

ANWAR EL RAFEI

**Caractérisation à grande échelle d'un signal 60  
GHz dans un environnement minier confinés.**

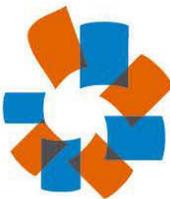
Mémoire  
présenté

À la Faculté des études supérieures de l'Université de  
Québec en Abitibi-Témiscamingue  
Dans le cadre du programme de maîtrise en  
ingénierie pour l'obtention du grade de Maître en  
ingénierie (M.I.)

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-  
TÉMISCAMINGUE QUÉBEC

Mai 2012

© Anwar El Rafei, 2012



# BIBLIOTHÈQUE

Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue  
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

## Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans Depositum, site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous.

L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre. Il est donc interdit de reproduire ou de publier en totalité ou en partie ce document sans l'autorisation de l'auteur.

## Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue obtained the permission of the author to use a copy of this document for non-profit purposes in order to put it in the open archives Depositum, which is free and accessible to all.

The author retains ownership of the copyright on this document. Neither the whole document, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

## Dédicace

*À l'âme de Ma Chère grand-mère,  
Qui est décédée le jour de Mon Séminaire 2.*

*À mes très chers  
parents,*

*Aucun mot ne pourra exprimer mes sentiments  
envers vous.*

*À mes chers frères et à ma sœur.  
Pour tout l'amour et le soutien que vous m'avez  
offert, je vous dis MERCI.*

*À toute ma famille*

...

*À tous mes Professeurs*

...

*À tous mes Amis*

...

*À tous ceux qui m'aiment*

...

*À tous ceux que j'aime*

...

*Anwar*

# Résumé

Les télécommunications sans fil ont connu un grand intérêt et succès depuis plusieurs années grâce à leur facilité de déploiement par rapport aux télécommunications filaires, leur support de la mobilité des nœuds communiquant et leur souplesse d'utilisation par les usagers.

Le problème actuel des télécommunications sans fil est de pouvoir assurer des débits élevés de transmission capable de supporter des applications fortement gourmande en bande passante. Pour relever ces défis plusieurs solutions sont proposées. Parmi elle la montée en fréquence vers le spectre des ondes millimétriques. Cette approche est à la base de notre étude qui porte un intérêt particulier à l'étude de la propagation d'un signal 60 GHz dans un milieu confiné en mettant en œuvre un sondeur de canal pour ses ondes millimétriques.

Les résultats des mesures à grande échelle d'un signal à 60 GHz sont étudiés dans plusieurs scénarios : visibilité directe, et en visibilité obstruée en utilisant comme obstacle un être humain, dans un environnement de laboratoire et dans un milieu souterrain minier. Les résultats montrent une différence considérable dans l'atténuation de canal pour ces différents scénarios.

Ce travail a été effectué en partie au laboratoire de recherche en communications sous terraine LRTCS à Val-d'Or, Canada et pour la partie expérimentation sous terre dans la mine de CANMET.

# Abstract

Wireless communications have been a great interest and success for several years because of their infrastructure simplicity compared to wired telecommunications, their important terminal mobility, and also their flexibility of operation by users.

The current problem of wireless telecommunications is being able to provide high transmission rates capable of supporting intensive applications consuming bandwidth. To meet these challenges, several solutions are proposed. Among them the rise in frequency to millimeter wave spectrum. This approach is the basis of our study that has a particular interest in the study of signal propagation in 60 GHz in a confined environment by implementing a channel sounder for its millimeter wave.

The measurement results of a large-scale signal at 60 GHz are studied in several scenarios: Line of Sight and obstructed Line of sight using a human being as an obstacle in a laboratory environment and in an underground mining environment. The results show a considerable difference in the channel attenuation for these different scenarios.

This work was done in part at the Underground Communications Research Laboratory LRTCS in Val-d'Or, Canada and the part of experimentation in underground CANMET mine.

# Remerciements

Il m'est agréable de m'acquitter d'une dette de reconnaissance auprès de toutes les personnes, dont l'intervention au cours de ce projet, a favorisé son aboutissement.

Ainsi, je tiens à exprimer ma profonde gratitude et tiens aussi à remercier tout le personnel du laboratoire de Recherche Télébec en communications souterraines (LRTCS) pour leur soutien et pour leur générosité considérable quant à l'offre de l'information.

Je tiens à exprimer mes profondes gratitude à M. Nahi Kandil , mon Directeur de Recherche au LRTCS, Professeur à l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) et responsable du programme de la Maîtrise en Ingénierie, de m'avoir accueilli dans son groupe de recherche très dynamique et d'avoir accepté la présidence de mon jury de thèse.

J'exprime ma reconnaissance à Messieurs Chahé Nerguizian, Professeur à l'École Polytechnique de Montréal et Nadir Hakem, Professeur à l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail et d'assurer la tâche de rapporteur.

Je voudrais aussi remercier Monsieur Djilali Hammou, Poste doctorat au laboratoire (LRTCS), d'avoir suivi de près le déroulement de ce travail et d'avoir participé à son enrichissement ainsi qu'à sa valorisation.

Que le corps professionnel et administratif de l'UQAT trouve ici mes vifs remerciements.

Que messieurs les membres de jury trouvent ici l'expression de mes reconnaissances pour avoir accepté de juger mon travail.

Que tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail trouvent l'expression de mes remerciements les plus chaleureux.

# Table des matières

Dédicace.....	ii
Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
Remerciements.....	v
Liste des tableaux.....	x
Liste des figures.....	xi
Glossaire des abréviations.....	xiii
Chapitre 1.....	1
Introduction générale.....	1
1.1 Objectifs de l'étude.....	2
Chapitre 2.....	4
Systèmes de communications sans fil.....	4
2.1 Introduction.....	4
2.2 Classification des technologies réseaux.....	4
2.3 Les Réseaux personnels sans Fil : WPAN.....	6
2.3.1 Home RF.....	6
2.3.2 Les liaisons infrarouges.....	7
2.3.3 La technologie Bluetooth (IEEE 802.15.1).....	7
2.3.4 La technologie Ultra Wide Band (IEEE802.15.3).....	8
2.3.5 La technologie ZigBee (IEEE802.15.4).....	8
2.4 Les Réseaux Locaux Sans Fil : WLAN.....	8
2.4.1 La technologie Wifi.....	9
2.4.2 Le standard 802.11n.....	10
2.4.3 HiperLAN2.....	10

2.5	Les réseaux métropolitains : WMAN .....	11
2.5.1	WIMAX.....	11
2.5.2	MBWA.....	13
2.6	Les réseaux étendus Sans fil : WWAN .....	13
2.6.1	GSM.....	15
2.6.2	GPRS.....	16
2.6.3	UMTS.....	17
2.7	Conclusion.....	19
Chapitre 3 .....		20
Technologie 60 GHz .....		20
3.1	Introduction.....	20
3.3	Applications éventuelles .....	26
3.3.1	Amérique du nord .....	29
3.3.2	Japon .....	30
3.3.3	Australie .....	30
3.3.4	Corée.....	30
3.3.5	Europe .....	31
3.4	Effort de standardisation (normalisation) de l'industrie .....	32
3.4.1	IEEE 802.15.3c.....	33
3.5	Conclusion.....	35
Chapitre 4 .....		36
Propagation d'un signal RF .....		36
4.1	Introduction.....	36
4.2	Modèle de la propagation.....	36
4.2.1	Propagation en espace libre .....	36
4.2.1	Trajets multiples.....	39

4.3	Évanouissements .....	42
4.3.1	Évanouissement à grande échelle.....	42
4.3.2	Évanouissement à petite échelle .....	43
4.4	Conclusion.....	44
Chapitre 5 .....		45
Système de mesure proposé et Mesures expérimentales .....		45
5.1	Introduction.....	45
5.2	Conception du système de mesures .....	46
5.2.1	Bloc Émetteur .....	46
5.2.2	Bloc Récepteur.....	47
5.3	Simulation sous ADS.....	48
5.4	Réalisation du système de mesure .....	50
5.5	Mesure dans le laboratoire .....	51
5.5.1	Mesure en visibilité directe (LOS).....	52
5.5.2	Mesure en visibilité obstruée (OLOS).....	54
5.6	Mesure dans la mine .....	56
5.6.1	Mesure en visibilité directe.....	57
5.7	Mesure en visibilité obstruée.....	59
5.8	Comparaison entre les deux environnements .....	61
5.9	Conclusion .....	63
Chapitre 6 .....		65
Conclusion générale et perspective.....		65
Chapitre 7 .....		68
Annexe A.....		68
Bibliographies.....		79

## Liste des tableaux

Tableau 1– Comparaison des propriétés des liens de 60 GHz, ULB et systèmes 802.11n.....	23
Tableau 2– Comparaison entre rendements spectraux des technologies 60 GHz, ULB et IEEE 802.11n.....	25
Tableau 3– Exigences de taux de données pour différentes résolutions, des taux de trame, et le nombre de bits par canal par pixel pour les standards TVHD. ....	28
Tableau 4– Plan de la bande de fréquences et les limites de puissance d'émission, PIRE, et le gain d'antenne pour les différents pays.....	29
Tableau 5– Récapitulatif des modes de PHY dans la norme IEEE 802.15.3c.....	35
Tableau 6 – Comparaison d'exposant de perte ( $n$ ) et d'écart-type ( $\sigma$ ) dans les deux environnements. ....	62

## Liste des figures

Figure 1– <i>Photo d'une galerie minière.</i> .....	3
Figure 2– <i>Différents types de réseaux sans fil et portées typiques.</i> .....	5
Figure 3– <i>Exemple de WPAN.</i> .....	6
Figure 4– <i>Exemple de WLAN.</i> .....	10
Figure 5– <i>Architecture du réseau WIMAX.</i> .....	12
Figure 6– <i>Architecture du réseau WWAN.</i> .....	14
Figure 7– <i>Architecture du réseau GSM.</i> .....	15
Figure 8– <i>Architecture du réseau GPRS.</i> .....	17
Figure 9– <i>Architecture du réseau UMTS.</i> .....	18
Figure 10– <i>Catégories des Réseaux sans Fil.</i> .....	19
Figure 11– <i>Distribution du spectre électromagnétique</i> .....	21
Figure 12– <i>Attribution de fréquences dans le monde pour la bande 60GHz et son fonctionnement.</i> .....	23
Figure 13– <i>distance en fonction du taux d'information pour les normes WLAN et WPAN.</i> .....	26
Figure 14– <i>Représentation d'un canal de propagation.</i> .....	37
Figure 15– <i>Ellipsoïde de Fresnel.</i> .....	38
Figure 16– <i>Perturbations de propagation</i> .....	40
Figure 17– <i>Graphe du « Path Loss ».</i> .....	43
Figure 18– <i>Schéma synoptique de l'émetteur.</i> .....	46
Figure 19– <i>Schéma synoptique du récepteur.</i> .....	47
Figure 20– <i>Simulation sous ADS.</i> .....	49
Figure 21– <i>Puissance reçue en fonction de distance.</i> .....	50
Figure 22– <i>Système de mesure réalisé.</i> .....	51
Figure 23– <i>Salle de mesure au laboratoire de recherche.</i> .....	52
Figure 24 – <i>Système de mesure au laboratoire.</i> .....	53

Figure 25– Puissance reçue en visibilité directe à la distance de 0.5m.....	53
Figure 26– Puissance reçue en visibilité directe à la distance 1m. ....	54
Figure 27– Puissance reçue en visibilité obstruée à la distance de 0.5m. ....	55
Figure 28– Puissance reçue en visibilité obstruée à la distance de 2m. ....	55
Figure 29– Puissance reçue en visibilité obstruée à la distance de 4.5m. ....	56
Figure 30– Système de mesure dans la mine. ....	57
Figure 31– Puissance reçue en visibilité directe à la distance de 0.5m.....	58
Figure 32– Puissance reçue en visibilité directe à la distance de 1m.....	58
Figure 33– Puissance reçue en visibilité obstruée à la distance de 0. ....	59
Figure 34– Puissance reçue en visibilité obstruée à la distance de 2m. ....	60
Figure 35– Puissance reçue en visibilité obstruée à la distance de 4.5m. ....	60
Figure 36– Comparaison de la puissance reçue en visibilité directe dans les deux environnements. ....	62
Figure 37– Comparaison de la puissance reçue en visibilité obstruée dans les deux environnements. ....	63

## Glossaire des abréviations

AM	Amplitude Modulation
ACMA	Australian Communications and Media Authority
ARIB-STD	Association of Radio Industries and Business STandard
A/V	Audio/Video
ASN	Access Service Network
ADS System	Advanced Design
BPSK	Binary Phase Shift Key
BPS	Bits per Second
BSC	Base Station Controller
CEPT	Conference of Postal and Telecommunications Administrations
CMS Signaling	Common Mode
dBm	Décibel Milliwatt
dBi	Décibel Isotope
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
ECC	Electronic Communications Committee
ERC	European Radiocommunications Committee
ECMA	European Computer Manufacturers Association
FM	Frequency Modulation
FCC	Federal Communications Commission
GPS	Global Positioning Service
Gbps	GigaByte Per Second
GHz	GigaHertz
GSM	Global System for Mobile Communication
GGSN	Gateway GPRS Node
GPRS	General Packet Radio Service
HD	High Definition
HDTV	High-Definition Television
HIS	High Speed Interface
Hz	Hertz
HDMI	High Definition Multimedia Interface
HRP	High-Rate Physical Layer
HiperLAN2	High Performance Radio Local Area Network 2
HomeRF	Home Radio Frequency

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IC-SMT Telecommunications	Industry Canada Spectrum Management and
irDA	Infrared Data Association
IP	Internet Protocol
IrPHY	Infrared Physical Layer Specification
IrLAP	Infrared Link Access Protocol
IrLMP	Infrared Link Management Protocol
IrCOMM	Infrared Communications Protocol
IrOBEX EXchange	Infrared OBject
IrLAN	Infrared Local Area Network
IF	Intermediate Frequency
LOS	Line-Of-Sight
LSB	Least Significant Bit
LRP	Low-Rate Physical Layer
LRTCS Souterraines	Laboratoire de Recherche Télébec en Communications
LO	Local Oscillator
MAC	Medium Access Control
MPHPT	Ministry of Public Management, Home Affairs, Posts and Telecommunications
MFSG	Millimeter-wave Frequency Study Group
MSB	Most Significant Bit
Mbps	Megabyte per second
MSK	Minimum Shift Key
mW	milliwatt
MWBA	Mobile Broadband Wireless Access
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MSC	Mobile Service Switching
NLOS	Non Line Of Sight
PAs	Power Amplifiers
PHY	PHYsical layer
8PSK	Eight Phase Shift Key
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Key
RF	Radio Frequency
RGB	Red Green Blue
SC	Single Carrier
SMS	Short Message Service
SGSN	Serving GPRS Support Node

TV	TeleVision
TG	Task Group
TDMA	Time Division Multiple Access
UWB	Ultra-WideBand
USA	United States of America
UEP	Unequal Error Protection
UMTS	Universal Mobile Télécommunication System
VoIP	Voice Over Ip
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area
Network WMAN	Wireless Metropolitan
Area Network WWAN	Wireless Wide
Area Network WirelessHD	Wireless High
Definition	
WiGig	Wireless Gigabit
Wimax	Worldwide Interoperability for Microwave Access
Wifi	Wireless Fidelity

# Chapitre 1

## Introduction générale

Durant cette dernière décennie, la bande de fréquence de 60 GHz a trouvé un grand intérêt pour le support des transmissions à très haut débit, dépendant principalement de la largeur inégalée de bande passante mise comme bande ISM, la faible puissance de rayonnement qui permet l'utilisation de la fréquence dans une propagation à courte ou à très courte portée qui rend le système de communication plus sécuritaire.

En effet, la bande de fréquences 60GHz présente une atténuation de parcours de distance entre émetteur et récepteur mille fois (30 dB) plus importante que qu'une même atténuation subit par un signal à 2 GHz dans un espace libre. Elle est destinée à supporter les applications de réseaux sans fil requérant des débits de transfert de données très élevés. A titre d'exemple, cette bande pour supporter les échanges de gros fichiers, le streaming de la vidéo Haute définition, etc. dans les réseaux locaux sans fil (WLAN), les réseaux personnels sans fil (WPAN) et aussi pour les liens point à point.

Les premières réglementations de la bande 60 GHz, ont spécifié un minimum de 7 GHz de bande passante doit être adressée dans la bande [59-66] GHz sans licence aux applications court portées. La disponibilité mondiale de l'une largeur de bande de 7 GHz sans licence (ISM) a déclenché de nombreuses activités de recherche internationales.

Deux groupes de travail sur des normes internationales relatives aux réseaux

personnels sans fil (WPAN) à 6GHz ont été mise en place. En juillet 2003, l'IEEE a créé le groupe de travail 802.15.3 pour faire face à la communication radio 60 GHz et dans la même année, le groupe IEEE 802.15.3c a été créé pour définir les exigences techniques initiales pour les systèmes sans fil multiGigabit.

## 1.1 Objectifs de l'étude

En effet, le milieu minier est un environnement particulier avec ses parois rocheuses très chaotiques, sa nature de la roche variable, son architecture irrégulière et ses nombreux obstacles. Tous ses aspects ont une grande influence sur la propagation des ondes radio.

L'objectif consiste à établir une interface entre le milieu souterrain et la surface offrant ainsi un contrôle continu de l'activité de la mine comme le repérage positionnel des différentes machines, équipements et travailleurs présents sous la terre.

Les recherches de LRCS se matérialiseront par l'apparition de nouvelles applications dans le domaine minier tel que la prise de commande à longue distance des machines et la localisation des personnes à l'intérieur de la mine. L'extraction minière étant une activité à haut risque, la sécurité des travailleurs est primordiale. Avec ces nouvelles applications, il sera alors possible d'effectuer des travaux à distance dans les zones très dangereuses, mais aussi secourir les mineurs blessés ou pris au piège lors d'un incident comme les incendies ou les éboulements de roches. Ce sujet de recherche fait référence à l'axe de recherche concernant les " Radiofréquences : propagation et antennes intelligentes en ondes millimétriques ".

Le but de ce projet est de développer un système de mesure d'un signal 60 GHz qui nous permet d'étudier et de comprendre comment se comporte ce signal dans un milieu confinée souterrain. Afin de répondre à ce but, un système de mesures va être

développé, ce système sera préalablement conçu et simulé sous le logiciel ADS (Advanced Design System). Après des résultats concluants de la simulation, le système de mesure est ensuite développé pour permettre de mener à bien une campagne de mesures sous différents scénarios.

La figure 1.1, présente une photo d'un tunnel minier dans lequel de nombreux obstacles sont présents. La rugosité des murs, les fils électriques, le système de ventilation, les flaques d'eau par terre sont des obstacles qui perturbent le signal reçu en introduisant des trajets multiples et en produisant deux types de bruit : un bruit multiplicatif provoqué par la directivité de l'antenne, l'absorption, la réflexion, la dispersion, la diffraction, et un bruit additif dû au bruit thermique dans le récepteur.



Figure 1– *Photo d'une galerie minière.*

## **Chapitre 2**

# **Systemes de communications sans fil**

### **2.1 Introduction**

De nos jours, le sans-fil est de plus en plus utilisé dans les communications entre les utilisateurs. Plusieurs systèmes ont évolué ce qui a permis de changer le monde des télécommunications. On parle des réseaux locaux sans fil (WLANs), des réseaux personnels sans fil (WPANs), des réseaux métropolitains sans fil (WMANs) et des réseaux étendus sans fil (WWANs). Et comme toutes les nouvelles technologies, les réseaux sans fil font l'objet d'un nombre impressionnant de normes en évolution.

Nous allons essayer dans ce présent chapitre, d'exposer une généralité sur les différentes spécifications des standards de réseaux mobiles métropolitains tels que Wimax, MWBA, les standards des réseaux locaux sans fil comme le Wifi, les standards des réseaux personnels tels que Bluetooth, Zibgee et autres et enfin les standards réseaux étendus qui sont les fameuses technologies GSM, GPRS et UMTS.

### **2.2 Classification des technologies réseaux**

Les technologies réseaux sont classées en quatre catégories comme suite :

- les réseaux personnels (PAN) : concernent les réseaux sans fil d'une faible portée de quelques mètres [36].
- Les réseaux locaux (LAN) : concernent une zone plus étendue que les réseaux personnels (PAN) tels qu'une maison, une entreprise ou un campus, la portée est de quelques dizaines de mètres à quelques kilomètres [36].
- les réseaux métropolitains (MAN) : permettent de couvrir une région étendue comme une ville avec une portée de plusieurs kilomètres [36].
- les réseaux étendus (WAN) : permettent de couvrir une zone très vaste comme un pays, une région du globe ou même toute la planète [36].

Aucun réseau sans fil n'échappe à cette classification, cette dernière est illustrée dans la figure 2.1.

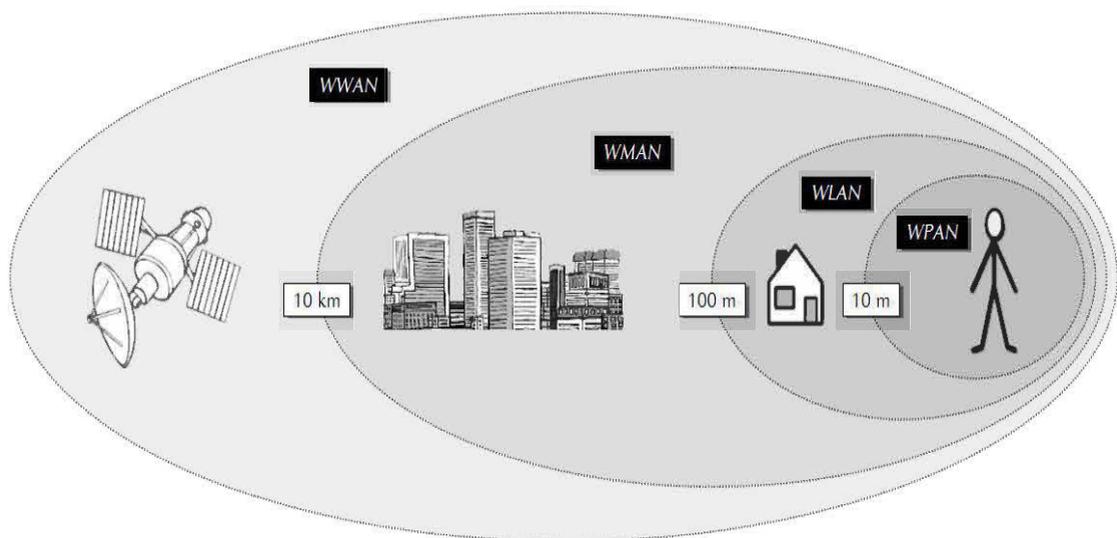


Figure 2– Différents types de réseaux sans fil et portées typiques.

## 2.3 Les Réseaux personnels sans Fil : WPAN

Le réseau personnel sans fil Ad-hoc connu sous le nom WPAN (Wireless Personal Area Network) vise la communication de données en rapport direct entre l'individu et son entourage immédiat, ne dépassant pas quelques mètres. Son objectif principal est d'établir une connexion sans une infrastructure dédiée. Ce type de réseau est généralement point à point et sert à relier des périphériques (imprimante, téléphone portable, appareils, télécommande ) et ne comptent en général que la communication non filaire entre deux machines très peu distantes,[28] [23] Voici un exemple d'une communication en WPAN :

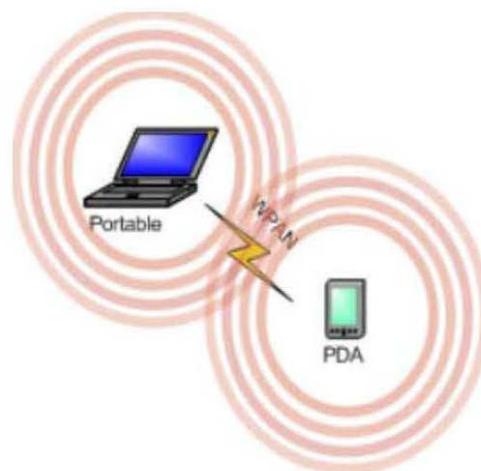


Figure 3– Exemple de WPAN.

### 2.3.1 Home RF

HomeRF (Home Radio Frequency), comme l'indique son nom " Home " est à l'origine pour tout usage domestique afin de partager la connexion à Internet entre plusieurs utilisateurs ou transporter des communications téléphoniques. Elle propose un débit théorique de 10 Mbits/s avec une portée d'environ 50 à 100 mètres sans amplificateur. Le standard Home RF a été imaginé par le " Home RF Working Group " (formé notamment par les constructeurs Compaq, HP, Intel, Siemens,

Motorola et Microsoft). Ces constructeurs, se sont trouvés face à la concurrence par Wi-Fi aux États-Unis, surtout au moment où il a perdu le soutien de deux sponsors de poids, Intel et Microsoft en 2003 [28] [19].

### 2.3.2 Les liaisons infrarouges

Elles sont destinées afin d'établir des communications sans fil point à point de quelques mètres avec des débits allant jusqu'à quelques mégabits par seconde. Ces communications (liaisons sans fil) doivent être obligatoirement en visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur. Cette technologie est très répandue dans la domotique (télécommandes) mais souffre des obstacles causés par les interférences lumineuses.

Afin de répondre aux exigences des communications infrarouges, l'association IRDA (Infrared data association) a défini une norme de communication qui propose d'utiliser et de développer les spécifications adoptées pour le médium infrarouge afin de créer des réseaux de courtes portées avec des débits allant jusqu'à 16 Mbits/s. Cette dernière spécifie plusieurs protocoles : IRPHY, IRLAP, IRLMP, IRCOMM, Tiny TP, IROBEX, IRLAN et IRFR, et c'est l'avantage par rapport à TCP/IP car avec tout son ensemble de protocoles, IRDA peut fonctionner sans aucun autre protocole additif [28] [19].

### 2.3.3 La technologie Bluetooth (IEEE 802.15.1)

C'est l'une des principales technologies des réseaux WPAN, elle est développée afin d'établir l'échange entre des périphériques qui sont les uns à côtés des autres. Cette technologie est supportée par les ondes radio dans la bande de fréquence de 2.4 GHz à

2.4835 GHz autant en Europe qu'aux États Unis. La portée de cette technologie dépend essentiellement de la classe utilisée. On caractérise trois classes.

La 1ère classe est conçue pour les terminaux Bluetooth à portée très élevée qui transmettent 20 dBm. La 2<sup>ème</sup> classe, qu'on trouve dans les terminaux Bluetooth, a

une portée de 10 m et qui émettent une puissance de 4 dBm et la 3<sup>ème</sup> classe est conçue pour les terminaux à faible puissance de 0 dBm.

La technologie Bluetooth a été développée en ayant comme but d'avoir une très faible consommation. Quant au débit il est de 1 Mbit/s pour la version 1.2 (adoptée en Novembre 2003) allant jusqu'à 3 Mbits/s pour la version 2.0 + EDR (Enhanced Data Rate) (adoptée en Novembre 2004) [36] [28].

### **2.3.4 La technologie Ultra Wide Band (IEEE802.15.3)**

Elle est utilisée pour la transmission de données numériques à très haut débit allant jusqu'à 1 Gbits/s, sur un large spectre de bandes de fréquences (on parle de principe d'étalement de spectre) en utilisant une très faible puissance sur une courte distance [19].

UWB est idéalement adapté pour les communications sans fil, particulièrement à courte portée et à grande vitesse de transmissions des données sans fil.

### **2.3.5 La technologie ZigBee (IEEE802.15.4)**

Elle est conçue par la "Zigbee alliance", c'est une technologie semblable à la technologie Bluetooth. La Zigbee cible des liaisons sans fil à faible coût avec une très faible consommation d'énergie, ce qui leur a permis de la rendre adaptée pour être directement intégrée dans les petits appareils électroniques (appareils électroménagers, wifi, capteurs). Elle permet d'établir la connexion entre des équipements à faible distance. La technologie ZigBee, opère sur la bande de fréquence entre 2.4 GHz et 2.4835 GHz, et offre un débit assez faible de 250 Kbits/s avec une portée maximale de plusieurs dizaines de mètres [28].

## **2.4 Les Réseaux Locaux Sans Fil : WLAN**

Le réseau local sans fil WLAN (Wireless Local Area Network) vise à couvrir une zone de quelques centaines de mètres maximum, comme un réseau local d'entreprise, une maison, ou un espace public. Tous les réseaux dits " locaux "

servent à partager des ressources communes ou aussi accéder à des réseaux d'un autre type comme Internet. De plus, avec l'apparition des " Voix sur IP " (VoIP), en utilisant les réseaux locaux, on pourra acheminer les communications téléphoniques jusqu'au poste compatible VoIP de l'abonné.

Plusieurs technologies sont conçues pour répondre aux besoins des réseaux locaux sans fil et permettant à tous les terminaux se trouvant dans la zone de couverture d'être reliés entre eux. Nous allons énoncer et expliquer les principales technologies WLAN avec leurs caractéristiques essentielles :

### **2.4.1 La technologie Wifi**

Wifi pour (Wireless Fidelity) (fondée sur les standards IEEE 802.11), supporté par les ondes radio dans la bande de fréquences autour de 2.4 GHz, avec des débits allant jusqu'à 11Mbps/s en 802.11b et 54 Mbps/s en 802.11g sur une distance de plusieurs dizaines de mètres à l'intérieur d'un local (généralement la portée est entre 20m et 50m) tandis que dans un espace ouvert, elle peut aller jusqu'à plusieurs centaines de mètres voire plusieurs dizaines de kilomètres si les conditions sont optimales. N'oublions pas qu'il existe d'autres normes dont l'IEEE 802.11a (baptisée WiFi5), qui supporte une bande de fréquences de 5 GHz avec un débit théorique de 54 Mbps/s jusqu'à 10 m de portée.

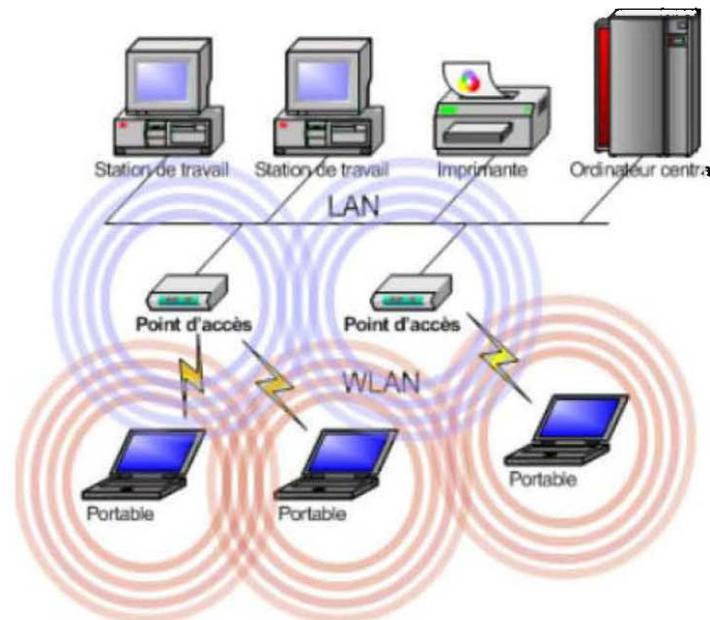


Figure 4– Exemple de WLAN.

### 2.4.2 Le standard 802.11n

On parle d'un standard de seconde génération avec un très haut débit. Le groupe de travail lancé mi-2004 ont fait des études pour la technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output) afin de multiplier par 4 ou plus par 8 le débit de 802.11g pour en amont de cette dernière permettant un débit jusqu'à des centaines de Mbits/s [28].

### 2.4.3 HiperLAN2

HiperLAN2 pour (High Performance Radio Local Area Network 2.0), est une norme européenne élaborée par l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute). HiperLAN travaille dans la bande de fréquences autour de 5 GHz en utilisant la technologie d'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) permettant d'avoir un débit théorique allant jusqu'à 54 Mbits/s couvrant plusieurs dizaines de mètres.

802.11a est concurrente de HiperLAN2 malgré que cette dernière offre de la performance par rapport aux autres car elle offre une certaine qualité de service et la gestion du "Roaming".

## 2.5 Les réseaux métropolitains : WMAN

Le réseau métropolitain sans fil WMAN (Wireless Metropolitan Area Networks) basé sur le standard IEEE 802.16, a pour finalité d'établir un ensemble de liens de communications sur une zone plus étendue que celle de WLAN tel que la taille d'une ville ou d'une région. Ces liens permettent d'interconnecter plusieurs sites d'une même entreprise ou d'une administration.

La norme la plus utilisée du réseau métropolitain sans fil est le WiMAX, ce dernier peut atteindre des débits de l'ordre de 70 Mbits/s sur une portée de plusieurs kilomètres [28].

Nous allons voir en détail les principales caractéristiques du WIMAX et aussi celles de la norme MBWA qui est en cours de traitement.

### 2.5.1 WIMAX

Wimax pour (World wide Interoperability for Microwave Access), représente un standard de réseau sans fil métropolitain créé par les sociétés Intel et Alvarion en 2002 et ratifié par l'IEEE sous le nom IEEE-802.16. Plus exactement, WiMAX est le label commercial délivré par le WiMAX Forum aux équipements conformes à la norme IEEE 802.16, afin de garantir un haut niveau d'interopérabilité entre ces différents équipements [19].

En résumé, Il existe deux familles des systèmes Wimax : fixe et mobile :

- WiMAX fixe, également appelé IEEE 802.16-2004, est prévu pour un usage fixe avec une antenne montée sur un toit, à la manière d'une antenne TV. Le WiMAX fixe opère dans les bandes de fréquence 2.5 GHz et 3.5 GHz, pour lesquelles une licence d'exploitation est nécessaire, ainsi que la bande libre des 5.8 GHz.
- WiMAX mobile (en anglais WiMAX portable), également baptisé IEEE 802.16e, prévoit la possibilité de connecter des clients mobiles au réseau internet.

Le WiMAX mobile ouvre ainsi la voie à la téléphonie mobile sur IP ou plus largement à des services mobiles haut débit [36].

L'architecture du WIMAX est illustrée dans la figure 2.4, le réseau WIMAX est composé de trois parties :

- La station Mobile
- Le réseau d'accès au service (ASN) : comporte des stations de base responsables de la gestion, du micro mobilité et la passerelle du réseau d'accès au service responsable de la gestion des ressources radio, le contrôle d'admission et la mise en cache du profil des abonnés.
- Le réseau de connectivité au service : Fournit la connectivité au fournisseur de service.

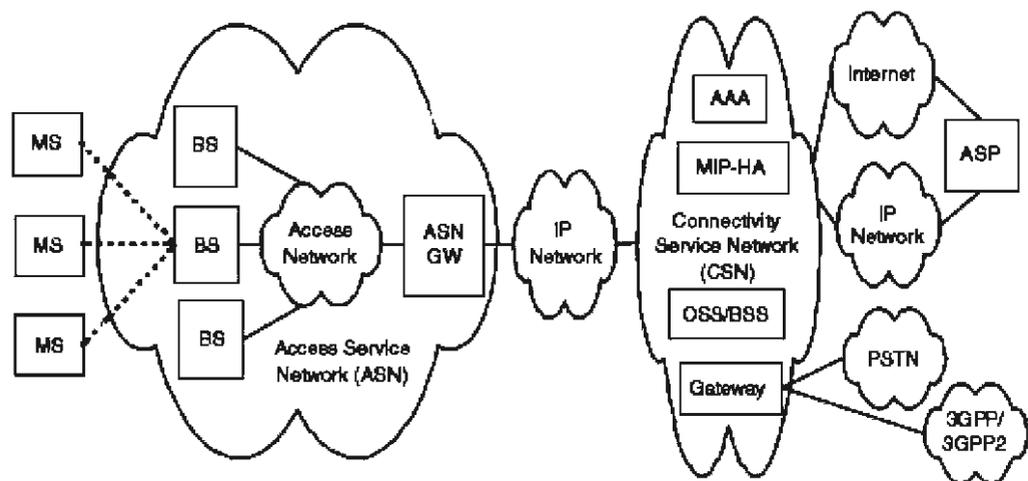


Figure 5– Architecture du réseau WIMAX.

L'objectif principal de cette technologie est d'établir une connexion sans fil entre une station de base et des milliers d'abonnés sans avoir une visibilité directe : on parle du LOS (Line of Sight) ou NLOS (Non Line of Sight).

### 2.5.2 MBWA

MBWA pour (Mobile Broadband Wireless Access) est un standard en cours de développement par IEEE 802.20. Il devrait permettre la mise en place de réseaux métropolitains mobiles avec des vitesses allant jusqu'à 250 km/h, son objectif principal est de permettre le déploiement mondial de réseaux sans fil haut débit, à un coût accessible et disponible partout, en connexion permanente, et interopérable entre les vendeurs pour les marchés des entreprises et des utilisateurs résidentiels.

Le MBWA utilise des bandes de fréquences avec licence en dessous des 3,5 GHz avec des débits maximums par utilisateurs de 1Mb/s en descente et 300 Kb/s en monter (contrairement aux autres technologies où l'ensemble de la bande passante est partagée) avec des cellules d'un rayon de 2,5 km maximum. Des versions utilisant un canal plus large de 5 MHz pourraient permettre des débits de 4 Mb/s en descente et 1,2 Mb/s en montée pour chaque utilisateur.

Le MBWA est bien adapté à la mobilité voix et données avec des terminaux centrés sur les données (par rapport aux réseaux mobiles de 3e génération qui sont adaptés à la mobilité voix et données avec des terminaux aujourd'hui centrés sur la voix). Le standard permet une faible latence pour les données, il devrait utiliser des technologies aujourd'hui bien maîtrisées (sauts de fréquences, OFDM, antennes adaptatives).

Le standard IEEE 802.20 qui sera utilisé par MBWA est encore à un stade très préliminaire. Il a été initié en mars 2002. L'ambition du projet IEEE 802.20 est de combler le fossé entre les réseaux sans fil haut débit à faible mobilité et les réseaux mobiles ayant un débit plus restreint. Cette norme promet quelques ambitieuses avancées dans le domaine des réseaux mobiles haut débit [19].

## 2.6 Les réseaux étendus Sans fil : WWAN

Le réseau étendu sans fil WWAN (Wireless Wide Area Network), est le réseau sans fil le plus répandu. Le WWAN repose sur le même principe de WLAN et WMAN mais sur des zones plus larges, il couvre quasiment le monde, et souvent

basé sur des technologies télécoms (GSM, GPRS, UMTS) [28] que nous allons détailler par la suite. Voici un exemple d'une liaison WWAN :

Il existe trois catégories des WWANS :

- Les WWANs publics : ils sont mis en place par des opérateurs afin d'offrir des services réseau à grand nombre de clients mobiles. Par exemple, les opérateurs offrent des accès à internet ou des services de messagerie accessibles par des téléphones mobiles évolués.
- Les WWANs privés sur infrastructure publique : ils sont mis en place par des entreprises pour relier leurs téléphones mobiles à leurs systèmes d'information à travers une infrastructure publique télécoms. Par exemple les employés d'une entreprise accèdent l'intranet ou à la messagerie interne de l'entreprise à travers leur PDA connecté en GPRS sur internet.
- Les WWANs totalement privés : les terminaux d'une entreprise se connectent sur des grandes distances mobiles à un central à travers une infrastructure réseau radio privée. Par exemple, une compagnie de taxi connecte, par une liaison radio dédiée son groupe de véhicule à son système informatique [23].

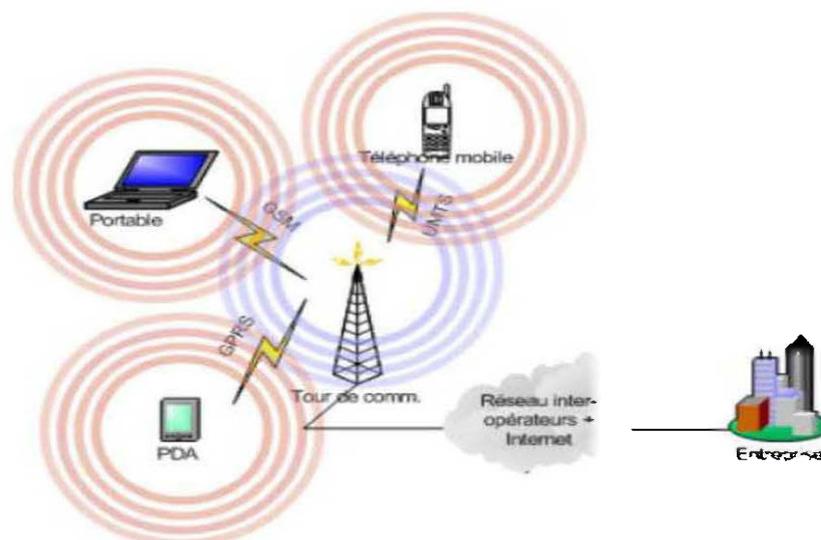


Figure 6– Architecture du réseau WWAN.

Les principales technologies utilisées dans les réseaux WWANs sont les suivantes :

### 2.6.1 GSM

GSM (Global System for Mobile Communication ou en français Groupe Spécial Mobile), est un standard de téléphonie de seconde génération de téléphonie mobile, la topologie du réseau GSM est illustrée dans la figure 6, le GSM a été établi en 1982 par la CEPT (Conférence des Administrations Européennes des Postes et Télécommunications). Le standard GSM utilise les bandes de fréquences 900 MHz et 1800 MHz en Europe, par contre aux États-Unis, la bande de fréquence utilisée est la bande 1900MHz. La norme GSM dispose d'un débit maximal allant jusqu'à 9,6 Kbits/s, ce qui permet de transmettre la voix et aussi des données numériques, mais de faible volume tel que SMS (Short Message Service). Dans le GSM la méthode d'accès utilisée est le multiplexage temporel TDMA (Time Division Multiple Access) qui consiste à diviser chaque canal de communication en trames de 8 intervalles de temps (dans le cas de GSM), ainsi avec le TDMA, il est par exemple possible de faire parler huit utilisateurs l'un après l'autre dans le même canal [28] [36].

L'architecture du réseau GSM est illustrée comme suite :

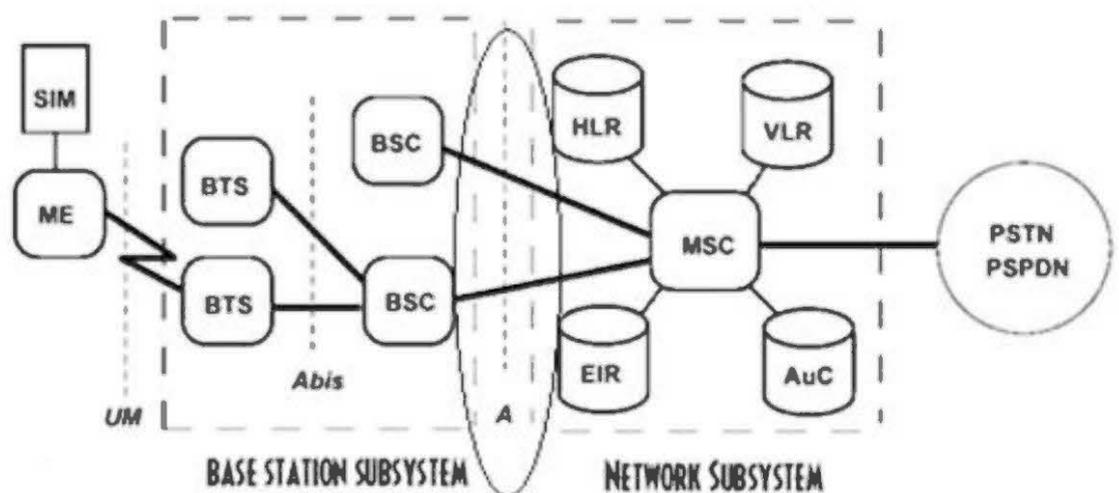


Figure 7– Architecture du réseau GSM.

L'architecture d'un réseau GSM peut être divisée en trois sous-systèmes :

1. Le sous-système radio contenant la station mobile, la station de base et son contrôleur.
2. Le sous-système réseau ou d'acheminement.
3. Le sous-système opérationnel ou d'exploitation et de maintenance.

Illustrons brièvement le fonctionnement des entités du réseau GSM en traitant un scénario simple, par exemple entre un réseau mobile et un réseau fixe, Quand l'abonné du GSM compose le numéro de téléphone d'un abonné du réseau fixe, sa demande arrive d'abord au BTS de la cellule puis passe à travers le BSC et arrive enfin au MSC qui vérifie les droits de l'abonné (autorisation d'accéder à ce service, état de l'abonnement,...). Si l'abonné remplit les conditions, le MSC transmet l'appel au réseau public et demande au BSC de réserver un canal pour la communication. Il ne reste alors plus qu'à attendre que le poste fixe soit décroché pour que la communication soit établie [36].

### 2.6.2 GPRS

GPRS (General Packet Radio Service), est une norme pour la téléphonie mobile dérivée du GSM, mais avec un débit de données plus élevé, le GPRS définit une architecture illustrée dans la figure 2.7. On la nomme souvent par le 2,5G afin de montrer que c'est une technologie à mi-chemin entre le GSM (2<sup>ème</sup> génération) et l'UMTS qu'on va voir par la suite. Le GPRS définit une architecture réseau à commutation de paquets avec gestion de la mobilité et accès par voie radio. Ainsi Le GPRS est très adapté à la transmission des données avec un débit maximal allant jusqu'à 170 Kbits/s et offre aux abonnés soient fixes ou mobiles l'accès à divers réseaux de données en utilisant le protocole IP (Internet Protocol) [28].

L'architecture du réseau GPRS est illustrée comme suite :

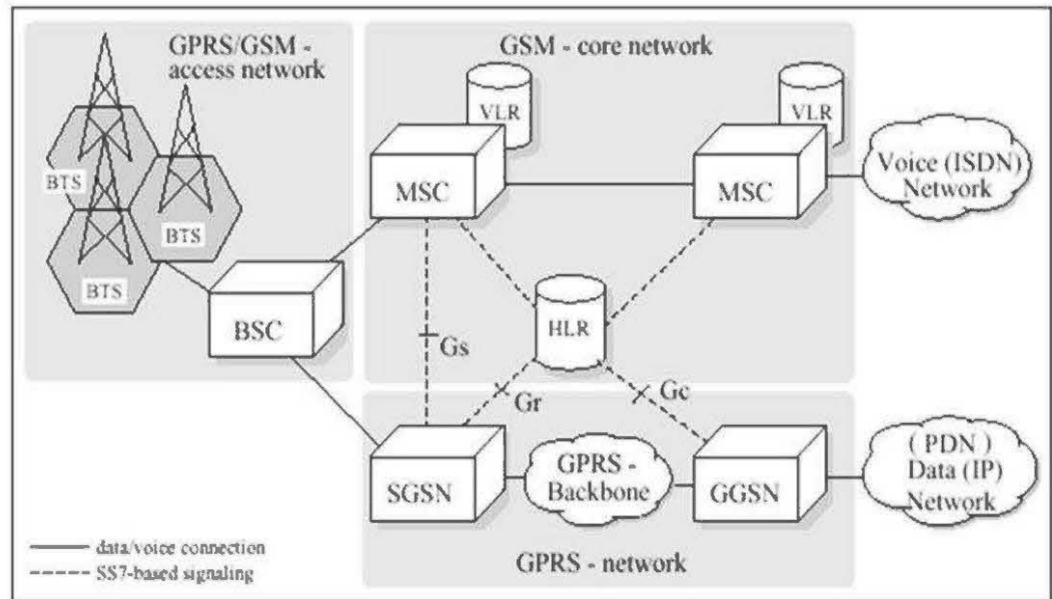


Figure 8– Architecture du réseau GPRS.

Comme on remarque sur l'architecture GPRS, il y a deux services ajoutés au réseau GSM qui effectuent la transmission des paquets de données qui sont SGSN (Serving GPRS Support Node) et GGSN (Gateway GPRS Node). Ainsi, le SGSN fournit un routage des paquets vers et depuis l'aire de service géographique SGSN et le GGSN rend l'interface vers les réseaux externes de paquets IP.

### 2.6.3 UMTS

UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) est une norme de téléphonie mobile de troisième génération (3G), sa topologie est illustrée dans la figure 2.8.

Contrairement au GSM, UMTS repose sur la méthode d'accès CDMA (Code Division Multiple Access) et permet d'offrir des vitesses de transmission nettement plus élevées que celles des réseaux de seconde génération et qui pourraient atteindre 2Mbits/s [28].

Les réseaux UMTS seront utilisés pour le transfert de données, pour le multimédia, pour la voix. L'introduction de l'UMTS est possible en gardant le même réseau et la même gestion globale (exploitation, mobilité, facturation) que le

GSM. Il faut néanmoins installer de nouvelles BS.

Le déploiement géographique se fera, comme suite :

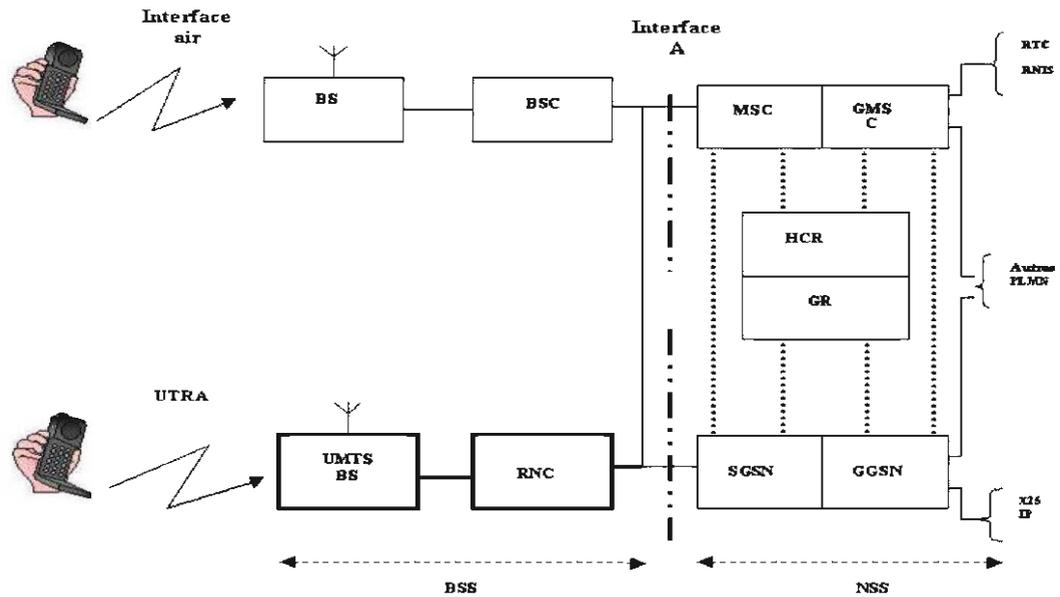


Figure 9– Architecture du réseau UMTS.

Avant de conclure cette introduction sur les technologies de communication utilisées dans les réseaux sans fil actuels, on va récapituler les différentes catégories des réseaux sans fil ainsi que les différentes technologies utilisées dans ces réseaux dans la figure suivante :

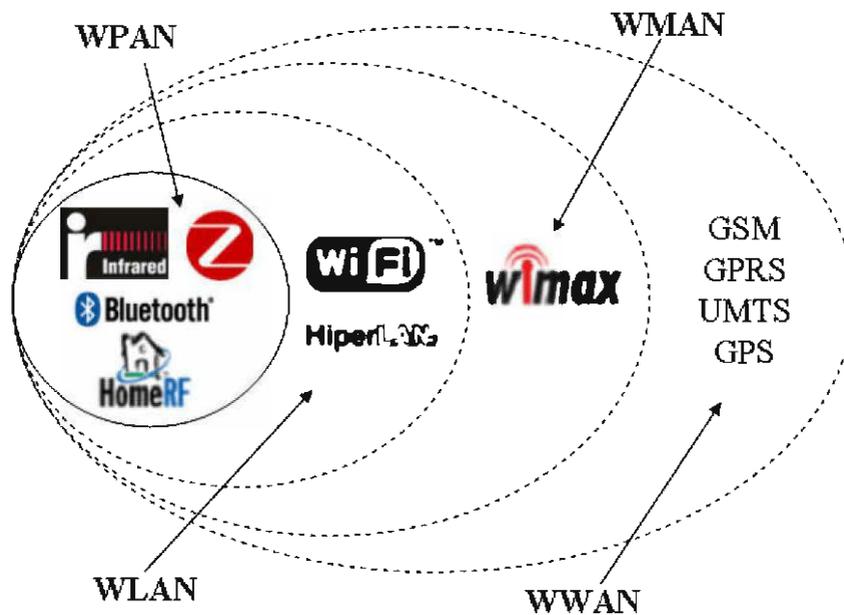


Figure 10– *Catégories des Réseaux sans Fil.*

## 2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé de donner une idée générale sur les différents systèmes de communication sans fil. Nous avons détaillé chaque système de communication en citant les différentes technologies utilisées, pour les réseaux personnels sans fil comme le Bluetooth, Infrarouge, HomeRF, Zigbee, ULB, les réseaux locaux sans fil comme le Wifi, HiperLan2, pour les réseaux métropolitains comme le WIMAX, MWBA et enfin pour les réseaux étendus sans fil comme le GSM, GPRS, UMTS. Ainsi, on propose dans le chapitre 3 une étude détaillée sur la fréquence 60 GHz.

# Chapitre 3

## Technologie 60 GHz

### 3.1 Introduction

Depuis la première démonstration transatlantique de la transmission d'ondes radio sans fil faite par Marconi en 1901 de l'Angleterre au Canada, les communications sans fil ont connu une croissance énorme.

Ils ont été d'abord utilisés principalement par les militaires et les compagnies maritimes. Plus tard, ils l'ont rapidement transformé en usage commercial tels que les services de radiodiffusion (AM, FM et télévision terrestre), la téléphonie cellulaire, le service de positionnement GPS et les réseaux sans fil locaux et personnels (WLAN et WPAN).

Aujourd'hui, ces systèmes de communications sans fil sont devenus une partie intégrante de la vie quotidienne et continuent à évoluer pour fournir une meilleure qualité d'expérience utilisateur. L'une des technologies les plus récentes sans fil est " les ondes millimétriques ". Il est important de noter que la technologie à ondes millimétriques est connue depuis plusieurs décennies, mais elle a été déployée pour des applications militaires.

Au cours de la dernière décennie, le processus de développement de technologies de communication avec un niveau élevé d'intégration et a très faible coût rendent la technologie à ondes millimétriques attrayante pour supporter différentes applications dans le domaine universitaires et industriels. En termes plus généraux, cette technologie est préoccupée par l'étude et l'exploitation de spectre électromagnétique entre 30 et 300 GHz, correspondant aux longueurs d'onde de 10

mm à 1 mm [34], illustré sur la Figure 3.1. Dans ce mémoire, nous allons mettre l'accent plus particulièrement sur la bande radio 60 GHz.

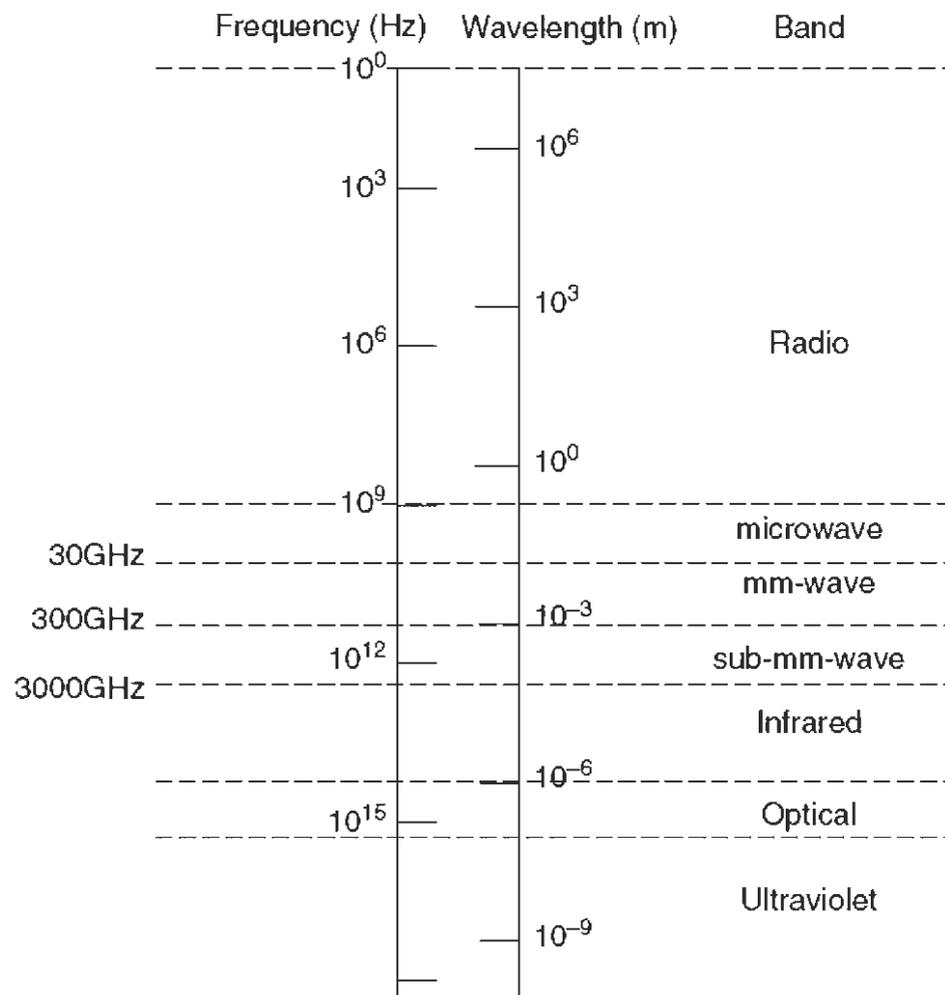


Figure 11-Distribution du spectre électromagnétique

## **3.2 Comparaison entre les technologies 60 GHz, ULB et IEEE 802.11n**

La technologie 60 GHz offre plusieurs avantages par rapport aux systèmes de communication actuels ou existants [38]. Une des principales raisons de l'intérêt récent pour la technologie 60 GHz est la bande passante énorme autorisée (ISM). Comme le montre la figure 3.2, au moins 5 GHz de bande passante en continu est disponible dans de nombreux pays dans le monde entier. Ce qui est comparable à la bande passante allouée sans licence pour les communications Ultra Large Bande (ULB) [26], toutefois la bande passante de 60 GHz est continue et moins limitée en termes de puissance.

Cela est dû au fait que ULB est un système défini avec la notion de recouvrement et donc soumis à différents règlements très stricts sur les puissances de transmission [24]. La bande passante à 60 GHz est l'une des plus grandes bandes passantes non autorisées. Cette énorme bande passante représente un grand potentiel en termes de capacité et de flexibilité, rendant la technologie 60 GHz particulière et attrayante pour des applications Gigabit sans fil.

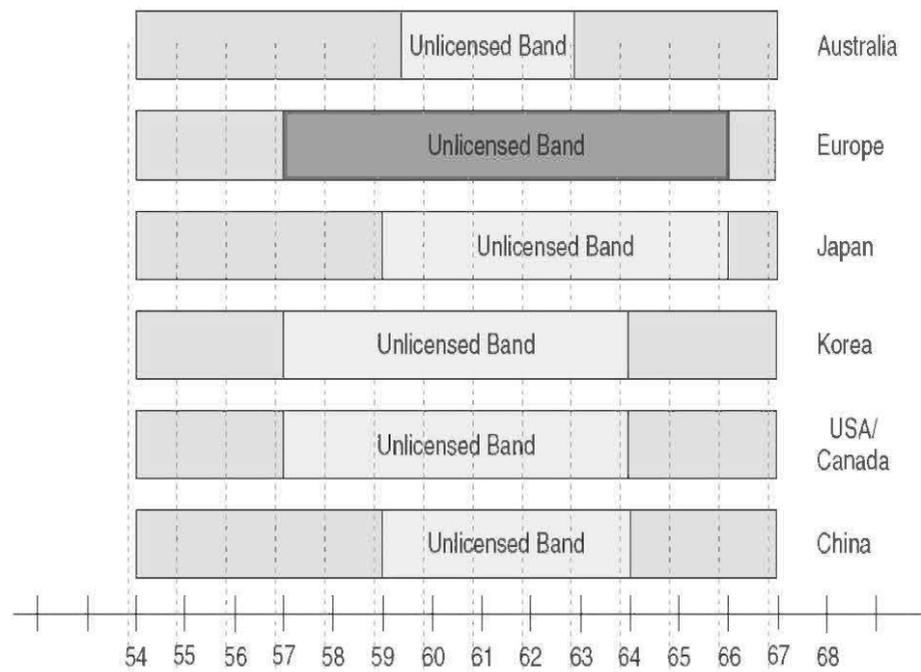


Figure 12– *Attribution de fréquences dans le monde pour la bande 60GHz et son fonctionnement.*

Technologies	Fréquence(GHz)	sortie de PA (dBm)	gain d'antennes (dBi)	sorties EIRP (dBm)
60 GHz	57-66	10	25	35
UWB	3.1-10.6	-11.5	1.5	-10
IEEE 802.11n	2.4-5	22	3	25

Tableau 1– Comparaison des propriétés des liens de 60 GHz, ULB et systèmes 802.11n

En outre, la régularisation de 60 GHz permet une puissance transmise-  
 puissance  
 isotrope rayonnée équivalente beaucoup plus élevée par rapport aux autres  
 systèmes existants WLAN et WPAN. Le tableau 3.1 montre des exemples typiques  
 de 60 GHz, ULB et de systèmes IEEE 802.11 qui fonctionnent à proximité de la

limite réglementaire du comité de communications fédérales (FCC).

La puissance de sortie d'un amplificateur de puissance de 60 GHz est généralement limitée à 10 dBm, car la mise en œuvre des amplificateurs de puissance efficace à cette fréquence est très difficile même si les règlements de la " FCC " permettent jusqu'à 27 dBm. Toutefois, une énorme antenne avec un gain qui monte jusqu'à 40 dBi peut considérablement dépasser les limites de la PIRE admissibles par le FCC. D'autre part, les systèmes ULB qui sont nécessaires pour répondre au masque strict de spectre de puissance de -41,3 dBm/MHz basé sur les règlements de la FCC, n'offrent que très peu de la PIRE de l'ordre de -10 dBm. Ce qui réserve les de communication ULB a des systèmes de très court portée et de faible puissance. En revanche, la conception d'amplificateur de puissance pour 2.4/5.0 GHz est plus simple et peut délivrer une puissance beaucoup plus élevée que le système de 60 GHz. Toutefois, la limite de la PIRE est généralement limitée à 30 dBm en raison de la foule industrielle, bande scientifique et médicale. Il peut être vu à partir du tableau 3.1 que la PIRE du système de 60 GHz est environ 10 fois plus grande que la norme IEEE 802.11n et 30 000 fois plus grande que le système ULB.

La puissance élevée de transmission est nécessaire pour compenser la perte du trajet à 60 GHz. Alors que cette perte élevée semble être un inconvénient à 60 GHz, elle limite le fonctionnement de 60 GHz à l'intérieur d'une chambre à un environnement intérieur. Par conséquent, les niveaux d'interférence efficaces pour 60 GHz sont moins sévères que celles des systèmes situés dans les régions encombrées 2-2.5 GHz et 5-5.8 GHz.

L'énorme bande passante disponible pour 60 GHz et les systèmes ULB simplifie également la conception du système de ces technologies. Un système avec efficacité spectrale beaucoup plus faible peut être conçu pour offrir une transmission Gbps afin de fournir une simple implémentation à faible coût. Le Tableau 3.2 montre le rendement spectral requis par les systèmes de transmission 60 GHz, ULB et IEEE 802.11 pour atteindre 1Gbps ainsi que l'efficacité spectrale du déploiement effectif de ces systèmes. Un système de type 60 GHz ne nécessite que 0,4 bps / Hz pour

atteindre 1 Gbps, ce qui en fait un candidat idéal pour soutenir les applications de données très haut débit utilisant la modulation simple. Bien que le système ULB ne nécessite que 2 bps / Hz pour atteindre 1 Gbps, son déploiement effectif est limité à 400 Mbps à la plage de fonctionnement de 1m. Le système IEEE 802.11n de même nécessitera 25 bps / Hz pour atteindre 1 Gbps, ce qui rend l'extension d'un tel système au-delà de 1Gbps peu attirante en termes de coût et des applications.

Technologies	Bande passante(MHz)	Efficacité à 1Gbps (bps/Hz)	Taux de données (Mbps)	l'efficacité requise (bps/Hz)
60 GHz	2000	0.5	4000	2
UWB	528	2	480	1
IEEE 802.11n	40	25	600	15

Tableau 2– Comparaison entre rendements spectraux des technologies 60 GHz, ULB et IEEE 802.11n

En plus, la perte énorme de trajet à 60 GHz permet la réutilisation de fréquence plus élevée dans chaque environnement intérieur, permettant ainsi un réseau très haut débit. La taille dense (compacte) de radio 60 GHz permet également des solutions avec des antennes multiples au terminal de l'utilisateur qui sont autrement difficile, voire impossibles à basse fréquence. Comparé aux systèmes de 5 GHz, le facteur de forme de systèmes 60 GHz est environ 140 fois plus petit et peut donc être facilement intégré dans des produits de consommation électroniques. Malgré les divers avantages offerts, les communications basées sur la technologie souffrent d'un certain nombre de problèmes cruciaux qui doivent être résolus. La Figure 3.3 montre les taux de données et des exigences de gamme pour un certain nombre de systèmes WLAN et WPAN. Depuis, il est nécessaire de distinguer entre les différentes normes pour une large exploitation du marché, les normes relatives à 60 GHz sont en mesure d'offrir des taux gigabit et des bandes de fonctionnements plus larges que les systèmes ULB, mais plus courtes que celle des systèmes IEEE 802.11n.

### 3.3 Applications éventuelles

Avec la bande passante allouée de 7 GHz dans la plupart des pays, la radio 60 GHz est devenue la technologie catalyseur pour de nombreuses applications de transmission de gigabits qui sont techniquement limités à plus basse fréquence. Un certain nombre d'applications intérieures sont envisagées, telles que :

- remplacement du câble ou la diffusion de vidéo non compressé à haute définition

(HD) qui permet aux utilisateurs d'afficher le contenu sans fil à un écran distant avec une qualité équivalente à celle de filaire.

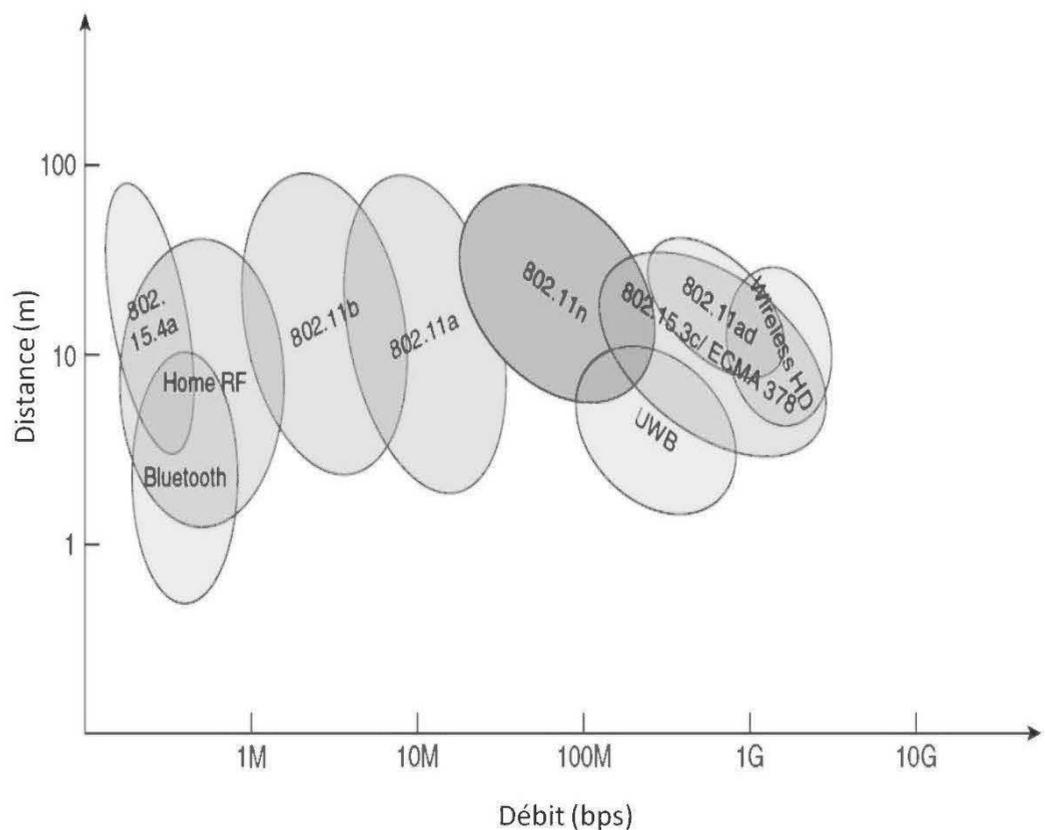


Figure 13– distance en fonction du taux d'information pour les normes WLAN et WPAN.

- "synch and go" de transfert de fichier qui permet de giga-octets de transfert de fichiers en quelques secondes
- stations d'accueil sans-fil qui permettent de connecter multiples périphériques (y compris un moniteur externe) sans avoir besoin des fréquents brancher et débrancher.
- Gigabit Ethernet sans fil bidirectionnelle qui permet un trafic de plusieurs gigabits.
- des jeux sans fil qui assurent des performances de haute qualité et à faible latence (Temps) pour une exceptionnelle expérience-utilisateur.

Dans la suite, nous allons décrire brièvement les exigences techniques pour une correcte exploitation de la diffusion vidéo décompressée.

Selon la résolution de balayage progressif et le nombre de pixels par ligne, le débit de données requis varie de plusieurs centaines de Mbps à quelques Gbps. La dernière résolution de la télé en haute définition (TVHD) commercialement disponible est de

1920 × 1080, avec un taux de rafraîchissement de 60 Hz. Considérant les formats vidéo RVB avec 8 bits par canal par pixel, le taux de données requis se révèle être d'environ 3 Gbps, ce qui est actuellement pris en charge par la spécification HDMI. Dans l'avenir, un plus grand nombre de bits par canal (10 et 12 bits par couleur) ainsi que la hausse des taux de rafraîchissement (90 Hz, 120 Hz) sont attendus pour améliorer la qualité de la prochaine génération de TVHD. Cela évolue facilement le débit de données bien au-delà de 5 Gbps. Le Tableau 3.3 résume les exigences de débit de données pour certaines spécifications TVHD actuelles et futures.

Par ailleurs, la diffusion vidéo décompressée de haute définition HD est une transmission asymétrique avec un débit de données significativement différent dans les deux directions de liaison montante et descendante. Cette application nécessite également une très faible latence de plusieurs dizaines de microsecondes et une très faible probabilité d'erreur sur les bits (jusqu'à 10-12) pour s'assurer

d'avoir une vidéo de haute qualité.

Règlementation dans le monde entier et attribution des fréquences cette section aborde l'état actuel des efforts de réglementation et de normalisation dans le monde pour la bande de 60 GHz. Les organismes de réglementation aux États-Unis, le Japon, le Canada et l'Australie ont déjà défini les bandes de fréquences et les règlements pour le fonctionnement 60 GHz, tandis que des efforts intenses en Corée et l'Europe sont actuellement en cours. Un résumé de l'attribution des fréquences émises et proposées et les spécifications principales pour la régulation de radio dans un certain nombre de pays sont donnés dans le Tableau 3.4. Il est important de noter que même si une puissance d'émission maximale de 27 dBm est autorisée aux États-Unis, la puissance d'émission actuelle peut être limitée par la capacité d'amplificateurs de puissance (AP), en particulier dans le cas des antennes simples. Typiquement, la production maximale de l'AP de 60 GHz est limitée à environ 10 dBm.

Pixel par ligne	Ligne active	Taux de trame par image	Nombre de bits par pixel pour chaque canal	Débit (Gbps)
1280	720	24	24	0.53
1280	720	30	24	0.66
1440	480	60	24	1
1280	720	50	24	1.11
1280	720	60	24	1.33
1920	1080	50	24	2.49
1920	1080	60	24	2.99
1920	1080	60	30	3.73
1920	1080	60	36	4.48

Tableau 3– Exigences de taux de données pour différentes résolutions, des taux de trame, et le nombre de bits par canal par pixel pour les standards TVHD.

### 3.3.1 Amérique du nord

En 2001, la FCC a attribué 7 GHz dans la bande 54-66 GHz pour une utilisation sans licence [18]. En terme de limites de puissance, les règles de la FCC permettront l'émission avec une densité de puissance moyenne de  $9 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  à 3 mètres et une densité de puissance maximale de  $18 \mu\text{W}/\text{cm}^3$  pour la même distance, à partir de la source rayonnante. Ces valeurs se traduisent respectivement en une PIRE moyenne et maximale de 40 dBm et 43 dBm. La FCC a également précisé le total maximum de la puissance transmis à 500mW pour une bande passante d'émission supérieure à 100 MHz.

Après la prise des enjeux de sécurité RF en compte, la puissance d'émission maximale est limitée à 10 dBm. Par ailleurs, chaque émetteur doit transmettre son identification au moins une fois, dans un intervalle de 1 seconde de la transmission du signal. Il est important de noter que les règlements de 60 GHz appliqués, au Canada, par la direction de l'industrie canadienne de spectre et des télécommunications (IC-SMT) [11], sont harmonisés avec celles des États-Unis. (À voir ce paragraphe plus proprement).

Région	Bande passante sans licence (GHz)	Puissance émis (dBm)	EIRP (dBm)	Gain maximale d'antenne (dBi)
USA/Canada	7	27	43 (max)	33 (max) si la PT est de 10 dBm
Japon	7	10 (max)	58 (max)	47
Korè	7	10	27 (max)	17
Australie	3.5	10	51.7 (max)	41.8
Europe	9	13.01	27	30

Tableau 4– Plan de la bande de fréquences et les limites de puissance d'émission, PIRE, et le gain d'antenne pour les différents pays

### 3.3.2 Japon

En 2000, le ministère de la Gestion publique, des Affaires intérieures, des Postes et Télécommunications (MPHPT) du Japon a publié des règlements d'utilisation de radio 60 GHz, soit une utilisation sans licence dans la bande 59-66 GHz [10] et autorisée dans la bande de 54,25-59 GHz. L'émission maximum de puissance pour un usage sans licence est limitée à 10 dBm [8] avec un gain d'antenne maximale admissible de 47 dBi [7]. Contrairement à l'Amérique du Nord, la réglementation japonaise précise que la bande passante maximale de transmission ne doit pas dépasser 2,5 GHz. Il n'y a aucune spécification pour l'exposition aux rayonnements RF et des exigences d'identification de l'émetteur. Pour plus d'informations et de mises à jour de la réglementation au Japon, les lecteurs intéressés se reporteront à la référence [33].

### 3.3.3 Australie

Suite la publication des règlements au Japon et en Amérique du Nord, l'autorité de Communications et des médias (ACMA) en Australie a pris des démarches similaires pour régler la bande des 60 GHz en 2005 [13]. Toutefois, seulement 3,5 GHz de bande passante (59,4 à 62,9 GHz) est allouée pour une utilisation sans licence. Le maximum de la puissance de transmission et de la PIRE est respectivement limité à 10 dBm et 51,7 dBm. Les transmetteurs de communication de données qui opèrent dans cette bande de fréquences sont limités aux usages maritimes et terrestres. Pour plus d'informations, vous êtes invités à regarder la référence [25].

### 3.3.4 Corée

En juin 2005, le Groupe d'étude de fréquences d'ondes millimétriques (MFSG) a été formé sous les auspices de promotion de l'Association Radio-coréen

[17]. Le MFSG a recommandé un spectre 7 GHz non autorisé (57-64 GHz) sans limitation sur le type d'application à utiliser. Pour les applications intérieures, la puissance d'émission maximale est de 10 dBm, de même que celle au Japon et en Australie, tandis que le gain d'antenne maximale admissible est de 17 dBi. Pour les applications extérieures, la puissance transmise est limitée à -20 dBm et 10 dBm pour les bandes de fréquences 57-58 GHz et 58-64 GHz, respectivement, tandis que le gain d'antenne maximal est de 47 dBi [12]. En outre, tout dispositif utilisant des fréquences dans la bande 57-64 GHz doit transmettre le code d'identification du transmetteur en soi, pour permettre à d'autres dispositifs de se détecter et se protéger totalement contre les dysfonctionnements de se produire, à l'exception des systèmes fixes point à point du système. Pour plus d'informations en Corée, les lecteurs intéressés peuvent se reporter à [3].

### 3.3.5 Europe

L'Institut européen des normes de télécommunications (ETSI) et la Conférence européenne des administrations des postes et télécommunications (CEPT) ont travaillé en collaboration pour établir un cadre juridique pour le déploiement des périphériques non autorisés de 60 GHz. En général, la bande 59-66 GHz a été allouée pour les services mobiles sans décisions spécifiques ayant été faite quant à la réglementation. La recommandation CEPT T / R22-03 a provisoirement attribué (et plus tard s'est retirée) la bande de 54,25 à 66 GHz pour les systèmes terrestres et fixes mobiles [14].

En 2004, le Comité européen des radiocommunications (ERC) a examiné l'utilisation de la bande 57-59 GHz pour les services fixes sans nécessiter la planification des fréquences [4]. Plus tard, le Comité des communications électroniques (ECC) de la CEPT a recommandé l'utilisation du point-à-point fixe dans la bande 64-66 GHz [15]. Plus tard, l'ETSI a proposé des règlements 60 GHz qui devront être examinés par l'ECC pour les applications WPAN [16]. Selon cette proposition, 9 GHz du spectre sans licence est alloué pour le fonctionnement 60 GHz. Cette bande représente l'union des bandes actuellement approuvées et

proposées parmi les grands pays. En outre, un spectre de 500 MHz au minimum est requis pour le signal transmis avec une PIRE maximal de 57 dBm. Aucune spécification n'est donnée pour la puissance d'émission maximale et le gain maximal d'antenne. En octobre 2009, la CEPT a recommandé une PIRE maximale de 25 dBm avec un maximum de densité spectrale de puissance de -2 dBm / MHz pour les applications extérieures, même si une installation fixe en extérieur n'est pas autorisée. Pour les applications intérieures, une PIRE maximal de 40 dBm avec une densité spectrale de puissance maximale de 13 dBm / MHz est précisé [9]. On ne sait pas quand la version finale du règlement sera mise en place, mais la tendance actuelle semble favoriser le déploiement de la technologie 60 GHz. Pour plus d'informations et de mises à jour de la réglementation en Europe, les lecteurs intéressés se reporteront aux [5].

### **3.4 Effort de standardisation (normalisation) de l'industrie**

La première norme apparue dans l'industrie internationale qui couvre la bande de 60GHz est la norme IEEE 802.16 pour les réseaux locaux et métropolitains [29]. Toutefois, il s'agit d'une bande autorisée, celle-ci est utilisé pour la visibilité directe (LOS) de communication extérieure pour la connectivité à grande distance (last mile). Au Japon, deux normes relatives à la bande de 60 GHz ont été émises par l'Association radio des industries et des affaires (ARIB) : la T69 ARIB STD [21] et ARIB STD-T74 [22]. La première est la norme pour les ondes millimétriques pour les équipements de transmission vidéo spécifiée aux stations radio de faible puissance (systèmes point à point), tandis que la seconde est la norme pour les ondes millimétriques à ultra haute vitesse pour des réseaux locaux sans fil spécifiée aux stations radio à faible puissance (point à-multipoints). Les deux normes couvrent la bande 59 66 GHz définie au Japon.

L'intérêt pour la radio 60 GHz a continué de progresser avec la formation de plusieurs groupes internationaux de normes ondes millimétriques et des alliances de l'industrie. En Mars 2005, le groupe d'action IEEE 802.15.3c a été créé pour élaborer une onde millimétrique appuyée sur une autre couche physique (PHY) pour la norme IEEE 802.15.3 [20]. En août 2006, ECMA TC-48 (anciennement connu sous le nom TC32-TG20) a commencé un effort afin de normaliser le contrôle d'accès au support (MAC) et PHY pour haut débit, communications à courte distance utilisant la bande de fréquence sans licence de 60 GHz pour des applications de données en vrac (grosse quantité) et pour les applications de diffusion multimédia [6]. En Octobre 2006, la création du consortium WirelessHD a été annoncée avec des principales entreprises d'électronique pour offrir une spécification pour la diffusion audio / vidéo (A / V) non compressée de haute vitesse et haute qualité en utilisant la technologie 60 GHz [1].

Dans le dernier développement, le consortium Wireless Gigabit Alliance (WiGig) a été créé en mai 2009 pour établir une spécification unifiée pour la technologie sans fil 60 GHz en vue de créer un écosystème véritablement mondial de produits pour un grand nombre d'applications [37]. Dans cette section, nous décrivons brièvement un certain nombre des efforts de normalisation.

### **3.4.1 IEEE 802.15.3c**

Les modes alternatives PHY de norme IEEE 802.15.3c visent à soutenir un débit de données minimum de 2 Gbps sur quelques mètres avec des débits de données facultatives de plus de 3 Gbps. Celle-ci est la première norme qui traite des systèmes gigabits sans fil à courte distance. L'IEEE a ratifié la norme 802.15.3c en septembre 2009 [20]. Trois modes PHY sont définis dans la spécification notamment le PHY d'une seule porteuse (SC) ; l'interface à haute vitesse (IHV), PHY du procédé de codage de signaux numériques par répartition en fréquences orthogonales sous forme de multiples sous-porteuses (OFDM) et PHY OFDM audio-vidéo (AV). La nécessité pour trois modes PHY est due à des avantages inhérents à chaque mode dans le soutien des applications spécifiques. Le mode PHY

SC est destiné à soutenir des appareils mobiles à faible coût et faible consommation d'énergie ; le mode PHY IHV est utilisé pour faible latence, donc une transmission bidirectionnelle de données à haute vitesse, tandis que le mode PHY AV est optimisé pour des applications spécifiques AV. Les principales caractéristiques des modes PHY de norme IEEE 802.15.3c sont résumées dans le tableau 3.5. Afin de favoriser la coexistence entre les modes PHY, la signalisation en mode commun (CMS) est définie, par une porteuse de décalage binaire de phase (BPSK)  $\pi/2$  avec un faible débit (25 Mbps). CMS est utilisé dans les dispositifs de coordinateur de Piconet capables d'envoyer / recevoir une trame CMS synchronisée afin d'éviter les interférences entre deux ou plusieurs Piconets exploités. La technique Beamforming est soutenue par tous les trois modes PHY pour des antennes de type hétérogène. Cette technique utilise un mécanisme à deux niveaux pour trouver les faisceaux optimaux de transmission et de réception qui permettent la transmission des données avec un débit très haut. En outre, 15.3c prévoit un soutien inégal de protection d'erreur (UEP) pour la transmission vidéo non compressée. L'UEP peut être réalisé dans les deux couches PHY et MAC. UEP au PHY protège le bit le plus significatif (MSB), bit de poids fort et le bit le moins significatif (LSB) dans des sous-frames inégalement en appliquant des codes différents et/ou de cartographie de la constellation (constellation mapping). D'autre part, l'UEP au MAC protège une trame agrégée qui se compose de sous-frames MSB, sous-frames LSB, ou les deux MSB et LSB, en utilisant soit des systèmes de corrections d'erreurs avancées ou des différentes modulations et systèmes de codage.

Caractéristique	SC-FDE	HSI OFDM	AV OFDM
Constellation	BPSK, (G)MSK, QPSK, 8PSK,	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM
Débit	25.3 Mbps-5.1 Gbps	31.5 Mbps-5.67 Gbps	0.95-3.8 Gbps
Codage	Reed Solomon, LDPC	LDPC	Codage Reed Solomon et Codage Convolutif
support UEP	OUI	OUI	OUI
Séquence d'ap- prentissage	Code Golay	Code GOLAY	M-Sequence Barker-13 chip
Beamforming	OUI	OUI	OUI
largeur de bande occupée	1.782 GHz	1.782 GHz	1.76 GHz (HRP) 92 MHz (LRP)

Tableau 5– Récapitulatif des modes de PHY dans la norme IEEE 802.15.3c

### 3.5 Conclusion

L'utilisation des réseaux sans fil futurs doit être plus souple pour l'utilisateur, auto-configurable, et l'interfaçage doit être transparent avec les autres types de réseaux (câblés ou non). La phase la plus essentielle pour le dimensionnement des systèmes de communications est l'étude du canal de propagation. Un état de l'art sur la connaissance du canal à 60 GHz a été présenté dans ce chapitre qui aborde cette bande dans différents pays, et la compare avec d'autres systèmes déjà existants.

Les ondes millimétriques sont caractérisées par sa disponibilité de largeur de bandes (nécessaire pour une montée en débit), sa forte atténuation qui est intéressante pour la réduction des interférences, et par sa courte portée qui nous permet plus de sécurité. Ces caractéristiques permettent à la bande de fréquence 60 GHz d'être un candidat intéressant pour accompagner la demande de montée en débit et répondre au problème de l'occupation spectrale qui affecte les bandes de fréquences en dessous de 2 GHz.

# Chapitre 4

## Propagation d'un signal RF

### 4.1 Introduction

L'environnement dans lequel se propage l'onde ainsi que la fréquence utilisée joue un rôle crucial. L'objectif de ce chapitre est de décrire et expliquer certaines notions de propagation d'un signal électromagnétique nécessaire à la compréhension du travail réalisé dans ce mémoire. On définit tout d'abord le modèle de propagation en espace libre, ensuite les phénomènes qui provoquent les trajets multiples tels que la réflexion, diffusion, diffraction et guidages d'ondes, ensuite les différents types d'évanouissement incluant l'évanouissement à petite et à grande échelle.

### 4.2 Modèle de la propagation

#### 4.2.1 Propagation en espace libre

Nous allons commencer par définir un canal de propagation avant d'expliquer la notion d'espace libre. Par exemple dans une transmission hertzienne, le signal  $e(t)$  envoyé par l'antenne émission se propage à travers le milieu de transmission par le biais des ondes électromagnétiques et reçues par la suite par l'antenne de réception. Et pendant la transmission le signal  $e(t)$  se transforme en un signal  $s(t)$  à cause des perturbations et modifications provoquées par le milieu de transmission

qui agit sur les ondes. Ainsi l'espace où se passe cette transformation se nomme le "canal de propagation", comme le montre le schéma suivant :

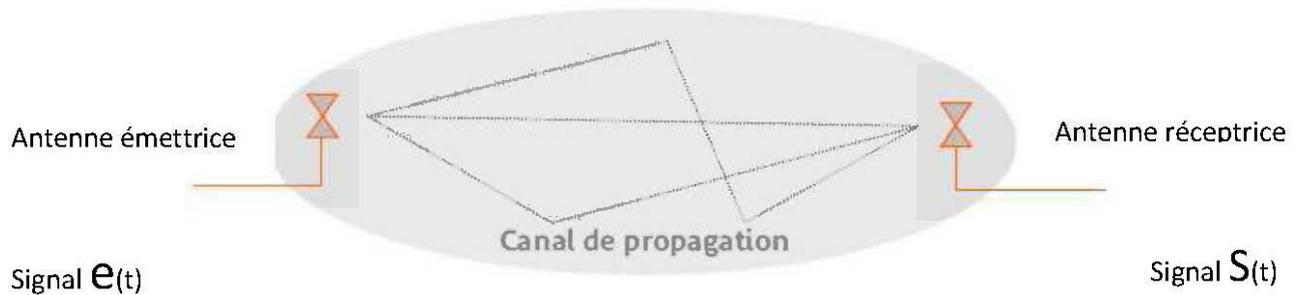


Figure 14– *Représentation d'un canal de propagation.*

Il nous arrive de mélanger entre "canal de propagation" et "canal de transmission", ce dernier comprend des antennes de plus par rapport au canal de propagation.

On parle de modèle de propagation, qui signifie la visualisation de l'évolution de la puissance d'une transmission entre un émetteur et un récepteur en fonction de la distance entre ces deux entités dans un environnement particulier.

Afin de qualifier le milieu comme un espace libre, il faut que l'espace entre les deux antennes soit " libre ", c'est-à-dire qu'aucun objet ou corps étranger ne perturbe l'émission directe d'un signal entre deux antennes [31], [27].

Pour déterminer la zone entre les deux antennes qui doit être " dégagée " pour pouvoir employer la notion " Espace libre ", se réfère à ce que l'on appelle la première zone de Fresnel, comme on le voit dans la figure 4.2 :

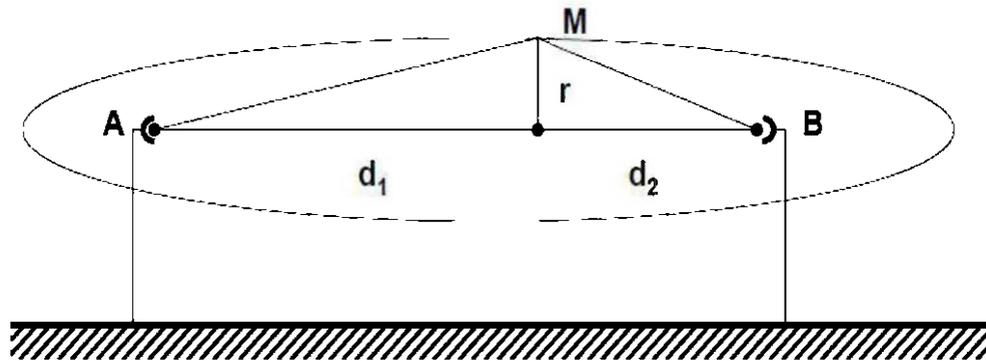


Figure 15– Ellipsoïde de Fresnel.

Sur la figure 4.2, on dispose de deux antennes A et B qui sont séparés par une distance  $d_1 + d_2$ . Ensuite, on va voir les formules mathématiques permettant de déterminer le rayon  $r$  du premier ellipsoïde de Fresnel. Les notations qui sont utilisées sont issues des paramètres de la figure 4.2.

$$MA + MB = AB + \frac{\lambda}{2} \quad \longleftrightarrow \quad \Delta_d = \frac{\lambda}{2} \text{ et } \Delta_\phi = \pi$$

$$\sqrt{d_1^2 + r^2} + \sqrt{d_2^2 + r^2} = d_1 + d_2 + \frac{\lambda}{2} \quad \Longrightarrow \quad r = \sqrt{\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (4.1)$$

On considère que l'espace est " libre ", dans le cas où on ne trouve aucun corps étranger dans cette zone avec un rayon  $r$  et ainsi on se contente sur l'utilisation de son modèle de propagation. Grâce à ce dernier, on pourrait facilement calculer la puissance de réception en appliquant la formule de FRIIS, qui est également appelée équation des télécommunications :

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{16\pi^2 d^2} \quad (4.2)$$

$P_r$  correspond à la puissance obtenue au niveau de l'antenne réceptrice en fonction de la distance ( $d$ ) entre les deux antennes.  $P_t$  Représente la puissance transmise.

$G_t$  représente le gain de l'antenne émettrice et  $G_r$  celui de l'antenne réceptrice. Ils sont déterminés par la formule suivante :

$$G = \frac{4\pi}{\varepsilon^2} \quad (4.3)$$

Où  $\varepsilon$  représente la surface à l'intérieur par laquelle l'antenne réceptrice est capable d'écouter l'onde émise.  $\lambda$  est la longueur d'onde du signal transmis. Néanmoins, la propagation en espace libre n'est qu'un cas théorique idéal. Par conséquent, les transmissions réalisées dans un cas pratique peuvent subir à de nombreuses perturbations par l'ensemble des éléments présents dans l'environnement réel. Et ainsi, le signal peut subir des modifications et des multiplications de trajectoires. Nous allons donc par la suite, présenter cette notion de trajets multiples.

#### 4.2.1 Trajets multiples

Le modèle de propagation en espace libre que nous avons déjà présenté ci-haut ne peut pas s'appliquer dans la réalité. En effet, lors de l'envoi d'un signal radio, ce dernier peut parcourir plusieurs trajets de propagation, dont le cas le plus important est le cas du trajet direct qui transmet le plus d'énergie. Selon l'environnement, l'influence portée sur l'onde ainsi que le nombre de trajets sont plus ou moins importants.

Si l'on prend l'exemple d'une mine, on constate que l'aspect physique des parois est très irrégulier. Cela accentue, comme on a pu le remarquer précédemment, les réflexions de l'onde et ainsi multiplie le nombre de trajets.

On distingue deux types de trajets : trajet direct ou Line of Sight (LOS) et trajet indirect ou Non Line of Sight (NLOS). Dans le cas de notre projet, on parle d'un milieu minier, ainsi par la suite la disposition des galeries les unes par rapport aux autres ne permettent pas toujours d'avoir des trajets LOS. C'est alors les trajets NLOS qui transmettent l'information et permettent d'établir des communications.

La figure 4.3, identifie les différents phénomènes qu'un signal radio peut subir. On parle de réflexion, diffraction, diffusion et guidage d'ondes qu'on détaillera par la suite [30], [32] :

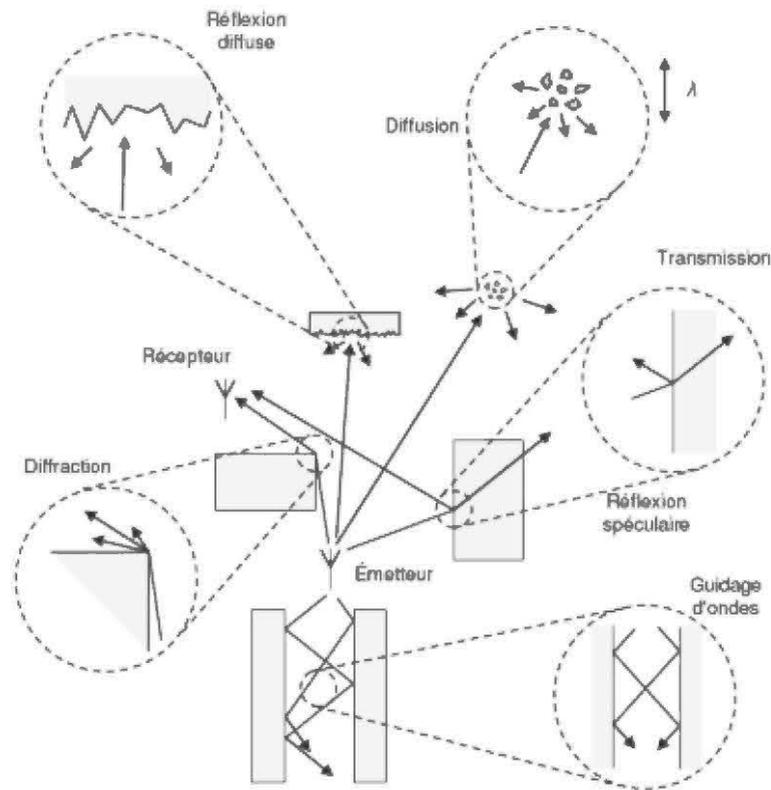


Figure 16– *Perturbations de propagation.*

#### ◆ Réflexion

On remarque sur la figure 4.3, que l'onde émise subit deux types de réflexion :

##### La réflexion spéculaire :

On remarque pour ce cas que l'onde incidente donne naissance à une seule onde réfléchie, et ainsi cette dernière conserve l'énergie total du signal. Cependant, dans la pratique une partie de l'énergie peut être soit absorbée ou diffusée au niveau de la surface de contact, ce phénomène est appelé

Transmission et ainsi on en déduit que la qualité de la réflexion dépend essentiellement de la qualité de la surface de contact. Alors on peut savoir si l'onde subit une réflexion est spéculaire, si la taille des défauts de la surface est inférieure de l'ordre de grandeur diffuse.

#### **La réflexion diffuse :**

Ce cas est appliqué quand la surface de contact est trop irrégulière, signifie que ses défauts ont une taille supérieure à l'ordre de grandeur de la longueur d'onde. Dans ce cas, l'onde incidente est réfléchié en plusieurs ondes qui se partagent la puissance initiale.

#### **♦ Diffraction**

Permet de contourner les obstacles. L'onde émise peut suivre le contour de l'obstacle pour ensuite reprendre son chemin, que ce dernier aurait subi des modifications au niveau de sa direction et une atténuation de puissance.

L'importance de ces modifications dépend de la nature et de la taille de l'obstacle.

#### **♦ Diffusion**

Comme on peut voir sur la figure 4.3, le signal émis rencontre des petits obstacles (ordre de grandeur de la longueur d'onde) ressemblant à des poussières que l'on peut trouver dans l'air. Ce type ressemble à la réflexion diffuse sauf qu'ici le nombre d'ondes réfléchies est plus important.

#### **♦ Guidage d'ondes**

On peut rencontrer ou observer ce phénomène peut être observé quand le milieu où se fait la propagation de l'onde dispose de surfaces lisses et parallèles. Le signal est successivement réfléchi tout en suivant le déroulement des parois. Nous venons de voir qu'il existe des effets de changements de trajectoire et de niveau de puissance qui s'applique sur l'onde émise lorsqu'elle rencontre des obstacles. On présentera maintenant un autre

phénomène que subit le signal aussi lors de sa propagation nommée évanouissement ou " fading " en anglais.

## 4.3 Évanouissements

Quand l'onde se déplace dans l'air, elle peut rencontrer toute sorte d'obstacles tout au long de son parcours de propagation qui permet de provoquer ainsi des perturbations du signal. Lors de l'observation, de ce dernier, on remarque des interruptions de propagation de l'onde. On parle d'effet d'évanouissement. On distingue deux types d'évanouissement : l'évanouissement à petite échelle et l'évanouissement à grande échelle.

La figure 4.4, représente la puissance reçue en fonction de la distance. Les courbes bleues, rouge et noir représentent respectivement l'atténuation moyenne du signal, aussi appelée " PathLoss ", les évanouissements à grande échelle liés connus aussi sous le nom " d'effet de masque " ou " Shadowing ", et les évanouissements à petite échelle.

### 4.3.1 Évanouissement à grande échelle

On définit les évanouissements à grande échelle par les fluctuations de la puissance du signal mesuré lors d'un déplacement à grande distance (plusieurs fois la longueur d'onde) [35]. Ces variations de puissance dépendent de la distance entre les deux antennes ainsi que leur position l'une par rapport à l'autre dans l'environnement. Par exemple, pour des antennes directives, si elles ne sont pas alignées on peut observer de l'évanouissement. De même si les antennes sont en position LOS ou NLOS.

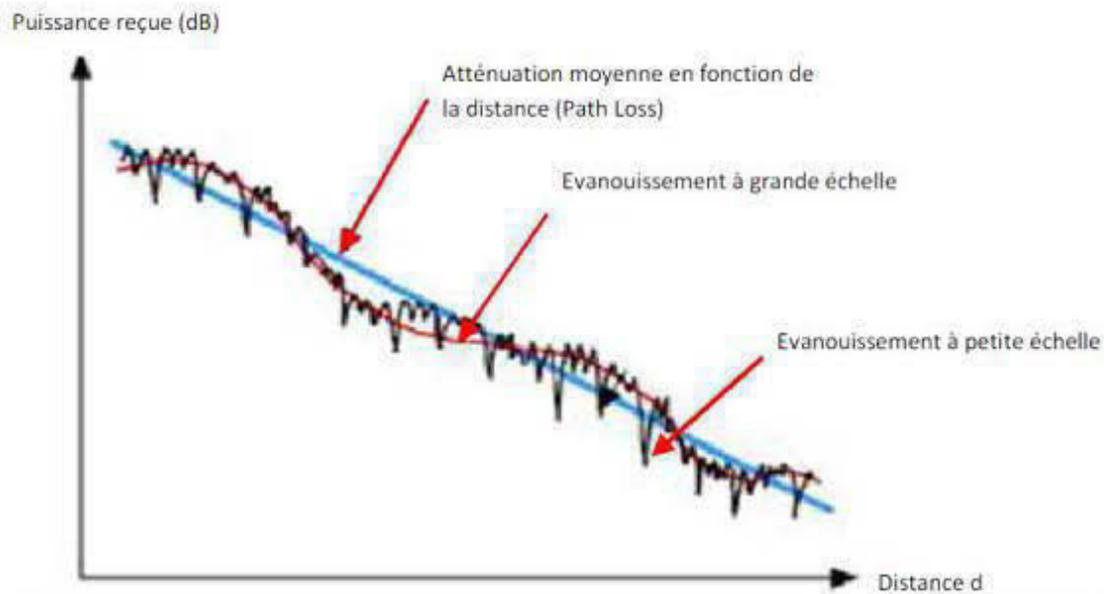


Figure 17- *Graphe du « Path Loss ».*

### 4.3.2 Évanouissement à petite échelle

Ce phénomène apparaît quand le récepteur se déplace par rapport à l'émetteur sur des distances très petites, ainsi l'intensité instantanée du signal peut varier rapidement provoquant cet effet d'évanouissement.

Cela est dû au fait que le signal reçu est la somme de nombreux signaux venant des différents chemins que peut emprunter les ondes radios. Ces chemins, de longueurs variables, sont dus aux réflexions causées par les objets présents dans l'environnement.

L'étude de ce phénomène d'évanouissement sur un ensemble de mesures réalisées nécessite l'utilisation des " distributions " qui consistent à déterminer la loi statistique de l'enveloppe du signal reçu.

Les deux distributions les plus utilisées sont la distribution de Rayleigh lorsque les antennes émettrice et réceptrice ne sont pas en visibilité directe (NLOS), et la distribution de " Rice " dans le cas où les antennes sont en visibilité directe (LOS).

## **4.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, on a introduit et détaillé les phénomènes de la propagation d'un signal RF tout en se focalisant sur les différents problèmes qu'un signal peut rencontrer lors de sa propagation telle que la réflexion, diffusion. Puis nous avons énoncé les différents types d'évanouissement existant tel que les évanouissements à petite échelle et à grande échelle.

# Chapitre 5

## Systeme de mesure proposé et Mesures expérimentales

### 5.1 Introduction

Dans ce présent chapitre, nous avons présentons l'approche adopté pour permettre de caractérisé la propagation d'un signal 60 GHz et faire une analyse dans un milieu confiné. Notre approche est basée sur la réalisation d'un chaine de transmission, permettant de transposer une bande de fréquence 1 à 2 GHz issue d'un générateur vers la bande fréquence 59 à 61 GHz. Pour ce faire nous avons, d'abord modélisé cette chaine de transmission sous le logiciel ADS (Advanced Design System), puis nous avons réalisé ce système de mesures.

enfin on a effectué des mesures dans le Laboratoire LRTCS et dans la mine CANMET en visibilité directe pour but de voir l'effet de la distance sur la puissance, et en visibilité obstruée en utilisant un obstacle humain pour voir l'effet de ce dernier sur la fréquence 60 GHz .

Nous avons conclu notre chapitre par une comparaison des mesures prises dans les deux environnements.

## 5.2 Conception du système de mesures

### 5.2.1 Bloc Émetteur

Le synoptique de l'émetteur présenté dans la figure 5.1 est constitué d'un mélangeur, d'un filtre passe-bande et d'un amplificateur de puissance.

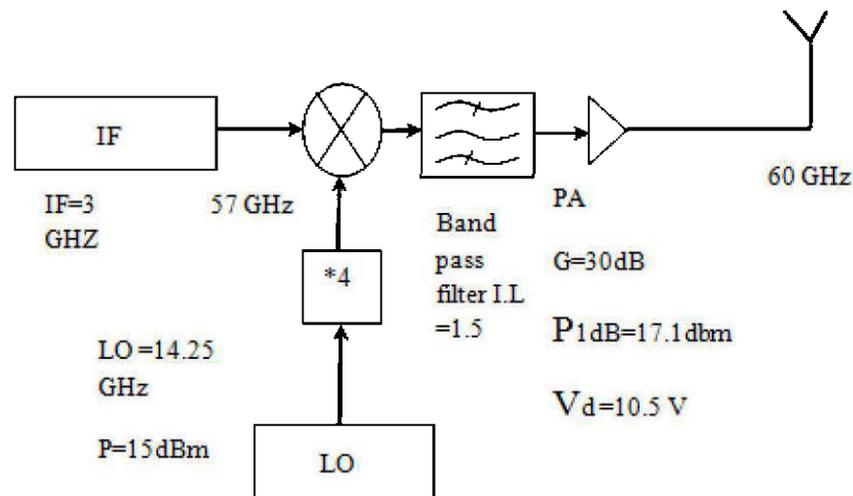


Figure 18– Schéma synoptique de l'émetteur.

La fréquence LO (14.25) du mélangeur est générée par un générateur de signal (ANRITSU MG3692B) relié avec le multiplicateur par un câble coaxiale de 6 mètres de longueur et de perte de 3.5 dB/m, et la fréquence IF (3 GHz) est générée par un générateur de signaux vectoriels (ANRITSU MG3700A) avec une puissance de -10 dbm et qui est connecté au mélangeur par un autre câble coaxiale de 2 mètres de longueur.

Le signal LO est multiplié par un multiplicateur par 4 avant d'être mélangé avec la fréquence IF qui nous donne une fréquence RF de 60 GHz. Comme après avoir mélangé les deux signaux, plusieurs signaux indésirables apparaissent c'est pour cette raison qu'on a ajouté un filtre passe-bande avec une perte d'insertion de 1.5 dB.

Afin d'envoyer le signal RF à travers une antenne directive ( $G=20$  dBi), on doit augmenter la puissance de ce signal avec un amplificateur de puissance de gain 30 dB et de point de compression 1 dB à la fréquence 60 GHz égale à 17.1 dBm.

### 5.2.2 Bloc Récepteur

Après l'émission du signal, une autre antenne directive est nécessaire pour capter l'information avec le même gain de celle en émission (figure 5.2). On a utilisé alors, un amplificateur à faible bruit afin d'éliminer le rapport signal sur bruit, et pour récupérer notre signal IF on a ajouté un mélangeur qui est relié par un câble de 6 mètres à la même source de la fréquence LO utilisée dans l'émission grâce à l'utilisation d'un diviseur de puissance de perte -3 dB.

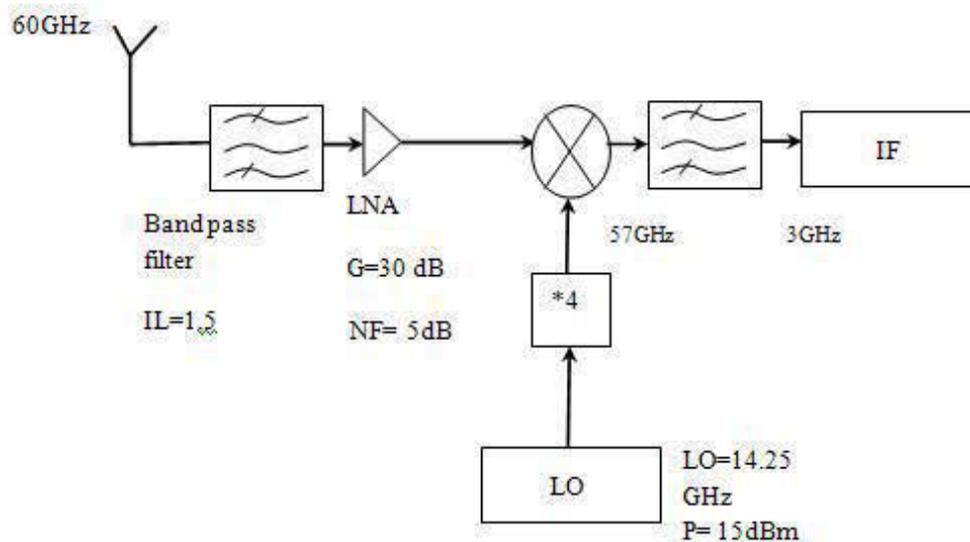


Figure 19– Schéma synoptique du récepteur.

Afin d'éliminer les fréquences indésirables reçues avec le signal IF à la sortie du mélangeur, on a utilisé un filtre passe-bande de fréquence centrale 3 GHz et de perte d'insertion 1,5 dB et ce filtre va être connecté à un analyseur de spectre (ANRITSU MS2687B) de fréquence centrale 3 GHz et de Span 10 MHz.

## 5.3 Simulation sous ADS

Le logiciel de simulation appelé ADS (Advanced Design System) a été choisi pour effectuer une conception théorique avant l'implémentation, et étudier la puissance à chaque point d'une liaison.

Le but de cette partie est d'étudier la faisabilité d'une liaison à 60 GHz. On va prendre alors une étude de cas dans lequel un récepteur/transmetteur est créé à la base des composants déjà conçus récemment dans la bande millimétrique. Les performances des différents composants utilisés sont décrites à la fin de ce rapport (annexe1).

La figure 5.3 montre une capture, extraite d'ADS. Ici nous nous intéressons seulement à la puissance reçue après démodulation, c'est à dire après que le signal soit de nouveau en fréquence intermédiaire. Notons que le canal utilisé est un canal en visibilité directe.

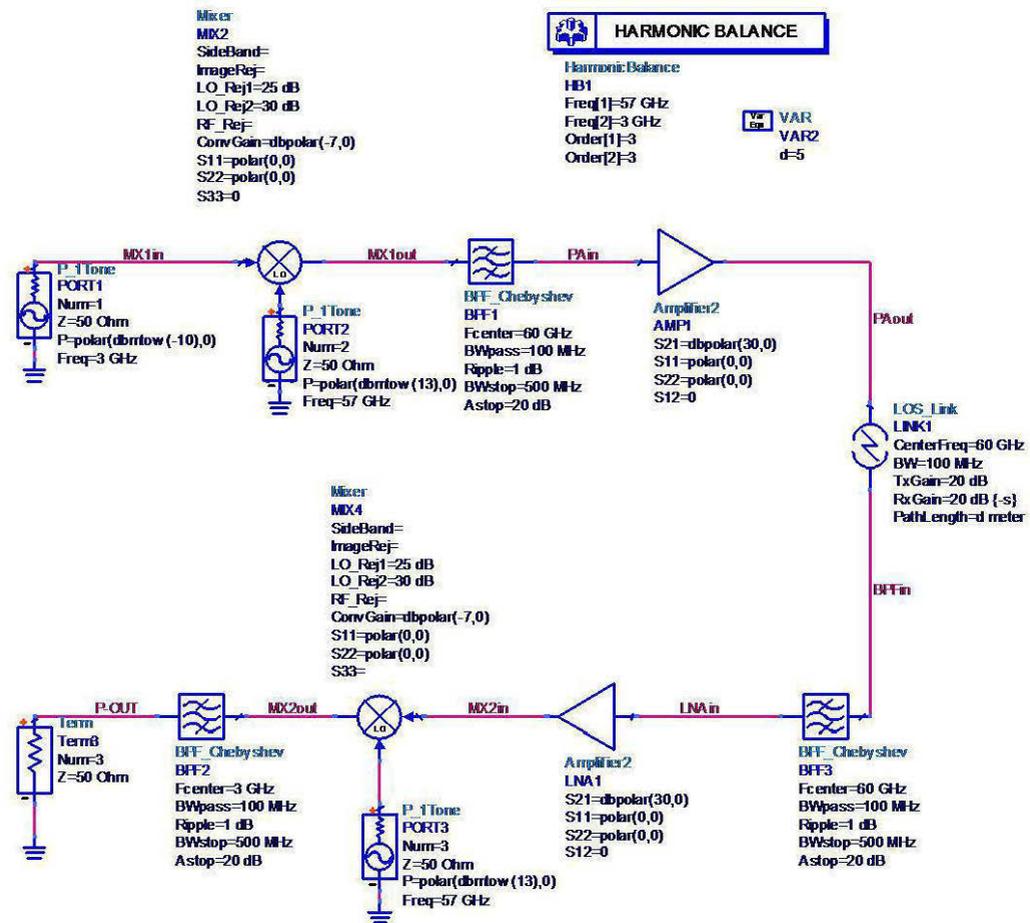


Figure 20– Simulation sous ADS.

La puissance reçue au niveau de récepteur à 60 GHz est illustrée dans la figure 5.4

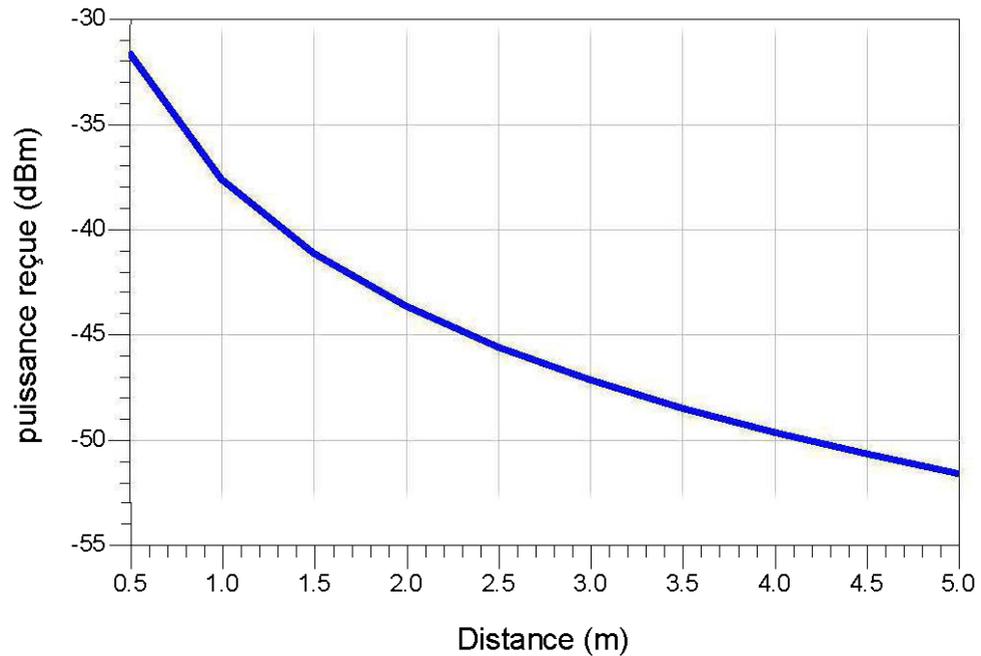


Figure 21– *Puissance reçue en fonction de distance.*

## 5.4 Réalisation du système de mesure

Il faut expliquer ici le choix des composants que tu as pris

Après la simulation sous ADS on a commencé par la conception de notre système de mesure. Les différents composants actifs du montage sont alimentés en 12V, et consomment chacun 500 mA, soit 2,5 A pour chaque partie du montage (émission et réception). En effectuant le calcul avec la formule suivante :

$$P=U.I \quad (5.1)$$

Avec P en Watt, U en volt et I en ampère, on trouve que l'émetteur et le récepteur dégagent chacun 19W sous forme de chaleur. Le montage a donc été pourvu de dissipateurs de chaleur et de ventilateur qu'il a fallu adapter et fixer au

montage afin de constituer un prototype stable et robuste. Sans extraction de cette chaleur les composants vont connaître une surchauffe ce qui engendrerait un mauvais fonctionnement voire même la détérioration du matériel.

La figure 5.5 nous montre le système de mesure qui est développé au laboratoire de recherche TELEBEC en communications souterraine, et qui est utilisé pour les mesures.

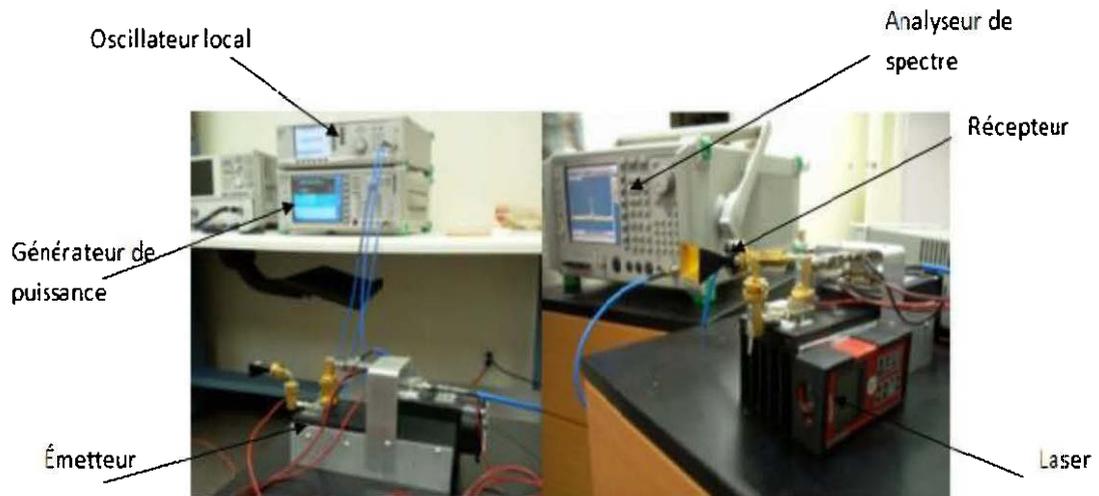


Figure 22– *Système de mesure réalisé.*

## 5.5 Mesure dans le laboratoire

Les premières mesures ont été prises dans la salle de laboratoire (LRTCS). Cette chambre a comme longueur 7 mètres, 6 mètres de largeur et 3 mètres de hauteur comme l'illustre la figure 5.6.

Ces mesures ont été faites suivant deux scénarios (visibilité directe (LOS), et visibilité obstruée en utilisant un obstacle humain (OLOS).

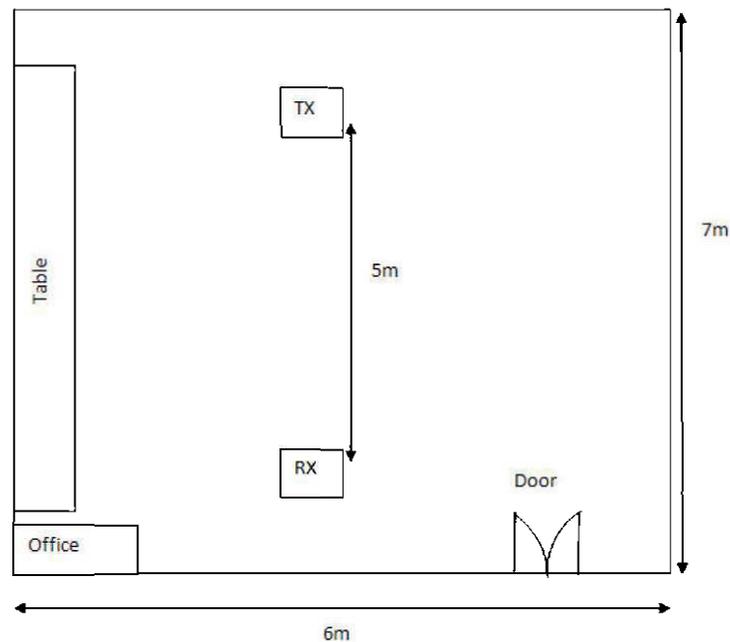


Figure 23– Salle de mesure au laboratoire de recherche.

### 5.5.1 Mesure en visibilité directe (LOS)

Pour effectuer les mesures en visibilité directe LOS nous avons mis en place un setup de mesure basique comme nous montre la figure 5.7 : nous avons utilisé une planche de bois qui nous offre une meilleure stabilité et une grande précision lors du déplacement des antennes.

Nous avons ensuite fait des marques sur la planche partant de 0 jusqu'à 5m. Afin de rendre le setup de mesure plus précis, nous avons choisi d'utiliser un Laser mètre. Cet appareil mesure la distance avec une précision au millimètre au moyen d'un rayon laser.

Nous l'avons fixé sur le récepteur et mis une simple cible sur l'émetteur. Étant donné que l'on peut observer le point lumineux du laser sur la cible, il est donc plus facile de procéder à l'alignement des deux antennes et de le conserver lorsque l'on éloigne le récepteur de l'émetteur.

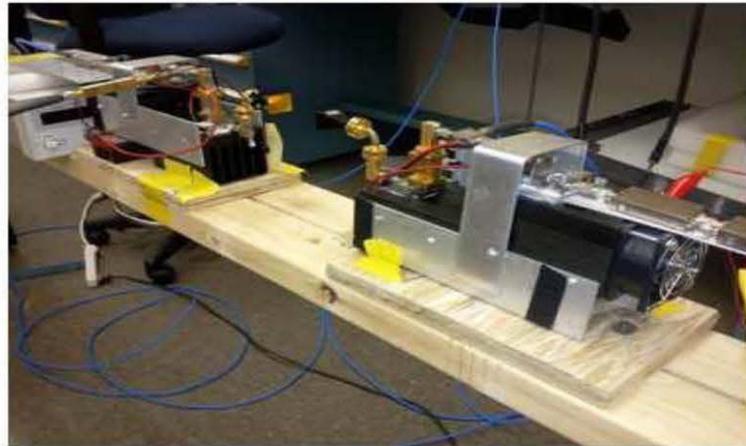


Figure 24 – *Système de mesure au laboratoire.*

Les figures 5.8 et 5.9 montrent les résultats obtenus à distance 0,5 et 1 mètre et qui montre que la puissance varie de 6 dBm quand on double la distance. Ce résultat est compatible avec le modèle de propagation en espace libre (FRIIS model) et qui montre que notre système de mesure fonctionne bien.

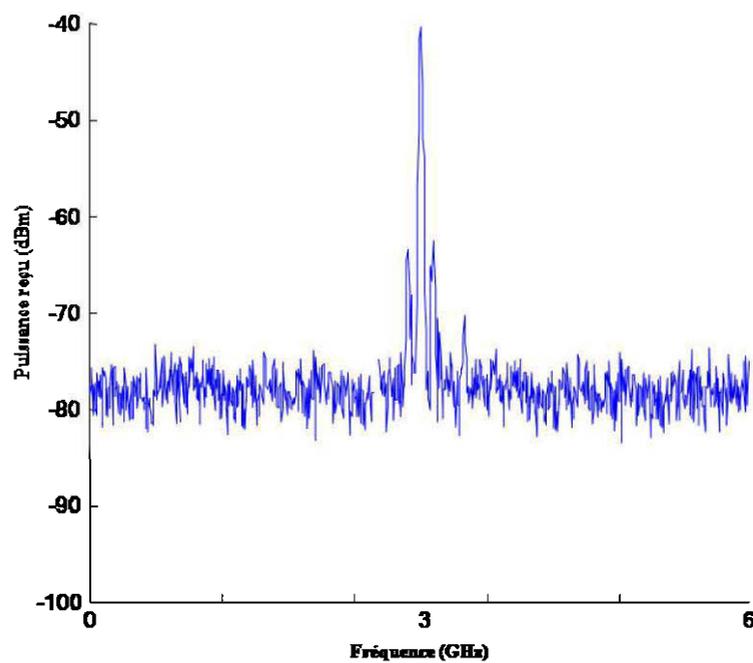


Figure 25– *Puissance reçue en visibilité directe à la distance de 0.5m.*

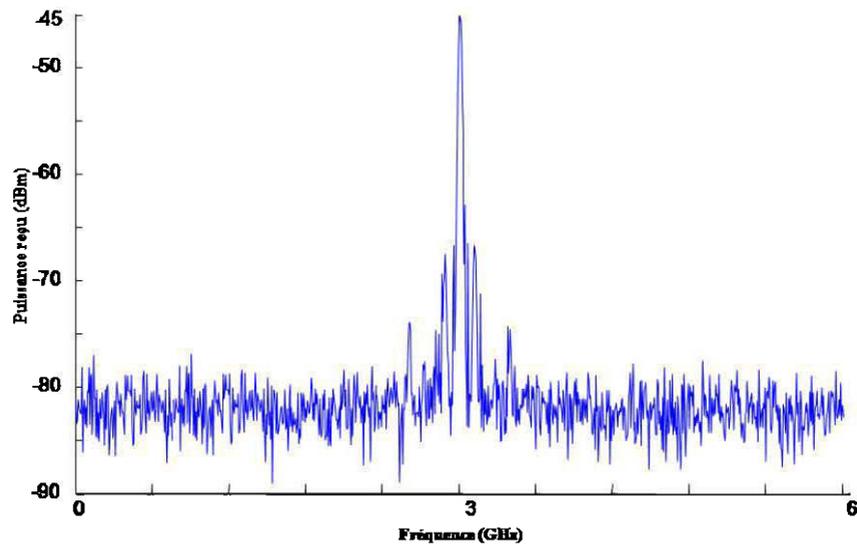


Figure 26– *Puissance reçue en visibilité directe à la distance 1m.*

### 5.5.2 Mesure en visibilité obstruée (OLOS)

Dans ce scénario de mesure, l'émetteur et le récepteur sont fixés à une distance de 5 mètres et un corps humain mobile entre les deux avec des distances précises.

Les figures (5.10) et (5.12) montrent que la puissance est totalement absorbée quand l'obstacle humain était à une distance proche de l'émetteur et du récepteur, et il commence à apparaître quand l'obstacle est à une distance moyenne entre les deux et ce qui est illustré par la figure 5.11.

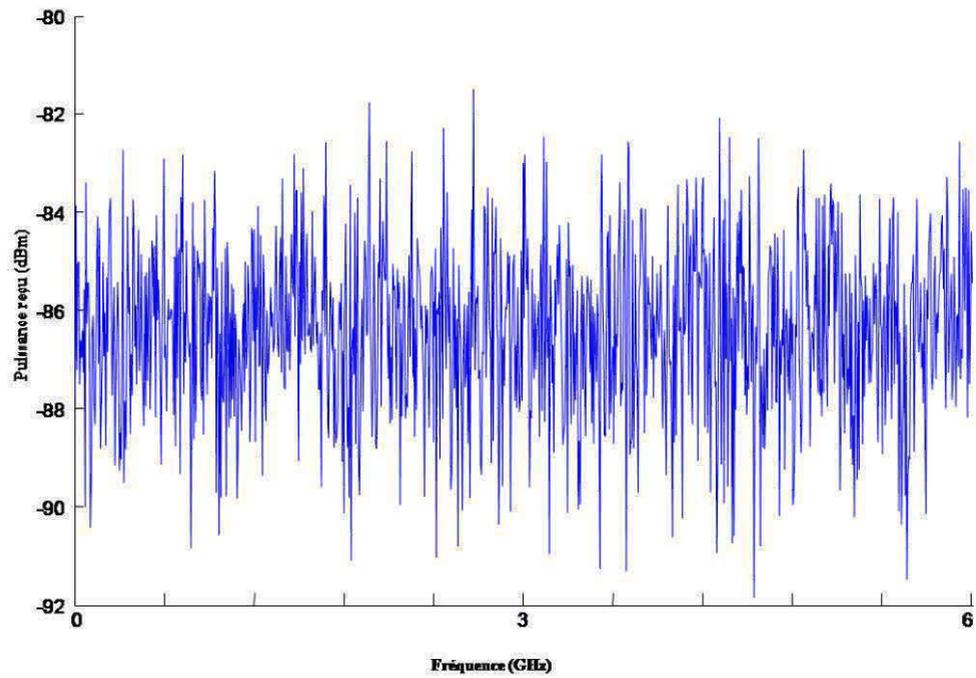


Figure 27– *Puissance reçue en visibilité obstruée à la distance de 0.5m.*

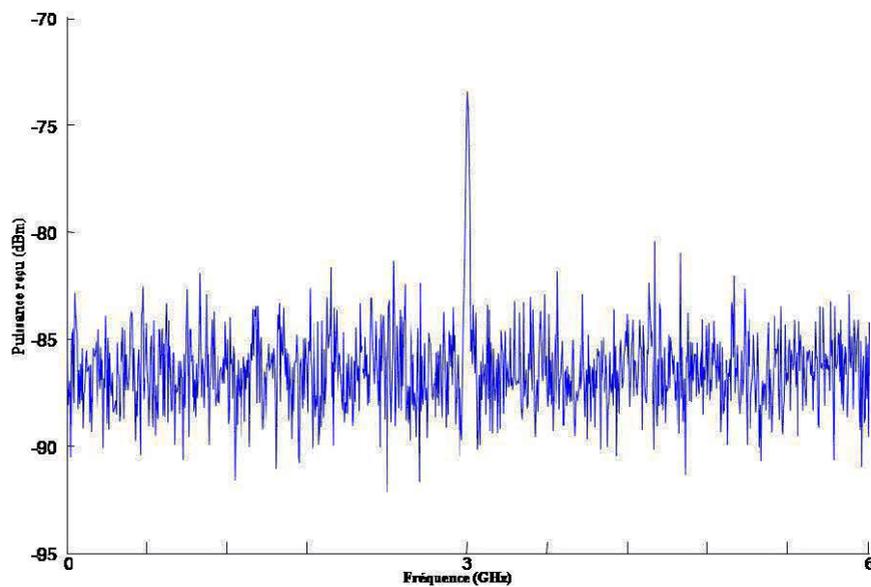


Figure 28– *Puissance reçue en visibilité obstruée à la distance de 2m.*

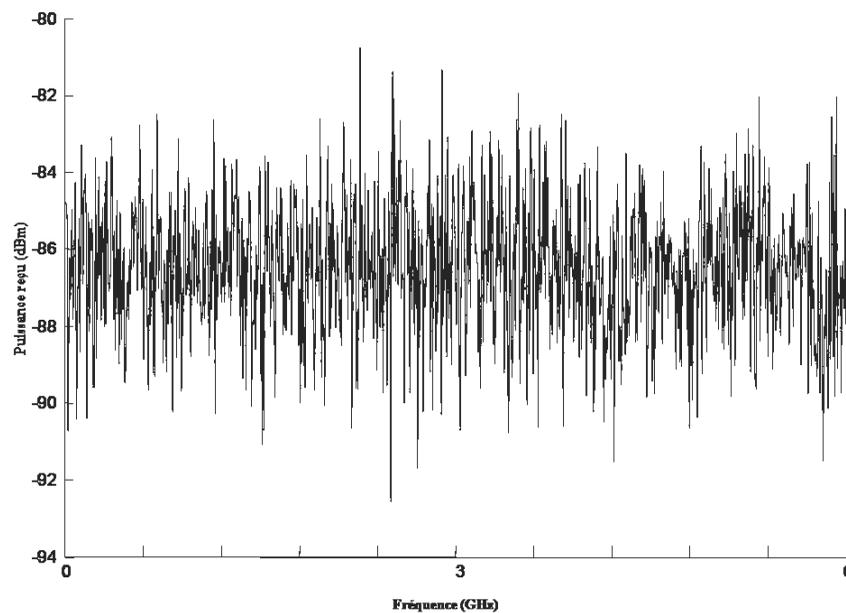


Figure 29– *Puissance reçue en visibilité obstruée à la distance de 4.5m.*

## 5.6 Mesure dans la mine

Le Gouvernement Fédéral Canadien a mis en place la mine laboratoire CANMET en utilisant l'infrastructure souterraine de l'ancienne mine d'or Beacon située à environ 15 km de la ville de Val d'Or. La mine CANMET offre un environnement souterrain idéal pour les expérimentations de nouveaux matériaux miniers (test d'explosif, technique de forage) et à la recherche scientifique telle que la géologie. Le LRTCS bénéficie aussi de l'accès à la mine laboratoire CANMET, afin que les chercheurs et étudiants puissent expérimenter leurs travaux.

Les principales caractéristiques des mines qui peuvent influencer sur la télécommunication minière :

- structure non uniforme
- réseau de tunnels interconnecté

- alcôves
- blocage de tunnel
- parois rugueuses
- terrains inégaux

Les mesures dans la mine ont été faites à travers la même démarche et aux mêmes scénarios que celle du laboratoire, mais au lieu d'utiliser la planche en bois on utilise un support de caméra pour fixer le récepteur comme nous montre la figure 5.13.



Figure 30– *Système de mesure dans la mine.*

### **5.6.1 Mesure en visibilité directe**

Les figures (5.14, 5.15) montrent la puissance reçue par l'analyseur de spectre en fonction de la fréquence en deux différentes distances (0.5 et 1 mètre).

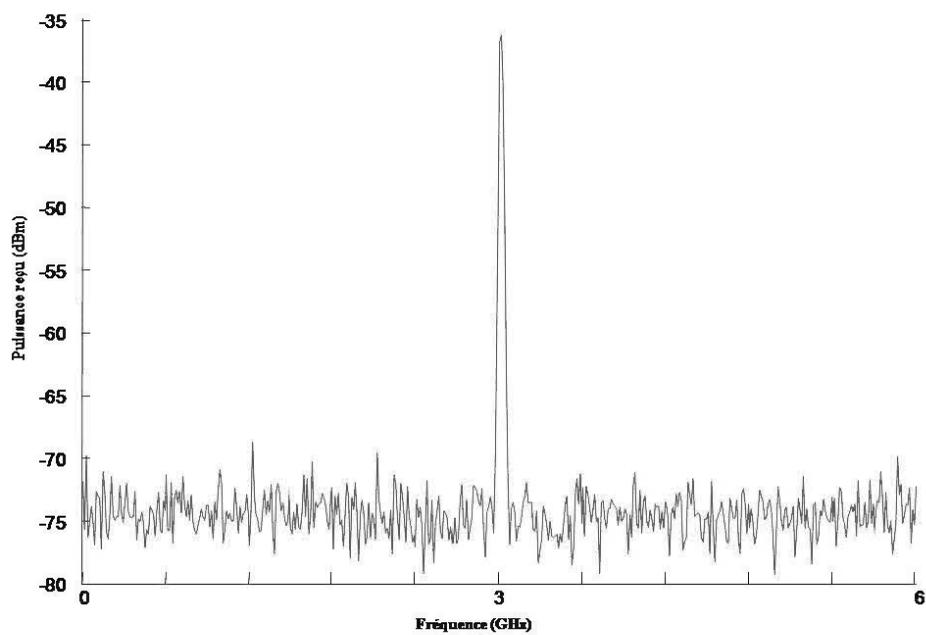


Figure 31– Puissance reçue en visibilité directe à la distance de 0.5m.

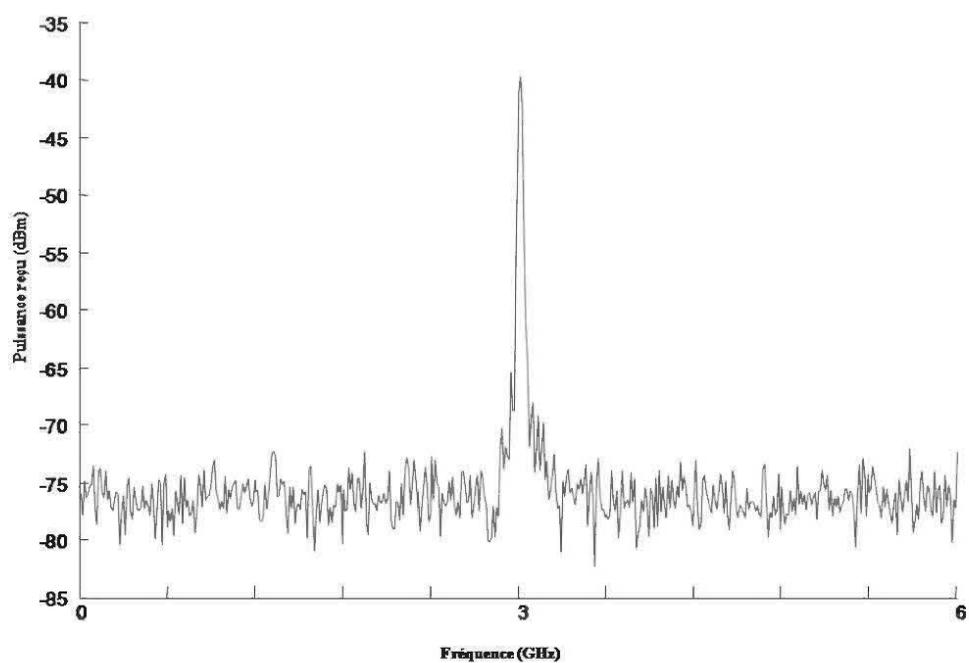


Figure 32– Puissance reçue en visibilité directe à la distance de 1m.

## 5.7 Mesure en visibilité obstruée

Les mesures minières en visibilité obstruée en utilisant un obstacle humain correspondent aux mesures trouvées dans la salle du laboratoire. La puissance est totalement absorbée par l'obstacle humain lorsque la distance de ce dernier est très proche de l'émetteur ou du récepteur (0,5m et 4,5m) comme nous montrent les figures 5.16 et 5.18, et lorsque l'obstacle est à une distance moyenne de l'émetteur ou du récepteur (2m), la puissance commence à apparaître comme l'illustre la figure 5.17.

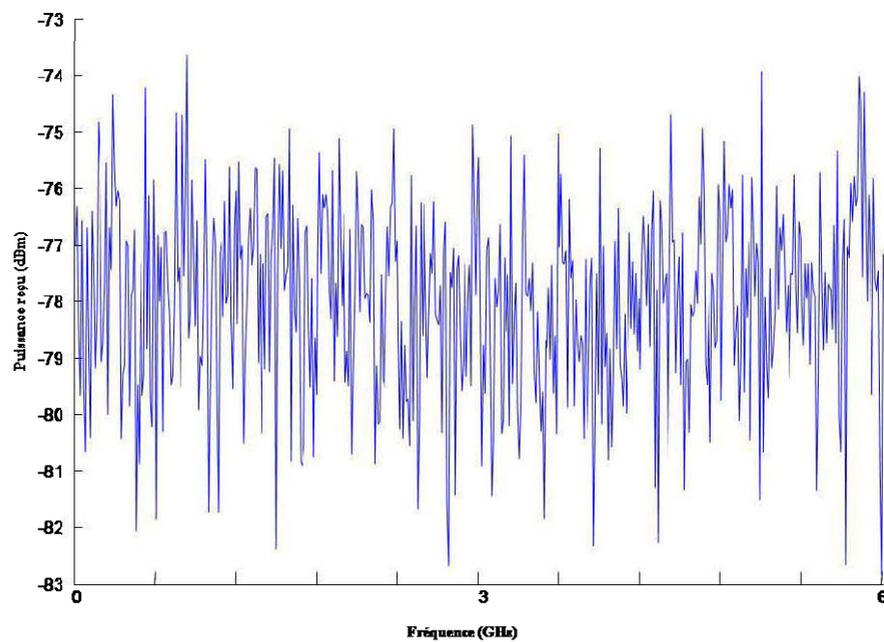


Figure 33– Puissance reçue en visibilité obstruée à la distance de 0.

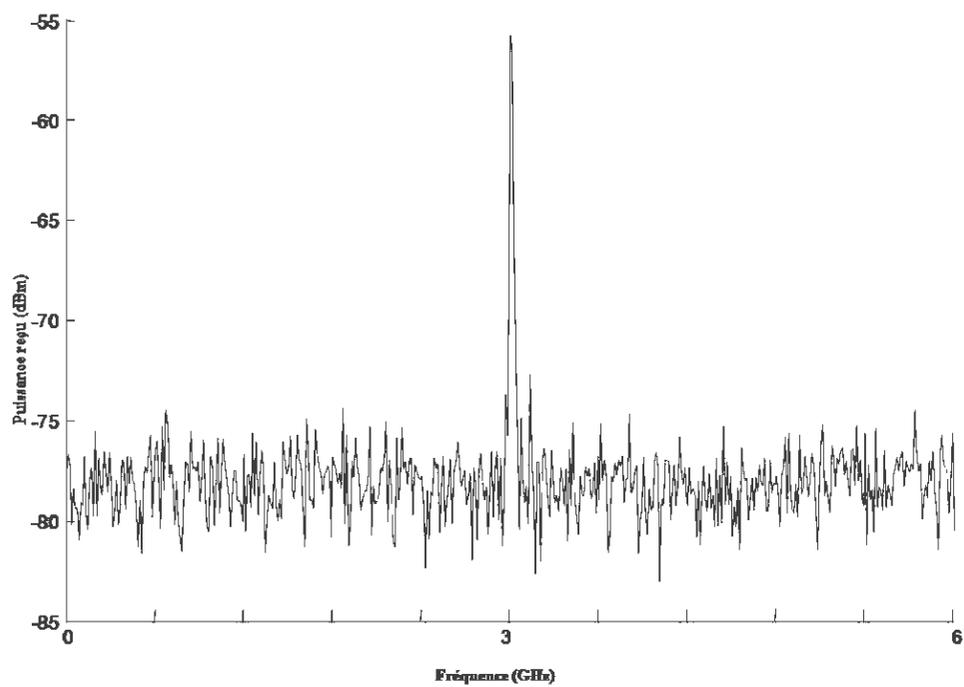


Figure 34– *Puissance reçue en visibilité obstruée à la distance de 2m.*

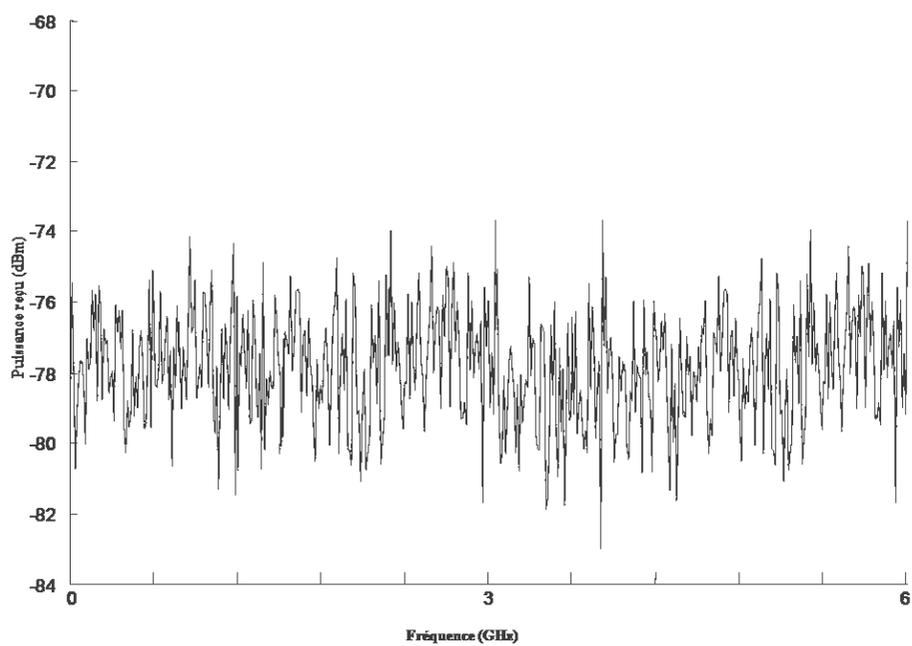


Figure 35– *Puissance reçue en visibilité obstruée à la distance de 4.5m.*

## **5.8 Comparaison entre les deux environnements**

Le but de cette partie est de comparer les valeurs de la puissance reçue dans la mine et dans le laboratoire.

Dans le laboratoire, la puissance varie environ 21 dB par décade de la distance 0,5 mètre à 5 mètres. Il est à noter que cette valeur est proche du modèle de propagation en espace libre (FRIIS model) avec  $n=2,15$  et  $\sigma=8\text{dB}$  (tableau 3.6).

En revanche la variation du niveau de puissance dans le domaine minier ne respecte pas le modèle de FRIIS. En effet, la variation de la puissance qui est d'environ 10 dB par décade avec  $n=1.15$  et  $\sigma=3.5\text{ dB}$  (tableau 3.6) affirme l'effet de tunnel dans la mine.

Une comparaison de la puissance reçue en visibilité directe (LOS) est faite dans les deux environnements (Laboratoire et Mine CANMET) celle-ci est en fonction de la distance variant de 0.5 à 5 mètre avec un pas de 0.5 mètre, comme le distingue la figure 5.19.

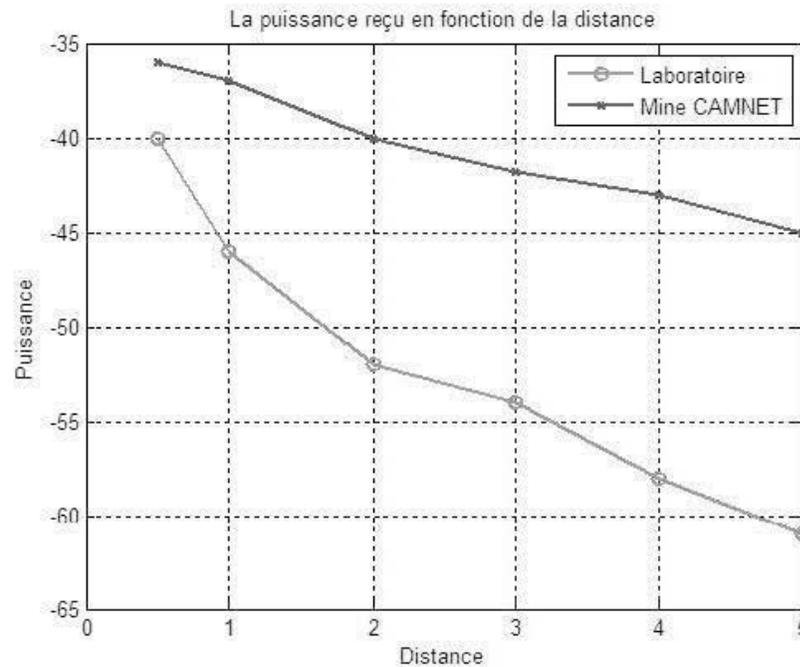


Figure 36– Comparaison de la puissance reçue en visibilité directe dans les deux environnements.

	n	$\sigma$ (dB)
Laboratoire	2.31	8
Mine	1.15	3,5

Tableau 6 – Comparaison d'exposant de perte (n) et d'écart-type ( $\sigma$ ) dans les deux environnements.

Dans le cas où un obstacle humain bouge entre l'émetteur et le récepteur, le résultat de mesure obtenu dans le laboratoire montre que la puissance reçue est totalement noyée dans le bruit quand l'obstacle est très proche de l'émetteur ou du récepteur, et elle commence à augmenter quand l'obstacle est à une distance comprise entre 2,25 mètres et de 3 mètres (milieu du chemin).

La puissance reçue obtenue dans la mine est la même que celle obtenue dans le

laboratoire, si l'obstacle humain est proche de l'émetteur ou du récepteur, mais avec une différence de niveau de bruit qui est aux alentours de -82 dBm dans le laboratoire et -72 dBm dans la mine. Par contre le niveau de la puissance reçue au milieu du chemin minier (entre 1,5 mètre et 2,5 mètres) est plus grand que celui du laboratoire.

La comparaison de la puissance reçue dans les deux environnements en fonction de la distance en présence de l'obstacle humain (OLOS) est représentée dans la figure 5.20.

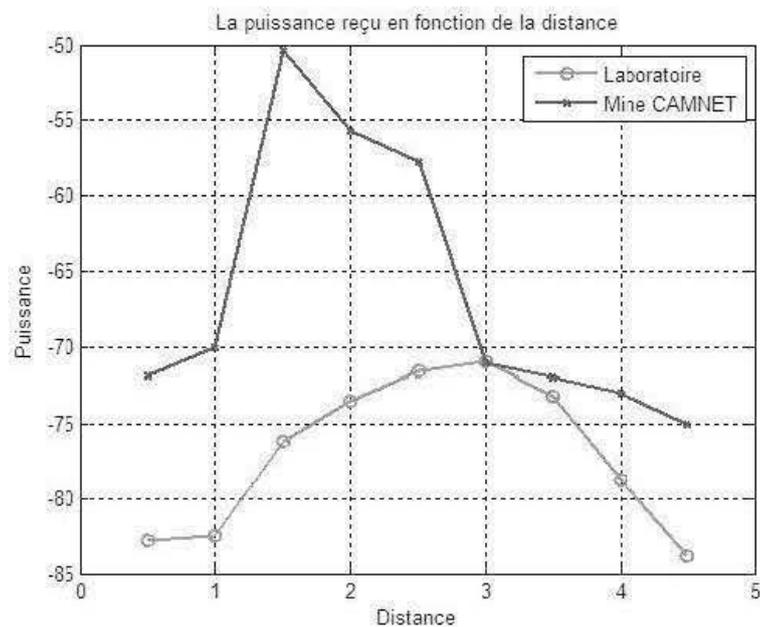


Figure 37– *Comparaison de la puissance reçue en visibilité obstruée dans les deux environnements.*

## 5.9 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'expliquer le développement d'un système de mesure qui nous permet d'étudier la propagation d'un signal 60 GHz. Le système conçu a été calibré pour avoir la première zone de Fresnel, donnant une erreur de déviation moins de 1 dB par rapport au modèle de FRIIS.

Dans un autre chapitre Les mesures ont été faites dans deux environnements (salle de laboratoire et mine CANMET) et suivant deux scénarios (visibilité directe et visibilité obstruée). Les mesures en visibilité directe dans le laboratoire ont montré, comme prévu, une relation inversement proportionnelle entre la puissance reçue et la distance. Les mesures en visibilité obstruée montrent l'effet de l'obstacle humain sur la propagation en 60 GHz qui a causé une atténuation changeable entre 20 et 30 dB.

Dans le milieu souterrain, les résultats obtenus sont mieux que nous attendions, la variation est d'environ 10 dB par décade dans la visibilité directe avec un exposant de perte égale à 1,15 et moins que celle trouvée au laboratoire, et l'atténuation causée par l'obstacle humain est moins que celle obtenue dans la chambre du laboratoire.

# Chapitre 6

## Conclusion générale et perspective

Ces dernières années, le domaine des télécommunications sans fil est à la recherche de nouvelles solutions pour assurer une augmentation des débits de transmission. Avec le développement des technologies sans fil, le spectre radioélectrique est de plus en plus saturé. Il est alors nécessaire de s'intéresser à des bandes de fréquences plus élevées, notamment celles des ondes millimétriques (30-300 GHz).

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude des atténuations à grande échelle subit dans un canal de propagation à 60 GHz dans un milieu confinée. Plusieurs campagnes de mesures ont été menées, la salle de laboratoire et la mine souterraine qui est un type d'environnement très peu exploré jusqu'à présent à ces fréquences.

Le deuxième chapitre de ce mémoire présente l'état de l'art des technologies de réseaux sans fil, nous avons présenté plusieurs normes et protocoles existants. Nous avons exposé une généralité sur les différents systèmes sans fil qui sont les réseaux locaux sans fil (WLANs), les réseaux personnels sans fil (WPANs), les réseaux métropolitains sans fil (WMANs) et les réseaux étendus sans fil (WWANs) et les différentes technologies de chaque système.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur la connaissance du canal à 60 GHz. Dans la première partie, on a essayé de comparer cette bande de fréquence avec d'autres bandes existantes, et ensuite on a défini la réglementation et la normalisation dans le monde pour la bande de 60 GHz.

Une étude sur la propagation d'ondes radio a été présentée dans le chapitre 4. Donc, on a commencé par définir le modèle de propagation en espace libre, ensuite on a présenté les phénomènes qui causent les trajets multiples qui sont la réflexion, la diffraction et autres. Et enfin, on a parlé du phénomène d'évanouissement qui est causé par les obstacles parcourus tout au long du trajet de l'onde.

Et enfin dans le dernier et cinquième chapitre, nous exposons notre travail tout au long de ma maîtrise qui consiste à développer un système de mesure qui nous permet d'étudier la propagation d'un signal 60 GHz dans un milieu confiné. On a commencé en premier lieu par réaliser une chaîne de transmission qui comprend un émetteur et un récepteur et on a détaillé chaque composant de ces deux derniers, ensuite on a simulé cette chaîne sous le logiciel ADS. On est passé ensuite à la partie pratique de ce travail et qui consiste à concevoir l'émetteur/récepteur, on a été amené à faire des mesures dans la salle du laboratoire et des mesures dans la mine CANMET suivant deux scénarios en visibilité directe et en visibilité obstruée, pour le premier cas, les mesures ont montré, comme prévu, une relation inversement proportionnelle entre la puissance reçue et la distance. Et pour le deuxième cas, les mesures montrent l'effet de l'obstacle humain sur la propagation en 60 GHz.

Et en dernier lieu, on a fait une comparaison entre les mesures obtenues dans les différents environnements et qui ont montré que les résultats obtenus dans le milieu souterrain ont été mieux que ce qu'on a prévu et que l'atténuation causée par l'être humain est moins par rapport à celle qui a été obtenus dans la salle du laboratoire.

Une des perspectives majeure de ce travail est de :

- Compléter cette étude avec une caractérisation à petite échelle.
- Étudier les effets des rayons de courbure des tunnels miniers sur la propagation du signal.

- Voir les effets de la mobilité sur le canal.

On pourrait faire des mesures à bande large (mesure de la réponse impulsionnelle du canal) qui déterminent l'atténuation de parcours, l'étalement temporel ( $T_m$ ), et l'indépendance de la phase avec les amplitudes et les retards, et c'est pour cette raison qu'on pourrait effectuer des mesures dans le domaine fréquentiel avec un analyseur de réseau (cette approche a été utilisée dans des fréquences aux alentours de 2.4 GHz et 5.8 GHz au laboratoire LRTCS) ou faire des mesures dans le domaine temporel. On pourrait alors utiliser 2 méthodes qui sont soit l'envoi d'une pulsation ou d'un code PN (pseudo aléatoire).

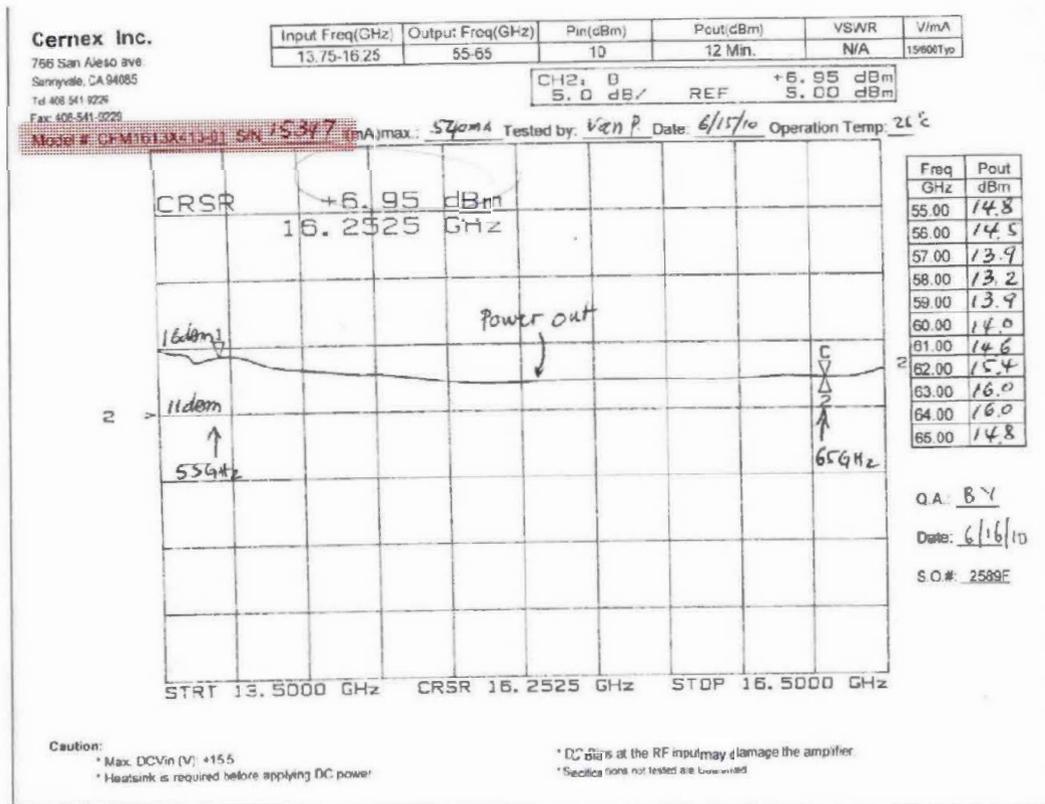
D'après les perspectives évoquées ci-dessus, nous espérons que cette mémoire offrira une source d'inspiration à de futurs travaux auxquels nous aimerons vivement contribuer.

# Chapitre 7

## Annexe A

Mesure de performance du Multiplicateur X4

### Multiplicateurs X4



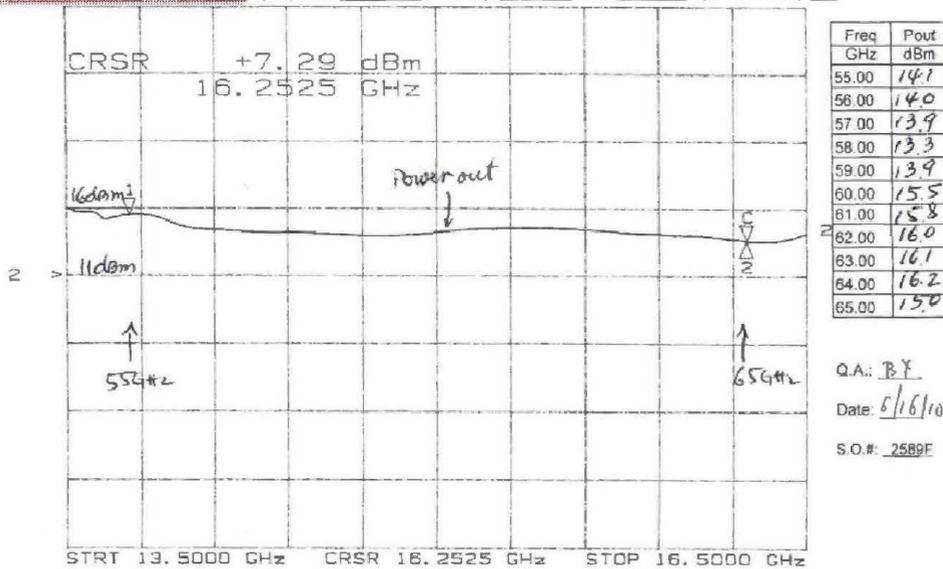
**Cernex Inc.**

786 San Aieso ave.  
Sunnyvale, CA 94085  
Tel: 408-541-9225  
Fax: 408-541-9229

Input Freq(GHz)	Output Freq(GHz)	Pin(dBm)	Pout(dBm)	VSWR	V/mA
13.75-16.25	55-65	10	12 Min	N/A	15600Typ

CH2: B  
5.0 dB/ REF +7.29 dBm  
5.00 dBm

Model #: CFM1610X13.01 SN: 15348 I(mA)max: 520mA Tested by: Vant Date: 6/15/10 Operation Temp: 25°C



**Caution:**

\* Max. DCVin (V): +15.5  
\* Heatsink is required before applying DC power.

\* DC Bias at the RF input may damage the amplifier.  
\* Specifications not tested are Guaranteed

Q.A.: B.Y.  
Date: 6/16/10  
S.O.#: 2589E

**Premier Mixeur :****1/2****GERNEX, Inc.**

P. 91

Customer: U du Quebec

Serial # 15353

S.O. # 25891

Model #: CMB64640508H-02

## Specifications

RF Frequency: 56-64	(GHz)	Isolation
LO Frequency: 56-64	(GHz)	LO-RF: 30dB
IF Frequency: DC-5	(GHz)	LO-IF: 25dB
LO Drive Level: 13 Typ.	(dBm)	
C.L.: 8 Typ.	(dB)	10dB

Tested By: Vamp.Date: 6/15/10Q.A.: BYDate: 6/16/10

Caution:

\* All specifications are tested under case temperature @ 25°C.

**Premier Mixeur :****2/2****Cernex Inc.**

Model# CMB64640508H-02

S/N: 15353

SO#2589I

766 San Alessandro Ave  
 Sunnyvale, CA 94089  
 Tel: 408-541-9226  
 Fax: 408-541-9229

CONV. LOSS.

RF In	mW	dBm	DC	1GHz	2GHz	3GHz	4GHz	5GHz
56GHz	1	0	-6	-6.8	-6.9	-6.3	-6.1	-6.7
57GHz	0.98	-0.1	-5.9	-6.7	-5.8	-5.9	-6.8	-7.3
58GHz	1.3	1.2	-8.5	-8	-8.4	-8.9	-9.5	-9.8
59GHz	2.2	3.4	-8	-8.2	-8.9	-9.6	-9.9	-10.5
60GHz	2.48	4	-6.9	-7.3	-7.5	-7.8	-8.2	-7.7
61GHz	2.32	3.8	-6.6	-6.7	-7	-7.5	-6.8	-6.1
62GHz	2.06	3	-7.4	-7.7	-8.3	-7.3	-6.3	-6.3
63GHz	1.65	1.5	-6.3	-6.6	-7.1	-6.1	-6	-6.5
64GHz	1.48	1.4	-8.1	-7.3	-6.4	-6.3	-6.8	-6.9

LO in 13dBm Typ.

56GHz
57GHz
58GHz
59GHz
60GHz
61GHz
62GHz
63GHz
64GHz



Deuxième Mixeur:

1/2

Pg 1

**CERNEX, Inc.**

Customer: U du Quebec

Serial # 15352

S.O. # 2589i

Model #: CMB64640508H-02

## Specifications

RF Frequency: 56-64	(GHz)	Isolation
LO Frequency: 56-64	(GHz)	LO-RF: 30dB
IF Frequency: DC-5	(GHz)	LO-IF: 25dB
LO Drive Level: 13 Typ.	(dBm)	
C.L.: 8 Typ.	(dB)	9dB

Tested By: VanP.Date: 6/15/10Q.A.: BYDate: 6/16/10

## Deuxième Mixeur 2/2

Pg 2

## Cernex Inc.

Model# CM864540502H-02

S/N: 15352

SO#2589i

786 San Alesso ave  
 Sunnyvale, CA 94085  
 Tel: 408-541-9226  
 Fax: 408-541-9226

CONV LOSS

RF in	mW	dBm	DC	1GHz	2GHz	3GHz	4GHz	5GHz
56GHz	1	0	-6.2	-7.8	-7.9	-7.2	-7.1	-7.2
57GHz	0.98	-0.1	-7.3	-7.8	-6.5	-6.5	-6.4	-6.5
58GHz	1.3	1.2	-9.2	-8.3	-8.2	-8.3	-8.6	-9.1
59GHz	2.2	3.4	-6.8	-6.8	-6.7	-6.7	-7.1	-6.9
60GHz	2.48	4	-7.1	-7.1	-7.4	-7.4	-7.5	-7.9
61GHz	2.32	3.8	-7	-7.1	-7.1	-7.7	-7.6	-6.1
62GHz	2.06	3	-7.5	-7.5	-7.5	-7.5	-7.9	-7.8
63GHz	1.65	1.5	-7.6	-6.6	-6.4	-6.6	-6.6	-7.6
64GHz	1.48	1.4	-6.2	-6.4	-6	-6	-6.9	-6

LO in 13dBm Typ.

56GHz
57GHz
58GHz
59GHz
60GHz
61GHz
62GHz
63GHz
64GHz



**Amplificateurs de Puissance (PA) :**

**Cemex Inc.**

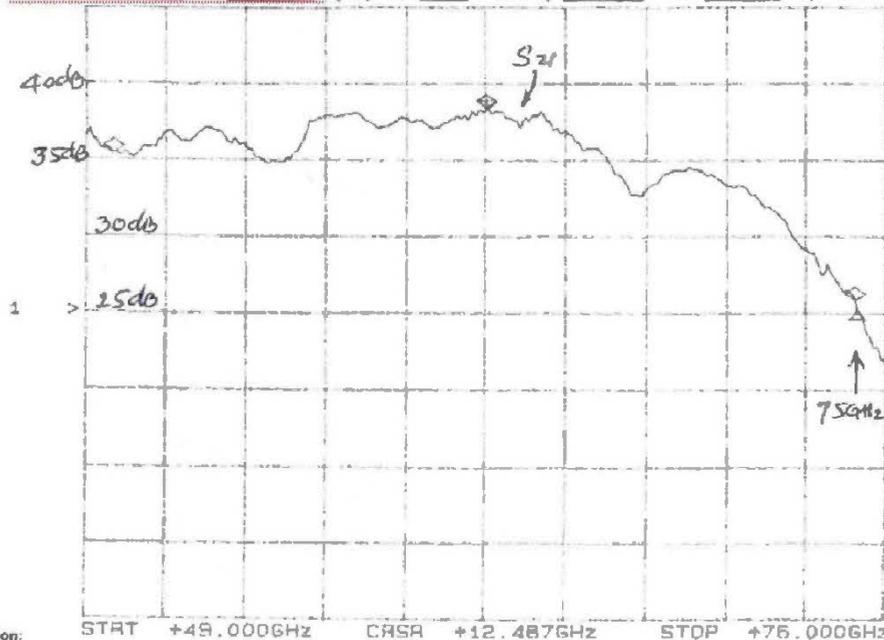
756 San Alejo ave.  
Sunnyvale, CA 94085

Tel: 408-541-9226 CH1: A -M + 13.11 dB  
Fax: 408-541-9229 5.0 dB/ REF + 25.00 dB

Freq(GHz)	ESQ(dB)	GF(dB)	P1dB(dBm) Min	NF(dB)Max	VO VSWR	VmA
50-75	15 Min	+/-10 Typ.	15 @ 50-65 GHz	-	2.5:1 typ	10*250
			7 @ 75 GHz			

Pg 1

Model # **CRMS0751507-01** SN: **15360** (mA)max: **330** Tested by: Van P Date: 6/21/10 Operation Temp: 25°C



Freq GHz	P1dB dBm
50.00	17.0
55.00	17.6
60.00	17.7
65.00	16.5
75.00	9.2

QA: BY  
Date: 6/21/10  
SO# 2589L

Caution:

- \* Max P<sub>in</sub> (dBm): +5
- \* Heatsink is required before applying DC power
- \* DC Bias at the RF input may damage the amplifier

- \* All specifications are tested under case temperature @ 25°C
- \* Max. DC voltage is 10.5 V

**Cernex Inc.**

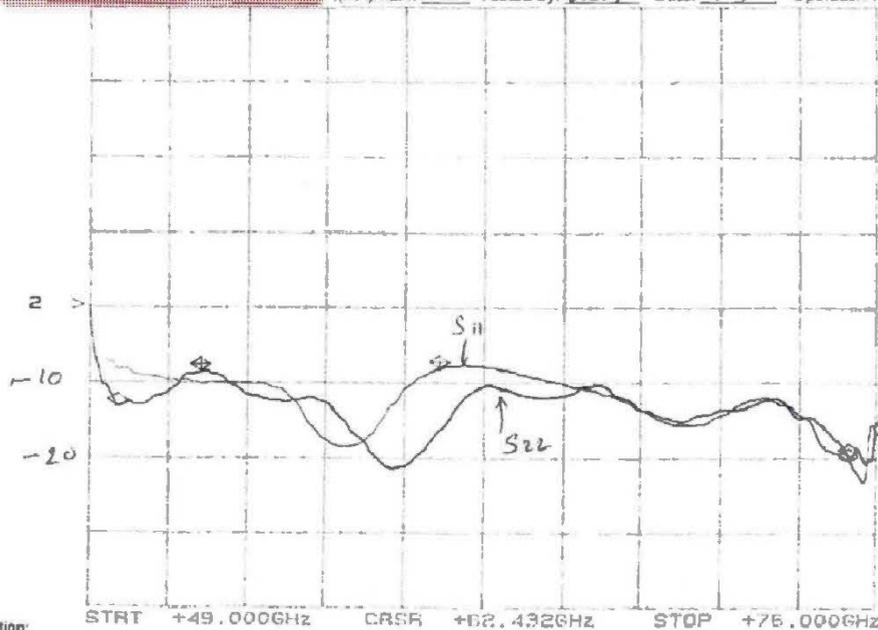
766 San Alessandro Ave.  
Sunnyvale, CA 94085  
Tel: 408-541-9226  
Fax: 408-541-9229

Freq(GHz)	SSG(dB)	Gain (dB)	P1dB(dBm) Min	NF(dB)Max.	ISO VSWR	VmA
50-75	15 Min	+/-10 Typ.	15 @ 50-65 GHz	—	2.5:1 typ	10/350

CH2: 9  
10.0 dB/ REF - 2.383 SWR  
7 @ 75 GHz  
-1.00 dB

pg 2

Model # CBM50751507-01 SN 15360 (mA)max.: 330 Tested by: Van P. Date: 6/2/10 Operation Temp: 25°C



Freq	P1dB
GHz	dBm
50.00	17.0
55.00	17.6
60.00	17.1
65.00	16.5
75.00	9.2

O.A: BY  
Date: 6/2/10  
SOW 2589L

**Caution:**

- \* Max. Pin (dBm): +5
- \* Heatsink is required before applying DC power
- \* DC Bias at the RF input may damage the amplifier.
- \* All specifications are tested under case temperature @ 25°C
- \* Max. DC voltage is 10.5 V.

**LNA :**

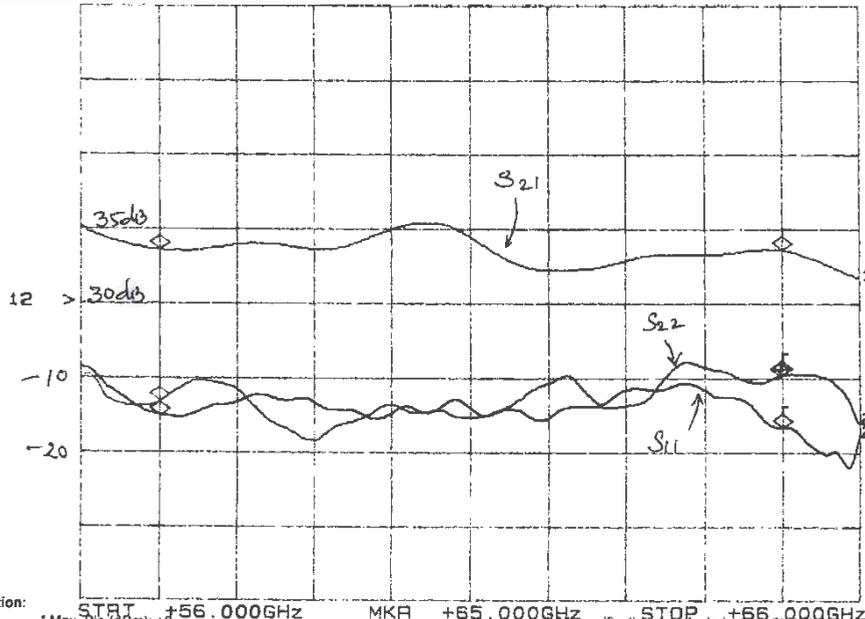
**Cernex Inc.**

766 San Aleso Ave.  
Sunnyvale, CA 94085  
Tel: 408-541-8226  
Fax: 408-541-8229

Freq(GHz)	SSG(dB)Min.	G(F) (dB)Max.	P1dB(dBm) Min.	NF(dB)Max.	I/O VSWR	V/mA
57-65	20	+/-2.5	9	5.5	2:1 Max	12-15/110 typ

CH1: A -M + 33.92 dB CH2: B --M - 14.77 dB  
5.0 dB/ REF + 30.00 dB 10.0 dB/ REF + .00 dB

Model #: CBL57052088-01 S/N: 75251 I(mA)max.: 180mA Tested by: Van P. Date: 5/26/10 Operation Temp: 25°C



Freq GHz	P1dB dBm
57.0	10.0
59.0	12.4
61.0	13.3
63.0	14.0
65.0	11.3

Freq GHz	NF dB
57.0	5.3
59.0	5.4
61.0	4.7
63.0	4.8
65.0	4.6

Q.A.: BY  
Date: 5/26/10  
SO#: 2689H

Caution: \* Max. Pin (dBm): +0 \* All specifications are tested under case temperature @ 25 degree C  
\* Heatsink is required before applying DC power. \* Max. DC voltage is 15.5 V  
\* DC Bias at the RF input may damage the amplifier \* Specifications not tested are Guaranteed

(No.1.

[14] CEPT Recommendation T/R 22-03 Provisional Recommended Use of the Frequency Range 54.25-66GHz by Terrestrial Fixed and Mobile Systems. <http://www.ero.dk/documentation/docs/doc98/official/pdf/TR2203E.PDF>. pages 1–3, January 1990. Athens.

[15] ECC Recommendation 05-02 Use of the 6466GHz Frequency Band for Fixed Services. June 2005.

[16] ETSI DTR/ERM-RM-049 Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters (ERM) : System Reference Document : Technical Characteristics of Multiple Gigabit Wireless Systems in the 60GHz Range. March 2006.

[17] Korean Frequency Policy Technology Workshop. page 1332, November 2005.

[18] Code of Federal Regulation title 47 Telecommunication, Chapter 1, part 15.255,. October 2004.

[19] Adrien Van den Bossche . Thèse de doctorat en Génie Informatique, Automatique et Traitement du Signal, Proposition d'une nouvelle méthode d'accès déterministe pour un réseau personnel sans fil à fortes contraintes temporelles. juillet 2007.

[20] IEEE P802-15-3c-D13 Part 15.3 . Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) : Amendment 2 : Millimeter-wave based Alternative Physical Layer Extension. 2009.

[21] ARIB STD-T69 . Millimeter-Wave Video Transmission Equipment for Specified Low Power Radio Station. 2005.

[22] ARIB STD-T74 . Millimeter-Wave Data Transmission Equipment for Specified Low Power Radio Station (Ultra High Speed Wireless LAN System . November 2005.

[23] Livre Blanc. Sécurité des systèmes sans fil version 2.0 . janvier 2004.

[24] Chong, C.C., Watanabe, F. and Inamura, H. Potential of UWB technology for the next generation wireless communications. Proceedings of IEEE

International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications (ISSSTA06), page 422429, August 2006.

[25] Australian Communications and Media Authority(ACMA).  
<http://www.acma.gov.au>.

[26] FCC First Report And Order. <http://hraunfoss.fcc.gov/edocspublic/attachmatch/FCC-02-48A1.pdf>, 2002.

[27] H. D. Hristov, J. R. Urumov, and M. J. Semov . Ring-shaped dielectric antenna, pages 109–113, Sept. 1980.

[28] Hassan Ghannoum. Thèse de doctorat en électronique et communications, Etude conjointe antenne/canal pour les communications UltraLarge Bande en présence du corps humain. décembre 2006.

[29] IEEE Standard 802.16 . IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16 Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems . 2001. [30] L. Boithias. Radio wave propagation . 1987.

[31] M. J. Lazarus, A. Silvertown, and S. Novak. Fresnel zone plate aids low-cost Doppler design. *Microwaves*, no. 11:78–80, 1979. [32] M. Schwartz. Principles of electrodynamics. 1972.

[33] Ministry of Internal Affairs and Communications. <http://www.soumu.go.jp/english/index.html>.

[34] Oliver, A.D . Millimeter wave systems past, present and future. *Proc. IEEE*, page 3552, 1989.

[35] T.S. Rappaport. *Wireless Communications : Principles and Practice*. Prentice Hall, 1996.

[36] Riadh Essaadalie. Conception et réalisation dun transmetteur radio fréquence multistandard pour les communications san fil et radionavigation. Master's thesis, école de technologie supérieure (ÉTS), juillet 2009.

[37] Wireless Gigabit Alliance (WiGig). <http://wirelessgigabitalliance.org/news/wigigalliance-publishes-multi-gigabit-wireless-specification-and-launches-adopter-program>.

[38] Yong, S.K. An overview of multigigabit wireless through millimeter wave technology : Potentials and technical challenges. EURASIP J. Wireless Commun. And Networking, page 10, 2007.