planification des réseaux de transport, Au fil de ce projet, nous avons renforcé notre compréhension des réseaux mobiles, et ce de la 1G jusqu'à la 5G, en étudiant l'évolution des architectures, des services proposés ainsi que des nouvelles exigences en matière de débit, latence et connectivité.

Nous avons aussi mieux compris la différence entre la partie accès et la partie transmission d'un réseau mobile, Le choix des supports de transmission, notamment l'utilisation des faisceaux hertziens dans un environnement urbain comme celui de Tizi-Ouzou, s'est révélé stratégique pour répondre aux contraintes topographiques et économiques.

Notre travail s'est déroulé chez l'entreprise ATM Mobilis, plus précisément dans le département d'ingénierie réseau transmission. L'objectif était de mettre en place un réseau 4G/LTE, puis de l'évoluer vers un réseau 5G. Pour cela, nous avons suivi les étapes suivantes :

- Création de 39 sites situés dans la ville de Tizi-Ouzou

- Création de 38 liaisons FH

- Configuration du réseau 4G/LTE

- Adapter le réseau 4G/LTE en un réseau 5G NSA

Grâce aux résultats obtenus avec le logiciel de planification Ellipse, nous pouvons dire que l'objectif initial a été atteint. Le réseau proposé respecte les contraintes de performance, de couverture et de capacité attendues pour supporter la 5G. Cependant, il reste toujours possible d'optimiser ce réseau en fonction de l'évolution de la demande et des nouvelles technologies disponibles.

Aujourd'hui, la 5G n'est pas encore généralisée en Algérie, mais elle est en cours de test. D'ailleurs, pendant notre présence au sein de l'entreprise Mobilis, des essais concrets de 5G ont été réalisés, notamment autour de la réalité virtuelle.

À l'horizon 2030, la recherche s'oriente déjà vers la sixième génération (6G), qui promet des débits de l'ordre du téraoctet par seconde, une latence bien plus faible qu'en 5G, et une intégration poussée de l'intelligence artificielle dans la gestion des réseaux. La 6G devra

répondre aux exigences croissantes concernant les véhicules autonomes, à l'holographie mobile, et à la connectivité massive à l'échelle planétaire.

Références

- [1] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed., Prentice Hall, 2002.
- [2] M. Sauter, *From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband*, Wiley, 2017.
- [3] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Sköld, *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*, Academic Press, 2011.
- [4] H. Holma and A. Toskala, *WCDMA for UMTS: HSPA Evolution and LTE*, Wiley, 2007.
- [5] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, *LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*, Wiley, 2011.
- [6] J. G. Andrews *et al.*, “What Will 5G Be?”, *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, Jun. 2014.
- [7] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Sköld, *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*, Academic Press, 2018.
- [8] Ericsson, “Outdoor Coverage – Small Cells,” [En ligne]. Disponible : <https://www.ericsson.com/en/small-cells/outdoor-coverage>. [Consulté le 05 Mai 2025].
- [9] N. Miwizi, “Simplified GSM Network Architecture Diagram,” ResearchGate, 2019.
- [10] X. Li, S. Li, A. Timm-Giel, and C. Görg, “Delay in UMTS Radio Access Networks: Analytical Study and Validation,” in *Proc. ATNAC*, Melbourne, Australia, Dec. 2006.
- [11] S. Belkacem, “Handover Partie 02,” [En ligne]. Disponible : https://staff.univ-batna2.dz/.../cour-handover-partie_02.pdf. [Consulté le 28 Avr 2025].
- [12] G. Dambricourt, *5G NSA/5G SA : quelle différence ?*, 2023.
- [13] L. Kansal, S. Berra, M. Mounir *et al.*, *Performance Analysis of Massive MIMO-OFDM System Incorporated with Various Transforms for Image Communication in 5G Systems*, *Electronics*, vol. 11, art. 621, 2022.

-
- [14] Riina, *Beamforming Antennas – How They Work and Are Tested?*, [En ligne]. [Consulté le 30 Avr 2025].
- [15] J. A. Brito and J. I. Moreno *et al.*, "Programmable Data Plane Applications in 5G and Beyond Architectures: A Systematic Review," *Sensors*, vol. 23, no. 15, art. 6955, 2023.
- [16] V. Gaillard, "Smart City, IoT et choix du réseau (1/2) : l'IoT dans la stratégie smart city," [En ligne]. [Consulté le 30 Avr 2025].
- [17] J. Reeves, "Différence entre CWDM et DWDM," 2024.
- [18] B. Raphael and G. K. Aristide, *Technologie PDH/SDH*, 2019.
- [19] Ericsson, *Mini-Link Radio Wave Propagation*, [En ligne]. [Consulté le 02 Mai 2025].
- [20] A. H. Angel, "Diseñar enlaces XPIC: todo lo que deberías saber," BorrowBits, [Consulté le 01 Mai 2025].
- [21] TRAI, *Consultation Paper*, 27 Sept. 2023. [Consulté le 01 Mai 2025].
- [22] H. Holma and A. Toskala, *LTE for 4G Mobile Broadband*, Wiley, 2011.
- [23] ITU-R, *IMT-2020 Technical Performance Requirements*, ITU, Genève, 2017.
- [24] Ericsson, "Busting the biggest myths around microwave transport," [En ligne]. Disponible : <https://www.ericsson.com/en/blog/2022/12/busting-the-biggest-myths-around-microwave-transport>. [Consulté le 02 Mai 2025].
- [25] Ericsson, MINI-LINK 6600, [En ligne]. [Consulté le 02 Mai 2025].
- [26] Ericsson, MINI-LINK 6365 Datasheet, [En ligne]. [Consulté le 02 Mai 2025].
- [27] Microwave Link, "Microwave ODU," [En ligne]. Disponible : <https://www.microwave-link.com/microwave-odu>. [Consulté le 05 Mai 2025].
- [28] Ericsson, "Multiband Mobile Transport," [En ligne]. Disponible : <https://www.ericsson.com/en/mobile-transport/multiband>. [Consulté le 05 Mai 2025].
- [29] Huawei, "OSN 1800 – Transmission optique," [En ligne]. Disponible : <https://www.huawei.com/fr/products/optical-transmission/osn-1800>. [Consulté le 06 Mai 2025].

-
- [30] Ericsson, "Boost Capacity in Traditional Bands," [En ligne]. Disponible : <https://www.ericsson.com/en/mobile-transport/boost-capacity-in-traditional-bands>. [Consulté le 05 Mai 2025].
- [31] R. Buyya *et al.*, *Internet of Things: Architecture and Applications*, Elsevier, 2022.
- [32] M. Nawrocki, *Radio Network Planning and Optimization for UMTS*, John Wiley & Sons, 2006.
- [33] NGMN Alliance, *5G RAN CU-DU Network Architecture, Transport Options and Dimensioning*, 2019.
- [34] 3GPP, *Technical Specifications and Reports*, [En ligne]. Disponible : <https://www.3gpp.org/specifications>. [Consulté en 2025].
- [35] J. Schiller, *Mobile Communications*, 2^e éd., Addison-Wesley, 2003.

Annexe 1

Tableau des sites

Name PFE	Longitude	Latitude	Capacité par site partie 4G	Capacité par site partie 5G
15001	4.051111	36.696476	200Mbps	550 Mbps
15002	4.049666	36.733405	200Mbps	1.1 Gbps
15003	4.04743	36.70919	200Mbps	1.1 Gbps
15100	4.0693333114246	36.7124137283183	200Mbps	550 Mbps
15101	4.0494722007151	36.7164415058972	200Mbps	1.1 Gbps
15102	4.0282314094846	36.7153865642619	200Mbps	1.1 Gbps
15103	4.1269166435168	36.7606359483977	200Mbps	550 Mbps
15104	4.0201666457340	36.738135949333	200Mbps	1.1 Gbps
15105	4.0648999781782	36.7154870615084	200Mbps	1.1 Gbps
15106	4.0562309783531	36.7176610614026	200Mbps	1.1 Gbps
15107	4.0505999784644	36.7209170612501	200Mbps	1.1 Gbps
15108	4.036189	36.701749	200Mbps	1.1 Gbps
15109	4.0412999786801	36.6999570621962	200Mbps	1.1 Gbps
15110	4.1112399771894	36.7469170601182	200Mbps	1.1 Gbps
15111	4.05589	36.69718	200Mbps	1.1 Gbps

15112	4.04617	36.70124	200Mbps	1.1 Gbps
15113	4.03898	36.72096	200Mbps	1.1 Gbps
15114	4.009699	36.728221	200Mbps	1.1 Gbps
15115	4.04934	36.69166	200Mbps	1.1 Gbps
15116	4.05461	36.70643	200Mbps	1.1 Gbps
15117	4.07102	36.71747	200Mbps	550 Mbps
15118	4.0567222005740	36.7104415061758	200Mbps	1.1 Gbps
15119	4.0401099786880	36.7135870615752	200Mbps	1.1 Gbps
15120	4.0558899783777	36.7031970620603	200Mbps	1.1 Gbps
15121	4.0359199787791	36.7091970617716	200Mbps	1.1 Gbps
15122	4.046308	36.706025	200Mbps	1.1 Gbps
15123	4.0471699785413	36.715407061498	200Mbps	1.1 Gbps
15124	4.0539599783980	36.7189370613428	200Mbps	1.1 Gbps
15125	4.039144	36.706393	200Mbps	1.1 Gbps
15126	4.021585	36.721927	200Mbps	1.1 Gbps
15127	4.0625299782434	36.7018970621247	200Mbps	1.1 Gbps
15128	4.026717	36.734936	200Mbps	1.1 Gbps
15129	4.0792499778443	36.7477170600556	200Mbps	1.1 Gbps
15130	4.0316799788662	36.7088570617838	200Mbps	1.1 Gbps
15131	4.0591199783092	36.7051370619745	200Mbps	1.1 Gbps
15132	4.051582	36.728378	200Mbps	1.1 Gbps
15133	4.053277	36.715657	200Mbps	1.1 Gbps

Annexe 2

Plan de fréquence	Cannal	Fréquence haute	Fréquence basse
11Ghz (80Mhz)	11Ghz (80Mhz)_1	11345	10815
11Ghz (80Mhz)	11Ghz (80Mhz)_2	11425	10895
18GHz (27.5MHz)	18 GHz(27.5MHz)_1	19177.5	18167.5
18GHz (27.5MHz)	18 GHz(27.5MHz)_2	19205	18195
18GHz (27.5MHz)	18 GHz(27.5MHz)_3	19232.5	18222.5
18GHz (27.5MHz)	18 GHz(27.5MHz)_4	19260	18250
38GHz (56MHz)	38GHz (56MHz)_1	38346	37086
38GHz (56MHz)	38GHz (56MHz)_2	38402	37142
42Ghz (28Mhz)	42Ghz (28Mhz)_1	42176	40676
42Ghz (28Mhz)	42Ghz (28Mhz)_2	42204	40704
42Ghz (28Mhz)	42Ghz (28Mhz)_3	42232	40732
42Ghz (28Mhz)	42Ghz (28Mhz)_4	42260	40760
42Ghz (56Mhz)	42Ghz (56Mhz)_1	42190	40690
42Ghz (56Mhz)	42Ghz (56Mhz)_2	42246	40746
80Ghz (250Mhz)	80Ghz (250Mhz)_1	83250	73250

80Ghz (250Mhz)	80Ghz (250Mhz)_2	83500	73500
80Ghz (500Mhz)	80Ghz (500Mhz)_1	83375	73375
80Ghz (500Mhz)	80Ghz (500Mhz)_2	83875	73875