

**Master Electronique Energie Electrique Automatique.  
Parcours : Photonique Hyperfréquences et Systèmes de  
Communication**

Année 2023-2024

De l'Université de Montpellier



Rapport sur le projet

**Déploiement du réseau 5G avec le Faisceau Hertzien**

Par :

Kweneth KIKHOUNGA

Tuteur académique : Sylvie JARRIX

Maitre d'apprentissage : Aline LENOIR

## Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à l'ensemble de l'équipe du groupe Orange France de Montpellier pour m'avoir offert l'opportunité d'effectuer mon alternance au sein de son organisation.

Je souhaite adresser des remerciements tout particulier à :

Sophie GABOYARD NIAY manager au sein de l'équipe Coordination Étude et Déploiement (CED-Sud) pour m'avoir recruté au sein de son équipe et m'avoir accordé sa confiance. Elle a toujours su se montrer disponible, répondre à mes interrogations et faciliter mon intégration à l'entreprise.

Aline LENOIR et Karim NAJAI, ingénieristes Déploiement réseaux, mes tuteurs en entreprise pour leur accompagnement, leurs conseils avisés. Leurs explications claires ont grandement contribué à mon apprentissage et à ma réussite.

Je suis également reconnaissant envers mes collègues de l'équipe, dont la bienveillance et l'esprit d'équipe ont rendu mon quotidien enrichissant.

Sylvie JARRIX, Maître de Conférences à l'Université de Montpellier, ma tutrice académique, qui m'a apporté son soutien indéfectible tout au long de mon parcours.

Merci à tous pour cette expérience inoubliable.

## Résumé

Ce rapport s'inscrit dans le cadre de mon alternance qui se déroule au sein du groupe Orange France situé à Montpellier. J'ai été recruté comme ingénieuriste déploiement réseaux. Ma mission principale a été de déployer le réseau 5G dans les zones rurales de l'Occitanie en utilisant l'ingénierie faisceau hertzien. Lors de ce projet, j'ai pu travailler sur la cartographie des zones à étudier en appliquant les recommandations de l'IUT dans la mise en place des liaisons hertziennes. Aussi, j'ai réalisé des études de bilan de liaison à l'aide du logiciel ATOLL. Ceci m'a permis de déterminer quelle fréquence et modulation utilisées pour respecter les critères de débits de la 5G. Enfin, j'ai collaboré avec d'autres entités pour la gestion et le pilotage de nos projets. Cette mission a été très instructive pour moi, car elle m'a permis de comprendre l'aspect des hyperfréquences et aussi la gestion et le pilotage de projet.

## Abstract

This report is part of my apprenticeship at Orange France in Montpellier, where I was recruited as a network deployment engineer. My main mission involved deploying 5G networks in rural areas of Occitanie using microwave engineering. During this project, I worked on mapping the areas to be studied by applying the recommendations from the IUT for setting up microwave links. Additionally, I conducted link budget studies using the ATOLL software, which allowed me to determine the appropriate frequency and modulation to meet the 5G throughput criteria. Furthermore, I collaborated with various entities for the management and coordination of our projects. This experience has been highly instructive, enhancing my understanding of microwave technology as well as project management and coordination.

## Table des matières

<b>Remerciements .....</b>	<b>2</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>3</b>
<b>Glossaire .....</b>	<b>6</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>7</b>
<b>I. Contexte et objectifs spécifiques de l’alternance .....</b>	<b>7</b>
1. Présentation du groupe orange France .....	7
2. Direction des Opérations Réseaux (DOR) .....	7
3. Missions et responsabilités .....	8
<b>II. Généralités sur les faisceaux hertziens .....</b>	<b>8</b>
1. Définition d’un faisceau hertzien .....	8
2. Caractéristiques d’un faisceau hertzien <sup>[4]</sup> .....	8
3. Types de faisceaux hertziens .....	9
4. Principe de la liaison FH .....	10
5. Transmission des signaux .....	12
<b>III. Déploiement de la 5G .....</b>	<b>13</b>
1. Introduction .....	13
2. Pourquoi la 5G ? .....	14
3. Agrégation de la porteuse (CA : Carrier Aggregation) : Principe .....	15
4. Contexte du projet .....	15
5. Etude d’ingénierie .....	16
<b>Conclusion générale : .....</b>	<b>21</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>22</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>23</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Organigramme CED SO .....	7
Figure 2 : Ellipsoïde de Fresnel.....	9
Figure 3: Faisceau transhorizon .....	10
Figure 4 : Schéma d'une liaison hertzienne .....	10
Figure 5: polarisation verticale .....	11
Figure 6: Polarisation horizontale..	11
Figure 7: Bilan de liaison .....	12
Figure 8: Schéma bloc d'une réception du signal RF.....	12
Figure 9: : Constellation 8-QAM .....	13
Figure 10: Types d'agrégation de la porteuse .....	15
Figure 11: Liaison avec agrégation de la porteuse .....	15
Figure 12: Base ACCESS.....	16
Figure 13: Recherche site avec ATOLL.....	16
Figure 14: Configuration de la liaison FH ATOLL.....	18
Figure 15: Profil de la liaison avec ATOLL.....	18
Figure 16: Bilan de liaison avec ATOLL .....	19
Figure 17: Capture d'écran recommandation.....	19

## Glossaire

ANFR : Agence Nationale de Fréquences

ARCEP : Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse

CED SO : Coordination Etudes et Déploiement Sud-Ouest

DOR : Direction des Opérations Réseaux

DECT : Déploiement des Equipements de Collecte et de Transmission

FH : Faisceau Hertzien

FSK : Modulation déplacement de fréquence (Frequency Shift Keying)

FO : Fibre Optique

GHz : Gigahertz

IDU : Indoor Unit

IOFH : Ingénierie Opérationnelle Faisceau Hertzien

IP : Protocole internet (Internet Protocol)

Km: Kilomètre

LOS: Visibilité directe (Line of Sight)

MIMO : Multiple Input Multiple Output

NRA : Nœud de raccordement

NRO : Nœud de raccordement optique

ODU : Outdoor Unit

OL : Oscillateur Local

PSK : Modulation par déplacement de phase (Phase shift Keying)

RAI : Rapport d'ingénierie

TEB : Taux d'erreurs binaires

UIT : Union Internationale des Télécommunications

5G : 5<sup>e</sup> génération

## Introduction

Dans le cadre de ma formation en master Photonique, Hyperfréquences et Systèmes de communications, j'ai eu l'opportunité de réaliser une année d'alternance au sein d'Orange France à Montpellier, l'un des leaders des télécommunications en France. En tant qu'ingénieuriste déploiement réseaux, j'ai intégré l'équipe chargée de Coordination Études et Déploiement réseaux zone Sud-Ouest (CED Sud-Ouest) plus particulièrement l'équipe chargée de l'ingénierie des faisceaux hertziens, une technologie clé pour le déploiement des réseaux dans les zones rurales et montagneuses.

Ce rapport propose de façon détaillée les étapes et aspects de ces expériences. Dans un premier temps, je décrirai le contexte et objectifs spécifiques de l'alternance. Ensuite, je présenterai les généralités sur les faisceaux hertziens et sur la 5G. Après, je décrirai les travaux réalisés dans l'entreprise (ingénierie des liaisons hertziennes pour le déploiement de la 5G). Enfin, je conclurai par une réflexion autour des compétences acquises et des perspectives sur d'autres projets de l'entreprise.

## I. Contexte et objectifs spécifiques de l'alternance

### 1. Présentation du groupe orange France

Entreprise de télécommunication autrefois appelé France télécom, le groupe Orange a été créé en 1994. Orange France, filiale du groupe Orange, joue un rôle central dans l'innovation et le déploiement des infrastructures de télécommunications en France. Le groupe s'est engagé par ailleurs à poursuivre son plan de modernisation des réseaux fixe et mobile vers le très haut débit en déployant partout le réseaux 5G et de valoriser ses infrastructures grâce à des nouvelles technologies dans le but de répondre aux besoins croissants de ses clients.

### 2. Direction des Opérations Réseaux (DOR)

La Direction des Opérations Réseaux a pour mission principale de : concevoir, déployer et maintenir les réseaux fixes et mobiles selon les besoins et caractéristiques de chaque territoire. Nous sommes situés sur la DOR Sud-Ouest à Montpellier dirigé par Aurélien BRUN.

Lors de mon alternance j'ai été accueilli dans le service Coordination Études et Déploiement zone Sud (CED Sud-Ouest) qui est dirigé par la manager Sophie GABOYARD NIAY. Voici l'organigramme de l'équipe avec toutes les activités :

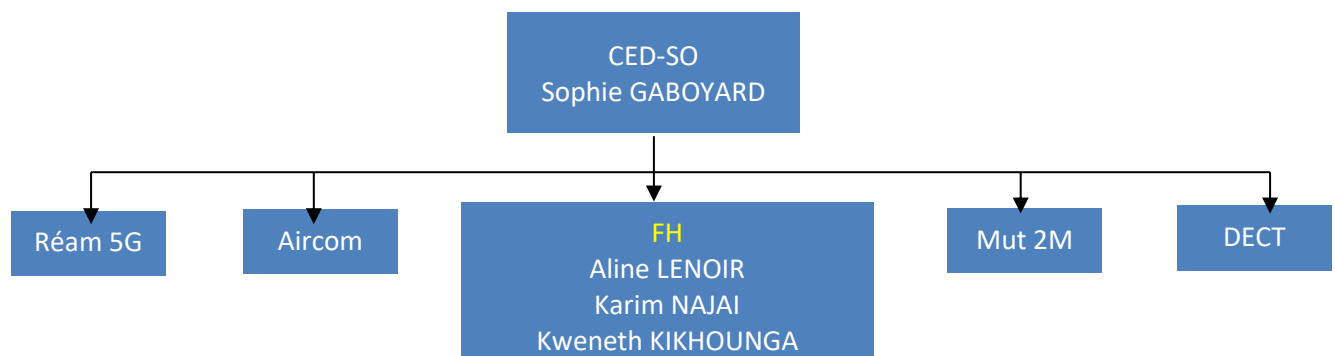


FIGURE 1 : ORGANIGRAMME CED SO

Le sous-service Faisceau Hertzien dans lequel j'effectue mon alternance est composé de deux ingénieristes basés à Montpellier et de dix autres à Toulouse. Il a pour objectif de développer le réseau Orange en utilisant les technologies du FH.

### 3. Missions et responsabilités

Durant cette année, j'ai eu l'occasion de contribuer à plusieurs aspects critiques de l'ingénierie des faisceaux hertziens et de la modernisation des infrastructures réseau, notamment :

- **Étude et conception des liaisons hertziennes pour la 5G** : optimisation des liaisons pour assurer une couverture et des performances optimales ;
- **Remplacement des équipements FH obsolètes** : Participation aux projets de démontage des équipements obsolètes et de leur remplacement par des technologies plus performantes, assurant ainsi une infrastructure réseau à la pointe ;
- **Coordination des phases de déploiement** : Collaboration avec les équipes techniques et les sous-traitants pour planifier et exécuter les phases de production et de démontage FH ;
- **Vérification et optimisation** : Contrôle des performances des nouvelles installations et ajustements nécessaires pour atteindre les objectifs de performance ;
- **Utilisation d'outils spécialisés** : logiciels et outils de simulation (ATOLL et Séria) pour la planification et l'analyse des réseaux hertziens.

## II. Généralités sur les faisceaux hertziens

### 1. Définition d'un faisceau hertzien

Un faisceau hertzien est une technologie de communication sans fil qui utilise des ondes radioélectriques très fortement concentrées à l'aide d'antennes directives pour transmettre des données entre deux points fixes composés de deux antennes émettrices-réceptrices pointées l'une vers l'autre, sans obstacle.

Il permet d'acheminer le même type de services que les autres systèmes de transmission à savoir la 4G, la 5G, la voix sur IP. De plus cette technologie permet une transmission haut débit jusqu'à 10 Gbps. Enfin, elle est plus facile à déployer.

Néanmoins, il est sensible aux phénomènes atmosphériques notamment : la réflexion, la réfraction, la météo.

### 2. Caractéristiques d'un faisceau hertzien<sup>[4]</sup>

Le faisceau hertzien est un système de transmission de signaux numériques ou analogiques et la transmission de ces signaux fait appel à quelques notions de bases notamment :

- Débit binaire (D) qui correspond au nombre de bits transmis chaque seconde :

$$D = \frac{1}{T_b} \text{ (bit/s)}$$

- Taux d'erreur par bit (TEB) qui correspond au nombre d'erreurs sur les bits reçus par le récepteur lors de la transmission de données. Il définit la qualité de liaison.



$$TEB = \frac{\text{Nombre de bits faux}}{\text{Nombre de bits transmis}}$$

- Bande de fréquences : Le FH utilise les bandes de fréquences allant de 300 MHz à 300 GHz. Les bandes de fréquence allouées à Orange par l'ANFR vont de 6,5 GHz à 80 GHz. Aujourd'hui toutes nos liaisons sont créées avec des bandes de fréquences de 19 GHz, de 23 GHz et de 80 GHz.
- Fréquence intermédiaire (FI) est une fréquence utilisée dans les émetteurs et récepteurs radio pour faciliter le traitement des signaux. Elle sert de support à la modulation et démodulation du signal dans l'InDoor Unit (IDU).
- La portée est la distance à laquelle un signal RF arrive en étant décodable. Elle se réduit lorsque la fréquence augmente. A Orange pour des courtes distances inférieures à 5 kilomètres, on utilise particulièrement la bande de fréquence de 80 GHz.
- Largeur de canal indique la partie plus ou moins large du spectre fréquentiel occupé. Celle utilisée au sein d'Orange France est de 14 MHz à 500 MHz.

### 3. Types de faisceaux hertziens

<sup>[5]</sup> Lorsque les extrémités d'une liaison ne sont plus en visibilité directe l'une de l'autre, l'affaiblissement des ondes se produit de manière très rapide. Cela a conduit à la création de deux types principaux de liaisons hertziennes, chacune adaptée à des conditions spécifiques :

- Les liaisons faisceaux hertziens à visibilité directe
- Les liaisons faisceaux hertziens transhorizon.

L'ingénierie mise en place au sein d'Orange, consiste à créer des liaisons à visibilité directe (LOS : Line of Sight).

#### a) Les liaisons hertziennes en visibilité directe

En visibilité directe, il ne doit y avoir aucun obstacle sur le parcours du faisceau.

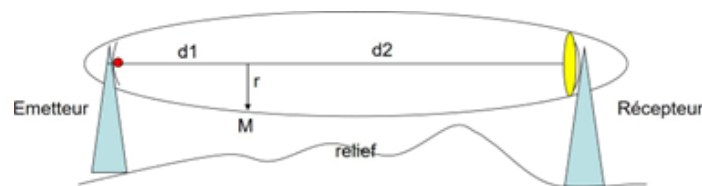


FIGURE 2 : ELLIPSOÏDE DE FRESNEL

L'ellipsoïde représentée ci-dessus constitue le premier ellipsoïde de Fresnel. C'est la région de l'espace où le champ électromagnétique est suffisamment fort pour assurer une transmission efficace. Le dégagement de l'ellipsoïde de Fresnel doit être suffisant pour franchir les obstacles du relief. Pour cela on définit un rayon ( $r$ ) qui est proportionnel à la longueur d'onde  $\lambda$  et à la distance  $D$ , celle-ci aura donc son importance quant au choix des fréquences pour franchir les obstacles. Il se calcule de cette façon :

$$r_{max} = \frac{1}{2} \sqrt{\lambda D}$$

Avec :

$r_{max}$  : rayon de l'ellipsoïde de fresnel en km

$\lambda$  : longueur d'onde en mètre en fonction de la fréquence

D : distance entre deux antennes en km

## a) Liaison faisceau hertzien transhorizon

Le faisceau hertzien transhorizon encore appelé faisceau troposphérique, désigne une liaison où les stations ne sont pas en visibilité directe. Les ondes radio se propagent en rebondissant sur la troposphère permettant ainsi la transmission des signaux sur des longues distances.

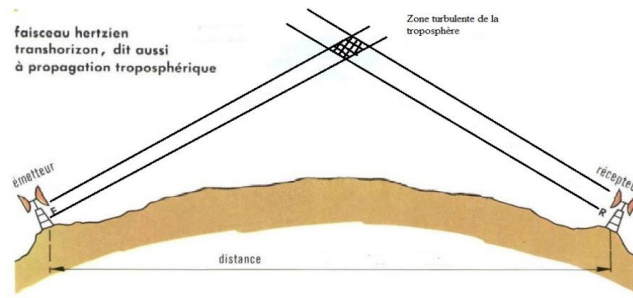


FIGURE 3: FAISCEAU TRANSHORIZON

## b) Affaiblissement en espace libre

L'affaiblissement en espace libre (Free Space Path Loss ou FSPL en anglais) est un phénomène qui décrit la perte de puissance d'un signal électromagnétique lorsqu'il se propage dans l'espace libre, c'est-à-dire sans obstacle entre l'émetteur et le récepteur. Il est donné par la formule :

$$A_{el} = 20 \log \left( \frac{4\pi D}{\lambda} \right)$$

Où :

$A_{el}$  : Affaiblissement en espace libre en dB

D : distance entre deux antennes en km

$\lambda$  : longueur d'onde en m

## 4. Principe de la liaison FH

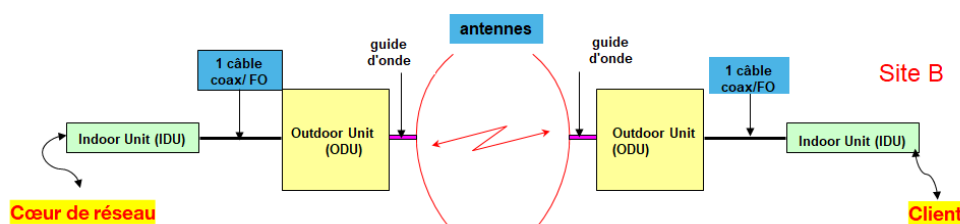


FIGURE 4 : SCHEMA D'UNE LIAISON HERTZIENNE

Un bond FH est une liaison de transmission entre deux points assurés par un support radioélectrique. Il est composé d'un système d'émission et de réception qui fonctionne en full duplex : l'émetteur et le récepteur peuvent transmettre les informations en même temps. Plusieurs éléments rentrent en ligne de compte dans l'établissement d'une liaison hertzienne. A chaque extrémité nous distinguons :

- Une antenne directive (antenne parabolique : 0.3 m à 1.8 m de diamètre) réalise la transformation d'une onde électrique en une onde magnétique en vue de sa propagation dans l'espace.
- Un IDU (InDoor Unit) ou SPU (Signal Processing Unit) est l'équipement qui a pour fonction globale la Modulation et la Démodulation du signal qu'il reçoit.

Un ODU (OutDoor Unit) ou RFU (Radio Frequency Unit) qui convertit les données provenant de l'IDU en un signal RF pour la transmission. Il définit également la polarisation. La connexion entre l'IDU et l'ODU est faite avec une fibre optique ce qui nous permet de transmettre jusqu'à 10 Gbps de débit.

La polarisation décrit la direction d'oscillation du champ électrique de l'onde par rapport à sa direction de propagation.

Il existe plusieurs types de polarisation mais nous utiliserons la polarisation horizontale ou verticale suivant les propriétés atmosphériques.

En polarisation verticale, le champ électrique oscille perpendiculairement à la surface de la Terre. Elle est moins sensible aux atténuations soit 1,5 dB/km du fait que les ondes polarisées verticalement tendent à subir moins de réflexions au sol et à traverser plus facilement les obstacles. Cela signifie qu'elles peuvent maintenir une trajectoire plus directe et stable, réduisant ainsi les perturbations et les pertes de signal.

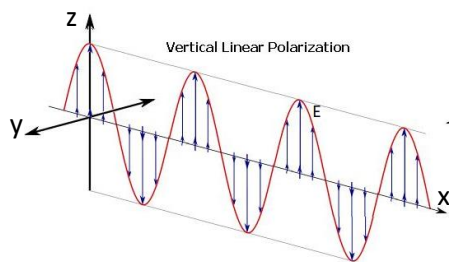


FIGURE 5: POLARISATION VERTICALE

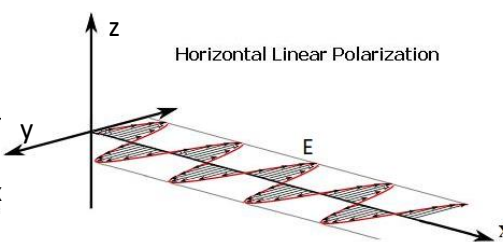


FIGURE 6: POLARISATION HORIZONTALE

## - Bilan de liaison

Le bilan de liaison a pour but de calculer la marge, c'est à dire la différence entre la puissance du signal reçu à l'entrée du démodulateur, et la puissance minimale que doit recevoir le récepteur pour assurer une démodulation correcte. Cette marge doit être supérieure ou égale à 5dB (norme définit par Équipe IOFH). Ainsi le calcul du bilan de liaison prend également en compte le calcul des pertes atmosphériques, matériel (dans les guides d'ondes, les câbles coaxiaux...), le gain des antennes.

$$P_r = P_e + (G_e + G_r) - A_{el} - \text{pertes}$$

$$MG = P_r - P_s$$

$P_r$  : puissance reçue en dBm ;

$P_e$  : puissance émise en dBm ;

$(G_e, G_r)$  : gain de l'antenne en dBi ;

$A_{el}$  : affaiblissement en espace libre en dB ;

$MG$  : Marge de gain en dBm ;

$P_s$  : seuil de réception en dBm donnée du constructeur

Pertes matérielles par exemple au niveau des guides d'ondes (pertes linéiques), plus les pertes atmosphériques (pluie, neige...).

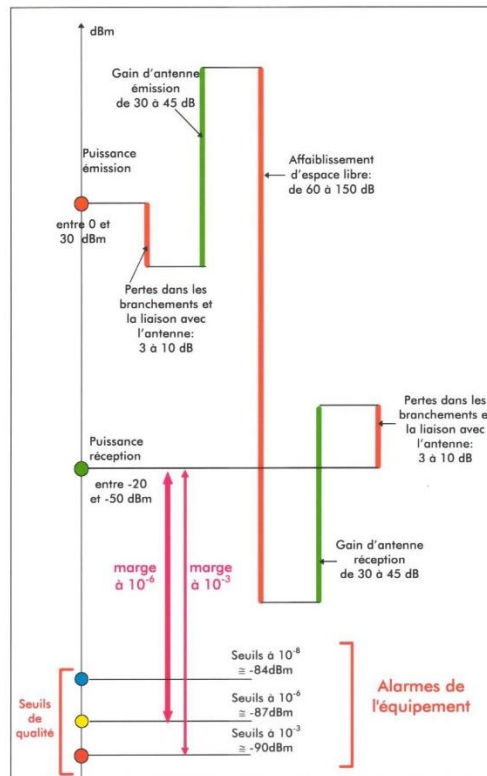


FIGURE 7: BILAN DE LIAISON

## 5. Transmission des signaux

Le signal RF capté par l'antenne est transmis vers le client selon le principe d'un récepteur superhétérodyne. Le signal à la fréquence RF est abaissé en fréquence intermédiaire (FI) par un mélangeur afin de faciliter le traitement des informations. A la sortie du mélangeur on a deux fréquences :  $FI = |F_p \pm OL|$ . En réception, on cherche à abaisser la fréquence donc on choisira la fréquence basse celle qui correspond à  $(FI = |F_p - OL|)$ .

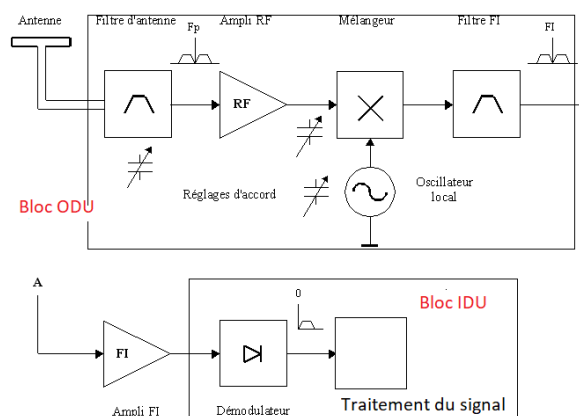


FIGURE 8: SCHEMA BLOC D'UNE RECEPTION DU SIGNAL RF

### a) Modulation et démodulation [2]

Au niveau de l'IDU, on utilise la modulation numérique combinée phase et amplitude dite modulation QAM (Quadrature Amplitude Modulation). En effet, la modulation QAM permet

d'atteindre une efficacité supérieure à celle du PSK ou FSK ce qui signifie qu'il peut transmettre plus d'informations.

## Exemple de la modulation 8-QAM

$M = 2^3 = 8$  soit 2 amplitudes combinées + 4 décalages de phase

Groupe de bit	Amplitude	Décalage de phase
000	1	0
001	2	0
010	1	1/4

Tableau 1: Exemple de début de codage 8-QAM

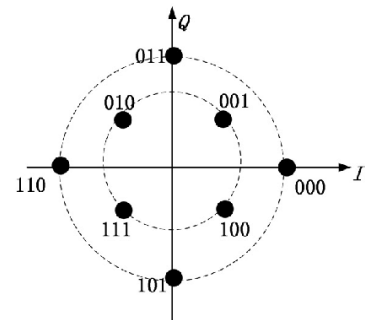


FIGURE 9: : CONSTELLATION 8-QAM

On crée des symboles, regroupements de bits. On les "code" avec un ensemble de valeurs de phases et d'amplitudes. Ces valeurs peuvent être représentées par des complexes (par exemple  $z = e^{j\frac{1}{4}}$ ). Pour créer une constellation on reporte pour un symbole l'amplitude qui est donnée par la distance entre le centre du cercle et le point du symbole, et l'angle fait par la direction du symbole par rapport à l'axe (Ox) représente l'argument.

Nous installons de nouveaux équipements FH permettant de moduler jusqu'à 4096-QAM pour des débits à l'ordre de 4 Gbps. Cette complexité de la modulation induit une forte sensibilité du signal aux perturbations atmosphériques. Pour pallier ce genre de problème on utilise une modulation adaptative.

Ces perturbations peuvent inclure des facteurs tels que la pluie, la neige, le brouillard, ainsi que des variations de l'ionosphère ou de la troposphère. Les perturbations atmosphériques peuvent provoquer un déplacement des points de la constellation, réduisant ainsi la distance entre les points et augmentant le risque de confusion entre les symboles.

### b) Modulation adaptative

La modulation adaptative offre la possibilité à un système radio d'adapter les paramètres de la modulation utilisée entre une valeur minimale et une maximale afin de mieux résister à des phénomènes qui altèrent la propagation de la transmission des ondes dans l'atmosphère. Lors de la conception de notre liaison hertzienne, nous allons étudier deux modulations :

- Une modulation maximale qui correspondra au débit souhaité permettant de transporter l'intégralité du flux avec une disponibilité minimum de la radio de 99%.
- Une modulation de référence, dont le débit garanti associé doit permettre de transporter les flux prioritaires (PDH, SDH, Ethernet).

Dans la suite de notre rapport, les généralités sur le FH vu plus haut vont être appliquées pour déployer la 5G.

## III. Déploiement de la 5G

### 1. Introduction

La première génération de téléphonie mobile sans fil est apparue dans les années 1980. Depuis, le cycle des générations de téléphonie mobile est de 10 ans environ et la 5G est aujourd'hui au cœur de notre réseau Orange.

## 2. Pourquoi la 5G ?

La 5G, 5e génération de réseau mobile qui succède à la 4G est utilisée pour répondre aux besoins croissants de connectivité des usagers. Elle propose des performances améliorées par rapport à son prédécesseur. Le tableau ci-dessous montre la différence entre les deux générations. <sup>[6] [7]</sup>

Comparaison	4G	5G
Débit	Jusqu'à 1 Gbps	Jusqu'à 10 Gbps
Temps de latence	30 à 50 ms	1 ms
Bande passante	100 MHz	30 GHz à 300 GHz
Fréquence	700 MHz – 2,6 GHz	Sub-6 GHz et les bandes millimétriques 24 GHz
Technologie	MIMO	Massive MIMO, mmWave, Beamforming

Tableau 2: Comparatif entre la 4G et la 5G

Nombre de nos liaisons hertziennes existantes n'avaient pas la capacité à supporter les exigences de la 5G, nous étions limités entre autres par la bande passante du fait d'utiliser le câble coaxial entre l'IDU et l'ODU et le guide d'onde entre l'ODU et l'antenne. En effet, il y a un problème d'affaiblissement élevé dans les câbles, une sensibilité aux interférences radio, des pertes effet joules.

Pour bénéficier donc des technologies hertziennes permettant de déployer la 5G, nous prendrons en compte lors de notre ingénierie :

- Des débits de 2 Gbps (5G light propre à Orange) ;
- Le choix de haute fréquence RF 23 GHz et 80 GHz ;
- Les largeurs de canaux de 500 MHz (valeur réglementée par ANFR par rapport aux fréquences utilisées) et Modulation élevée (256-4096 QAM) qui permettent d'augmenter significativement le débit ;
- Utilisation de la fibre optique entre l'IDU et l'ODU pour atteindre jusqu'à 10 Gbps.
- Des technologies qui nous proposent des niveaux d'efficacité spectrale (en bits/Hz) élevés c'est à dire quantité de données (en bits) qui peut être transmise par unité de bande passante (en hertz) ;
- Utilisation des ODU intégrés aux antennes, cela permet de supprimer les guides d'ondes. On s'affranchit des pertes liées aux câbles.

	Ancienne architecture	Nouvelle architecture
ODU	Non intégré	Intégré
Connexion	Câble coaxial	Fibre optique
Capacité	1 Gbps	Jusqu'à 10 Gbps
Modulation	BSKP à 128 QAM	256-4096 QAM

TABLEAU 3: COMPARATIF ARCHITECTURE

L'ingénierie qui sera mise en place dans ce rapport, va traiter de la 5G light (spécifique à Orange) avec un débit maximum de 2 Gbps.

Aussi, pour les sites distants de plus de 5 km, la fréquence de 80 GHz ne pourra plus être utilisée en raison de perturbations. En effet, plus la fréquence est élevée, plus l'affaiblissement en espace

libre est important. Pour remédier à cela et atteindre des hauts débits, nous utiliserons la technique d'agrégation de la porteuse (CA, Carrier Aggregation).

### 3. Agrégation de la porteuse (CA : Carrier Aggregation) : Principe

<sup>[1]</sup> L'agrégation de la porteuse est une technique utilisée pour augmenter la bande passante et améliorer les débits de données en combinant plusieurs bandes de fréquence. Ainsi, l'agrégation de porteuses peut s'effectuer sur :

- Classe A : des porteuses contiguës dans une bande c'est à dire que plusieurs fréquences porteuses sont adjacentes les unes aux autres dans un spectre de fréquences défini.
- Classe B : des porteuses non contiguës dans une bande c'est à dire que les fréquences porteuses ne sont pas adjacentes les unes aux autres dans un spectre de fréquences défini. Les porteuses sont espacées de manière à ne pas se chevaucher, ce qui peut réduire le risque d'interférences entre elles.
- Classe C : des porteuses sur des bandes différentes c'est à dire que les porteuses sont sur des bandes de fréquences différentes et non adjacentes. C'est cette dernière que nous utilisons pour déployer notre 5G.

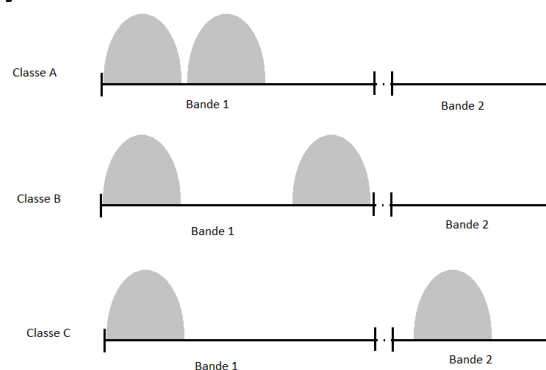


FIGURE 10: TYPES D'AGREGATION DE LA PORTEUSE

#### Exemple de CA 2+0 23/80 GHz

Dans cet exemple on utilise une agrégation de classe C, la bande de fréquence de 80 GHz va nous permettre de transmettre de volumes de données beaucoup plus important (1 Gbps) et l'autre de 23 GHz nous offre une meilleure portée. Ainsi, on peut maximiser la capacité de transmission tout en assurant une couverture fiable et une portée suffisante.

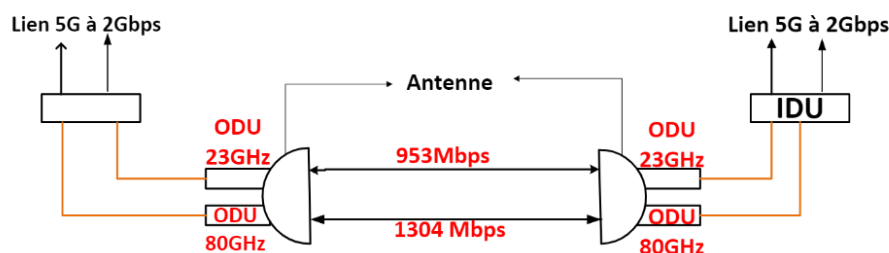


FIGURE 11: LIAISON AVEC AGREGATION DE LA PORTEUSE

### 4. Contexte du projet

À la suite d'un besoin de déploiement de la 5G dans une localité, le service CAP (Coordination Anticipation Programme) va créer une gamme OPUS, c'est l'application dite « workflow » (outil de gestion des tâches), elle va permettre de suivre les étapes à effectuer. Cette gamme OPUS sera renseigné dans une base ACCESS (base dans laquelle tous les projets



FH sont stockés pour les chefs de projet. Elle permet de noter toutes informations relatives aux projets).

FIGURE 12: BASE ACCESS

Le projet consiste à faire une étude de faisabilité du site : BEAULIEU-LIVINIERE situé à (longitude X = 736100 ; latitude Y = 1860279) afin d'augmenter le débit de la liaison initialement à 1Gbps à 2Gbps pour la 5G.

## 5. Etude d'ingénierie

Pour faire cette étude il nous faut :

- Rechercher les potentiels candidats (à confirmer par une visée avec drone) ;
- Définir la fréquence à utiliser ;
- Choisir la modulation afin de garantir le débit souhaité ;
- Etablir le RAI (bilan de liaison) ;
- Respecter les recommandations de l'IUT sur la qualité et la disponibilité de la liaison.

L'étude est faite à l'aide du logiciel de conception et de simulation dénommé ATOLL, il intègre toutes données constructeurs (type d'antennes, type de guide d'onde...) et toutes les recommandations de l'IUT, ainsi que la cartographie de la France.

Dans un premier temps, je vais identifier mon site A sur ATOLL par ses coordonnées géographiques. Ensuite, je vais effectuer une recherche du site B en prenant en compte que les deux sites doivent être à visibilité directe, et que les objectifs disponibilité et qualité de l'IUT sur les faisceaux hertziens doivent être respectés. On parlera des objectifs qualité et disponibilité plus en détails.

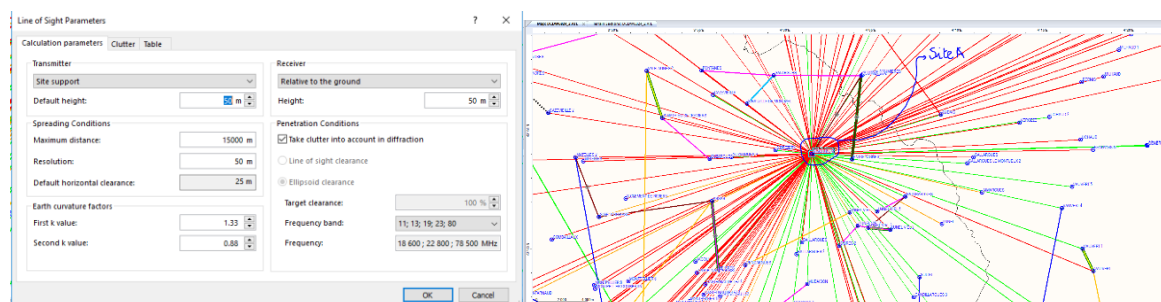


FIGURE 13: RECHERCHE SITE AVEC ATOLL

Sur la première capture d'écran, on a défini nos critères de recherches : Nous nous plaçons à 100 m de hauteur sur le pylône du site A, et nous délimitons la portée de rayonnement à 10 km (valeur choisie par défaut). Nous lançons ensuite notre recherche, l'objectif étant de trouver des sites qui peuvent avoir une ligne de visée (LOS) à 100% avec le site A. Nous allons prioriser les sites fibrés (avec NRA pour faciliter le raccordement vers le cœur du réseau).

Les traits en rouges montrent les sites ne répondent pas aux critères de recherche cependant les traits en verts désignent nos potentiels candidats pour le site B.



## Exemple de 2 cas possible que nous pouvons rencontrer :

Site A	Site B	Fréquence (MHz)	Distance (m)	LOS (%)	Etat
BEAULIEU 2	LUNEL VIEL	78 500	5420	100	ok
BEAULIEU 2	GUZARGUES	78 500	8 019	-100	non

### - Configuration de la liaison BEAULIEU 2 - LUNEL VIEL

Le logiciel ATOLL, nous donne les renseignements sur la distance entre les deux sites et le département concerné. Je me sers de ces informations pour trouver la fréquence nécessaire, la modulation, le type et la taille des antennes à utiliser par rapport à cette liaison grâce à un nouvel outil CONFIG UBT (il renseigne sur les équipements à utiliser).

On renseigne le département dans lequel on travaille, la distance entre les sites, le débit souhaité.

Config UBT nous propose une solution d'agrégation de la porteuse pour un débit de 2 Gbps, en utilisant des bandes fréquences différentes (23 GHz et 80 GHz). La bande de fréquence de 80 GHz permettra de transmettre des volumes de données beaucoup plus important (2443 Mbps) tandis que celle de 23 GHz assurera un débit garanti (790 Mbps) et une meilleure portée. De plus, l'outil indique la modulation à utiliser, le type d'antenne appropriée, ainsi que le coût de redevance ARCEP.

**NB :**

- Le débit garanti, c'est le débit qui respecte les critères d'indisponibilité et de qualité.
- Le débit max, c'est celui qui permet de valider une marge de gain de 5 dB minimum.

Dans ATOLL, je vais configurer ma liaison en prenant en compte les informations de Config-UBT c'est à dire j'aurai une liaison de 23 GHz et une autre de 80 GHz.

### 5.1. Configuration de la liaison à 23 GHz polarisation Horizontale.

J'utilise la polarisation horizontale car elle est plus impactée par la pluie. Si ma liaison passe en polarisation horizontale, ça passera forcément en polarisation verticale.

#### - Paramétrage de la liaison à 23 GHz.

Fréquence (GHz)	Antenne	Canal (MHz)	Modulation minimum	Débit garanti (Mbps)	Modulation max	Débit max (Mbps)
23	MT2-230(23/80)	112 MHz	512 QAM	790	4096 QAM	997

Antenne bi fréquence

Paramétrage de la liaison et modulations étudiés

FIGURE 14: CONFIGURATION DE LA LIAISON FH ATOLL

J'utilise une modulation adaptative avec une modulation maximale de 4096-QAM qui offre un débit maximal. Lors de la mise en service de la liaison et à la déclaration à ANFR, la liaison sera configurée sur la modulation maximale.

Une fois la liaison configurée, on calcule notre ellipsoïde de Fresnel.

### - Ellipsoïde de Fresnel :

Distance entre site A et B = 5420 m ; fréquence de 23 GHz ;

On calcule le rayon de Fresnel pour déterminer la taille de notre ellipsoïde  $r_{max} = \frac{1}{2}\sqrt{\lambda D}$ , on trouve  $r = 4,2$  m.

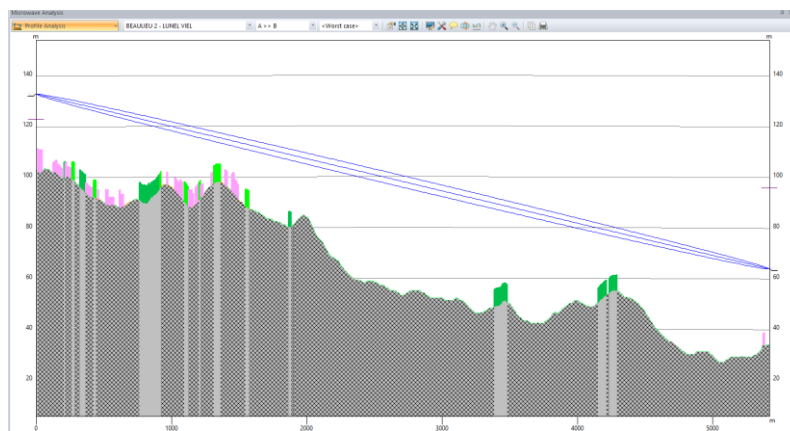


FIGURE 15: PROFIL DE LA LIAISON AVEC ATOLL

Le trait en bleu représente l'ellipsoïde et les schémas en gris et vert représente la végétation.

De plus, je calcule aussi le bilan de liaison afin de trouver la marge de gain.

### - Bilan de liaison :

La formule de calcul est :  $P_r = P_e + (G_e + G_r) - A_{el} - pertes$  et  $MG = P_r - P_s$

Dans cette formule  $G_e$  et  $G_r$  représentent respectivement le gain de l'antenne à l'émission et à la réception, et  $P_e$  la puissance à l'émission. Leur valeur est donnée par le constructeur (voir datasheet en annexe). Exemple  $G_e = G_r = 40$  dBi

Aussi, le seuil de réception est la puissance nécessaire pour garantir une certaine qualité de service ou un certain débit en présence de bruit.

Pe (dBm)	Distance (m)	Gain des antennes (dBi)	Pertes atm (dB)	Perte mat (dB)	Ael (dB)	Seuil de réception (dBm)	Pr (dBm)	MG (dB)
21,6	5420	40 x2	1,04	0	134,34	-59,7	-33,78	25,92

Tableau 4: Bilan de liaison

$$*P_r = 21,6 + 40 \times 2 - (134,34 + 1,04) = -33,78 \text{ dBm}$$

Pertes atmosphériques prennent en compte les pertes de l'air sec + pertes vapeur d'eau + pertes dues à la pluie.

Le calcul de ces pertes est donné dans la (Recommandation UIT-R P.676-13 du 08/2022 affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère et effets associés) voir annexe.

Pour cette liaison, la marge de gain trouvée est largement supérieure à 5 dB (seuil requis). Je vérifie par la suite si les critères qualité et disponibilités sont respectés.

	<i>A &gt;&gt; B (1e-06) Plain</i>	<i>B &gt;&gt; A (1e-06) Plain</i>
Thermal fade margin	25.38 dB	25.87 dB
Availability margin	25.38 dB	25.87 dB
Non-quality for the worst month (Objective)	1 sec (6 min 34 sec)	1 sec (6 min 34 sec)
Unavailability for an average year (Objective)	34 min 12 sec (1 h 18 min 53 sec)	38 min 36 sec (1 h 18 min 53 sec)
Frequency band	23	
Length	5 419 m	

[Link Budget](#)

FIGURE 16: BILAN DE LIAISON AVEC ATOLL

## - Critère de disponibilité et de qualité

Le critère de disponibilité et de qualité est défini dans la recommandation REC. UIT-R F.1703-0. Il stipule que l'objectif disponibilité et qualité d'une liaison hertzienne d'une longueur d'au moins 30 km doivent correspondre à 99,985% (soit une indisponibilité de 1h 18 min 53 sec).

### Calcul du taux de disponibilité aller-retour (AR) pour le critère disponibilité

Conformément à la recommandation, le calcul du taux de disponibilité aller-retour (AR) dépend de la longueur de la liaison ( $L_{Link} = 5 \text{ km}$ ), la longueur de référence ( $L_R = 2500 \text{ km}$ ), les paramètres  $B_1 = 1,9 \times 10^{-3}$  et  $C_1 = 1,1 \times 10^{-4}$  qui dépendent de la distance de la liaison (ces valeurs sont données dans la recommandation UIT-R F.1703-0) avec la formule :

$$AR = 1 - \left( B_1 \frac{L_{Link}}{L_R} + C_1 \right)$$

Dans les calculs qui suivent, on suppose qu'une année correspond à 525 960 min.

On trouve  $AR = 0,999862$  soit  $AR = 99,98\%$  (Taux de disponibilité aller-retour)

### Un temps d'indisponibilité de 59,85 min (le calcul se fait sur un an).

On trouve après simulation sur ATOLL que les objectifs qualité et disponibilités sont respectés.

<b>General</b>	<i>A &gt;&gt; B (1e-06) Plain</i>	<i>B &gt;&gt; A (1e-06) Plain</i>		
Quality objectives	OK	OK	Non-quality for the worst month (Objective)	1 sec (6 min 34 sec)
Availability objectives	OK	OK	Unavailability for an average year (Objective)	34 min 12 sec (1 h 18 min 53 sec)
			Frequency band	23
			Length	5 419 m

FIGURE 17: CAPTURE D'ECRAN RECOMMANDATION

## 5.2. Configuration de la liaison de 80 GHz polarisation verticale

Pour la liaison de 80 GHz, on la paramètre au plus juste par rapport au débit manquant c'est-à-dire 1304 Mbps, en choisissant la largeur spectrale qui s'adapte le mieux par exemple 250 MHz. La fréquence de 80 GHz n'assure pas la disponibilité car elle est plus sensible à la pluie et plus susceptible de caser devant la 23 GHz.

A la fin, on va additionner les débits validés de toutes les liaisons pour atteindre notre objectif 2 Gbps. Une seule antenne sera utilisée pour les deux fréquences la MT2-80(23/80).

### Calcul théorique du débit manquant :

Données théoriques : largeur de canal = 500 MHz, Modulation 256-QAM (modulation maximale)

$$\text{Débit} = \text{largeur de canal} \times \log_2(M)$$

$$M = 256 \text{ (niveau de modulation)}$$

$$\text{Débit} = 250 \times 10^6 \times \log_2(256) = 4000 \text{ Mbps}$$

Pour 80 GHz, on trouve un débit manquant théorique de 4 Gbps en utilisant la modulation maximale de 256-QAM et un canal de 500 MHz.

Par ailleurs, la simulation sur ATOLL fournit une estimation plus réaliste et pratique du débit dans un environnement donné, par rapport à un calcul théorique simplifié. Voici le résultat général de la simulation sur ATOLL.

## Résultat :

Pour la solution CA+2 23/80 GHz, on a trouvé :

- Liaison de 23 GHz : débit garanti de 760 Mbps et débit maximum 997 Mbps
- Liaison de 80 GHz : débit garanti de 92 Mbps et débit maximum de 3067 Mbps

Total : débit garanti de 852 Mbps et débit max de 4064 Mbps.

Le débit max dépasse largement l'objectif de 2 Gbps car par défaut on pousse les liaisons au maximum de leurs possibilités des 5 dB de marge.

## Conclusion sur l'étude :

En somme, le projet consistait à faire une étude de faisabilité du site A afin d'étudier quel candidat serait idéal pour créer une liaison hertzienne 5G. Je me suis rendu compte après des simulations que tous les candidats n'étaient pas idéals car ils ne respectaient pas les critères de sélectivité d'un candidat (à savoir avoir une marge de gain supérieure à 5dB, objectivité qualité et disponibilité requis...). J'ai opté pour le site de Lunel, car la distance entre les deux sites est bonne, le site de Lunel est capable d'intégrer la technologie d'agrégation de la porteuse et enfin, il y a déjà un pylône dans le site ce qui pourrait faciliter la montée des antennes.

Une étude supplémentaire sera faite par nos collègues techniciens pour confirmer la hauteur des antennes, une étude de charge et de masse sur les pylônes.

## Conclusion générale :

En somme, ce rapport présente les principales activités réalisées lors de ma première année d'alternance au sein d'Orange France situé à Montpellier. J'ai participé au projet de désinvestissement des équipements obsolètes, élaboration des fiches de suppression de fréquence auprès de l'ANFR pour des gains d'argent.

Aussi, j'ai contribué au déploiement du réseau Orange dans des zones difficile d'accès par fibre optique. Pour ce faire, j'ai effectué des études d'ingénierie pour la conception et la mise en service des liaisons hertziennes grâce au logiciel ATOLL.

Par ailleurs, j'ai développé de nombreuses compétences, tant sur le plan technique que personnel. En effet, l'utilisation du logiciel ATOLL m'a permis de comprendre les notions techniques sur la modulation adaptative, la technologie par agrégation de porteurs, et sur la technologie 5G. Je peux joindre à cela les déplacements sur site pour réaliser des audits terrain, afin de confronter notre SI au terrain.

Cette première année d'alternance a été une véritable immersion dans le secteur des télécommunications m'offrant également une vision des métiers autour d'ingénierie réseaux ainsi que le fonctionnement des grandes structures comme Orange. Les missions effectuées, allant du pilotage des projets de démontage à la conception des liaisons pour la 5G et à la gestion de projet, m'ont permis d'acquérir des compétences solides. Je continue de travailler sur les projets en cours et l'année prochaine je commencerai à travailler sur le déploiement du FH sur les sites neufs et aussi à travailler sur les antennes bi fréquence.

## **Bibliographie**

- <sup>[1]</sup> Nokia (07/04/2023 Ed 6.3). Publication. Recueil Technique d'ingénierie Wavence sur le réseau Orange France.
- <sup>[2]</sup> S. JARRIX & Pascal FALGAYRETTES. (2024). Cours de Master 1. la Modulation numérique. Fds Montpellier
- <sup>[3]</sup> UIT-T. (12/2002). Recommandation UIT-T G.826. Genève (Suisse)
- <sup>[4]</sup> Alcatel. (2002). Publication. Connaissance des liaisons hertziennes. Orange France
- <sup>[5]</sup> Ecoles des Métiers Techniques. (2019). Publication. Acquérir la technique de transmission sur faisceau hertzien. Orange France.
- <sup>[6]</sup> AKHIL GUPTA. (2015). Article. A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies. School of Electronics and Communication Engineering, Shri Mata Vaishno Devi University, Katra 182320, India
- <sup>[7]</sup> ERIK DAHLMAN, STEFAN PARKVALL & JOHAN SKOLD. (2018). 5G NR The next generation wireless access technology. Academic Press

Annexes

Annexe 1: Abaque pertes atmosphériques ..... 23

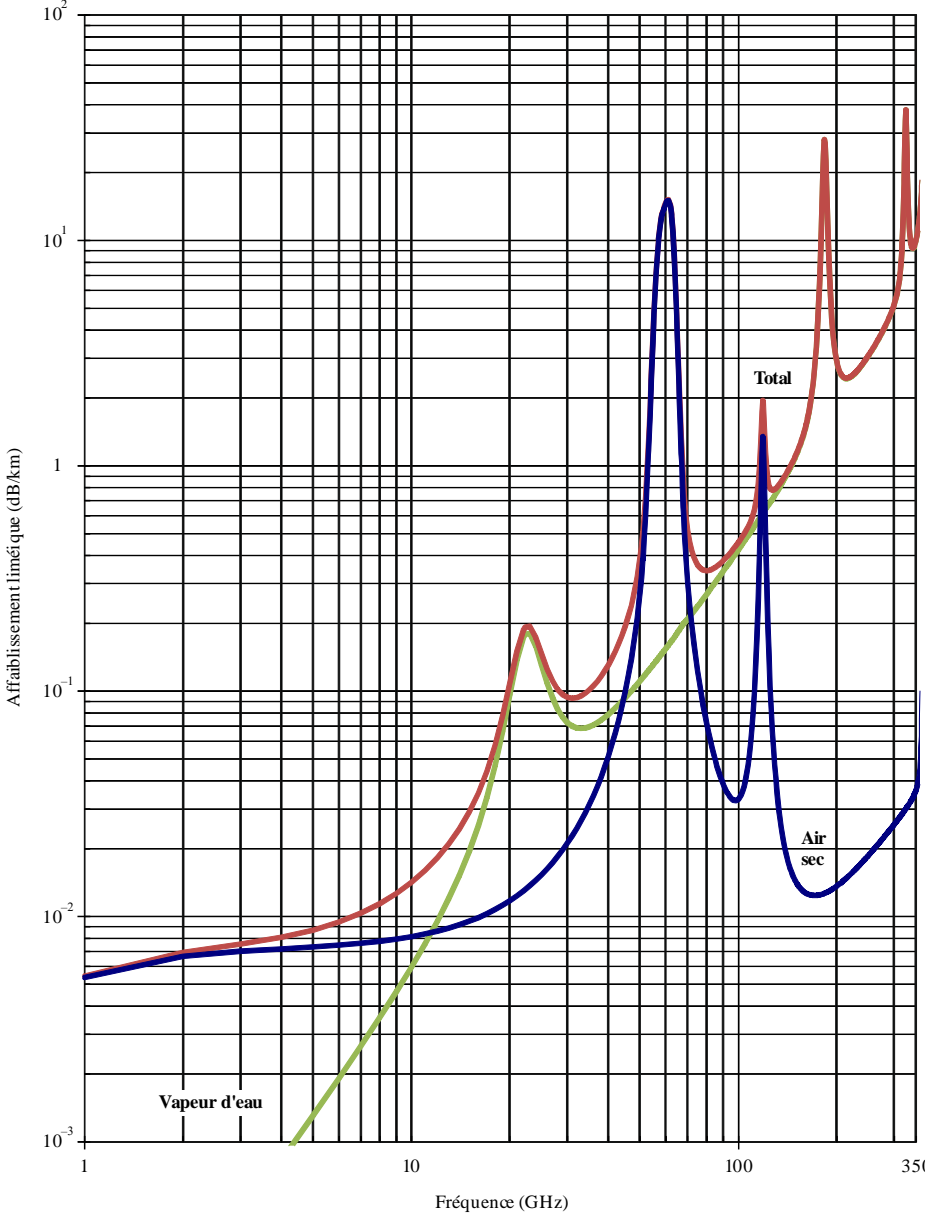
Annexe 2: correspondance entre les noms des plans et largeurs spectrales pour le 80 ghz (anfr) ..... 23

Annexe 4: Site de LUNEL

Annexe 5: Site de BEAULIEU ... 24

Annexe 6: Datasheet antenne MT2 80(23/80)..... 25

Affaiblissement linéique dû aux gaz de l'atmosphère  
(Pression = 1 013,25 hPa; Température = 15°C; Concentration en vapeur d'eau = 7,5 g/m³)



ANNEXE 1: ABAQUE PERTES ATMOSPHERIQUES

Plan VZ 125 Mhz	Plan VA 250 Mhz	Plan VB 500 Mhz	Plan VC 750 Mhz	Plan VD 1 Ghz	Plan VE 1,25 Ghz	Plan VF 2 Ghz
CEPT 70-80B	CEPT 70-80C	CEPT 70-80D	CEPT 70-80E	CEPT 70-80F	CEPT 70-80G	CEPT 70-80H
Ecart duplex 10000 Mhz	Ecart duplex 10000 Mhz	Ecart duplex 10000 Mhz	Ecart duplex 10000 Mhz	Ecart duplex 10000 Mhz	Ecart duplex 10000 Mhz	Ecart duplex 10000 Mhz

ANNEXE 2: CORRESPONDANCE ENTRE LES NOMS DES PLANS ET LARGEURS SPECTRALES POUR LE 80 GHZ (ANFR)



**ANNEXE 3: SITE DE LUNEL**



**ANNEXE 4: SITE DE BEAULIEU**



## MT536M49VH

23/80 GHz 40/50 dBi 2 Ft Parabolic Antenna



**Wireless Edge**  
Antenna Solutions  
An Mti Company

### Electrical

Regulatory Compliance		ETSI EN 302 217-4 V2.1.1 (2017-05), FCC 47 CFR 101.115, RoHS, CE 0682		
Frequency		21.2 – 23.6 GHz 71 – 76 GHz, 81- 86 GHz		
Gain		Low Band	Mid Band	High Band
	Low Range	39.5 dBi	40 dBi	41 dBi
	High Range	50.0 dBi		51.0 dBi
VSWR	Low Range	2:1 max		
	High Range	1.5:1		
3 dB Beam Width	Low Range	1.7°		
	High Range	0.5°		
Polarization	Low Range	Single or Dual Pol		
	High Range	Single or Dual Pol		
Side Lobes Suppression	Low Range	ETSI Class 3, FCC Category A		
	High Range	ETSI Class 3, FCC		
Cross Polarization	Low Range	ETSI Class 3, FCC		
	High Range	ETSI Class 3, FCC		
F/B Ratio	Low Range	ETSI Class 3, FCC 67 dB		
	High Range	ETSI Class 3, FCC 67 dB		
XPD	Low Range	ETSI Category 2, 27 dB		
	High Range	25 dB		
Isolation				
WR42 to WR12	Low Range	80 dB		
WR42 to WR12	High Range	25 dB		
Input Power		10 W max		

### Mechanical

Dimensions	Ø655 x 300 mm depth
Weight	6.8 Kg max
Interface	
Low Range	WR42 or circular
High Range	WR12 or circular
Radome	Plastic
Mounting Kit	MT-120032/A

### Environmental

Test	Standard	Duration	Temperature	Notes
Low Temperature	IEC 68-2-1	72 h	-55 °C	
High Temperature	IEC 68-2-2	72 h	+71 °C	
Temp. Cycling	IEC 68-2-14	1 h	-45 °C +70 °C	3 Cycles
Vibration	IEC 60721-3-4	30 min/axis		Random 4M5
Shock Mechanical	IEC 60721-3-4			4M5
Humidity	ETSI EN300-2-4 T4.1E	144 h		95%
Water Tightness	IEC 529			IP64
Solar Radiation	ASTM G53	1000 h		
Salt Spray	IEC 68-2-11 Ka	500 h		
Ice And Snow				25 mm Radial
Wind Speed	Survival			252 Km/h
	Operation			164 Km/h

This document and the information contained in it are proprietary and confidential to MTL. No person is allowed to copy reprint reproduce or publish any part of this document nor disclose its contents to others nor make any use of it nor allow or assist others to make any use of it, unless by the prior written express authorization of MTL and then only to the extent authorized.

11 Hamelacha st. Afek Industrial Park, Rosh-Ha'Ayin 4809121 | Tel. +972.3.9008900 | Fax. +972.3.9008901

www.mtiwe.com

Rev-02

### ANNEXE 5: DATASHEET ANTENNE MT2 80(23/80)