

# TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	II
TABLE DES MATIÈRES .....	III
LISTE DES FIGURES .....	VI
LISTE DES TABLEAUX .....	VIII
GLOSSAIRE .....	IX
RÉSUMÉ .....	X
ABSTRACT .....	XI
CHAPITRE 1 .....	1
INTRODUCTION .....	1
1.1 INTRODUCTION .....	1
1.2 OBJECTIF DU PROJET DE RECHERCHE .....	2
1.3 STRUCTURE DU MÉMOIRE .....	3
CHAPITRE 2 .....	4
LA TECHNOLOGIE À 60 GHZ.....	4
2.1 HISTORIQUE.....	4
2.2 DÉFINITION .....	5
2.3 AVANTAGES ET INCONVENIENTS.....	6
2.4 COMPARAISON AVEC D'AUTRES TECHNOLOGIES .....	7
2.5 APPLICATIONS POTENTIELLES.....	10
2.6 CONCLUSION .....	11
CHAPITRE 3 .....	13

CANAL DE PROPAGATION .....	13
3.1 INTRODUCTION.....	13
3.2 LES PHÉNOMÈNES PHYSIQUES DE LA PROPAGATION .....	13
3.2.1 Les mécanismes de la propagation .....	13
3.2.2 Les fluctuations à grande échelle.....	16
3.2.3 Les fluctuations à petite échelle.....	18
3.3 CARACTÉRISATION DU CANAL DE PROPAGATION.....	19
3.3.1 Caractérisation à grande échelle.....	19
3.3.2 Caractérisation à petite échelle.....	20
3.4 CONCLUSION .....	21
CHAPITRE 4.....	23
CAMPAGNES DE MESURES À 60 GHZ .....	23
4.1 INTRODUCTION.....	23
4.2 ENVIRONNEMENT DE MESURE.....	23
4.3 TECHNIQUE DE MESURE.....	26
4.3.1 Système de mesure.....	26
4.3.2 Protocole de mesure.....	29
4.4 DIFFÉRENTS SCÉNARIOS DE MESURE.....	31
4.4.1 Scénario I.....	31
4.4.2 Scénario II.....	32
4.4.3 Scénario III .....	33
4.5 CONCLUSION .....	33
CHAPITRE 5: .....	35

ANALYSE DES RÉSULTATS .....	35
5.1 INTRODUCTION.....	35
5.2 À GRANDE ÉCHELLE.....	35
5.2.1 Scénario I.....	35
5.2.2 Scénario II.....	38
5.2.3 Scénario III.....	40
5.3 À PETITE ÉCHELLE.....	41
5.3.1 Scénario I.....	41
5.3.2 Scénario II.....	43
5.3.3 Scénario III .....	46
5.4 CONCLUSION .....	48
CHAPITRE 6 .....	51
CONCLUSION .....	51
ANNEXE A : SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DES ANTENNES .....	54
ANNEXE B: PUBLICATIONS.....	56
RÉFÉRENCES .....	63

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Répartition du spectre électromagnétique.....	5
Figure 2.2 Répartition et exploitation des fréquences à travers le monde pour la technologie à 60 GHz.....	6
Figure 2.3 Applications potentielles pour la technologie à 60 GHz.....	11
Figure 3.1 Les types d'interactions d'une onde électromagnétique avec le milieu.....	14
Figure 3.2 Fluctuations à petite et à grande échelles de la réponse du canal.....	16
Figure 4.1 Niveau 40m.....	24
Figure 4.2 Niveau 70m.....	25
Figure 4.3 Laboratoire CANMET.....	26
Figure 4.4 Agilent E8363B.....	27
Figure 4.5 Schéma bloc du système de mesure.....	28
Figure 4.6 Système de positionnement VELMEX.....	29
Figure 4.7 Protocole de mesure.....	30
Figure 4.8 Les différentes positions au niveau 70 mètres.....	32
Figure 5.1 L'affaiblissement de parcours en fonction de la distance pour l'emplacement A.....	36
Figure 5.2 L'affaiblissement de parcours en fonction de la distance pour l'emplacement B.....	37
Figure 5.3 L'affaiblissement de parcours en fonction de la distance pour la combinaison DD.....	38
Figure 5.4 L'affaiblissement de parcours en fonction de la distance pour la combinaison DO.....	39

Figure 5.5 L'affaiblissement de parcours en fonction de la distance pour le laboratoire.....	40
Figure 5.6 L'étalement efficace des retards en fonction de la distance pour les emplacements A et B.....	41
Figure 5.7 La bande de cohérence en fonction de la distance pour les emplacements A et B.....	43
Figure 5.8 L'étalement efficace des retards en fonction de la distance pour les combinaisons DD et DO.....	44
Figure 5.9 La bande de cohérence en fonction de la distance pour les combinaisons DD et DO.....	45
Figure 5.10 L'étalement efficace des retards en fonction de la distance pour le laboratoire. ....	46
Figure 5.11 La bande de cohérence en fonction de la distance pour le laboratoire.....	47

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 Comparaison de l'implémentation des systèmes à 60 GHz, UWB et 802.11n en termes de puissance, du gain de l'antenne et du PIRE de sortie.....	8
Tableau 2-2 Comparaison de l'efficacité spectrale entre la technologie 60 GHz, UWB et IEEE 802.11n.....	9
Tableau 4-1 Paramètres de mesure.....	31
Tableau 4-2 Les différentes combinaisons d'antennes au niveau 40m.....	33
Tableau 5-1 Les valeurs du n et de l'écart-type pour les deux emplacements.....	36
Tableau 5-2 Les valeurs du n et de l'écart-type pour les deux combinaisons.....	39
Tableau 5-3 Les paramètres de dispersion scénario I. ....	42
Tableau 5-4 Les paramètres de dispersion scénario II.....	44
Tableau 5-5 Les paramètres de dispersion scénario III.....	47

## GLOSSAIRE DES ACRONYMES

<b>CDF</b>	Cumulative Distribution Function
<b>CIR</b>	Complex Response Impulse
<b>FCC</b>	Federal Communication Commission
<b>IFFT</b>	Inverse Fast Fourier Transform
<b>IR</b>	Impulse Response
<b>LNA</b>	Low Noise Amplifier
<b>LOS</b>	Line-of-Sight
<b>NLOS</b>	Non Line-of-Sight
<b>PA</b>	Power Amplifier
<b>PDF</b>	Probability Distribution Function
<b>PDP</b>	Power Delay Profile
<b>PL</b>	Path Loss
<b>RF</b>	Radio Frequency
<b>RMS</b>	Root Mean Square
<b>Rx</b>	Receiver
<b>Tx</b>	Transmitter
<b>UWB</b>	Ultra-Wideband
<b>VNA</b>	Vector Network Analyzer
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network

# RÉSUMÉ

Les systèmes de communications sans fil font partie de notre vie quotidienne, notamment dans les environnements industriels, et ne cesse d'évoluer vers des supports d'applications qui sont de plus en plus gourmandes en bande passante. Cela se reflète par l'intérêt porté aux ondes millimétriques et plus précisément à la bande de fréquence 60 GHz. Offrant une bande de 7 GHz, elle représente la solution la plus intéressante pour satisfaire la demande croissante pour une largeur de bande accrue.

La montée vers la gamme des ondes millimétriques permet d'offrir de nouvelles fréquences avec des largeurs de bande beaucoup plus importantes, avec des conditions de propagation très différentes. Les systèmes opérants dans cette bande de fréquence ont plusieurs avantages, notamment leur largeur de bande, leur très haut débit atteignant plusieurs Gbits/s et la possibilité de la miniaturisation des composants. Il s'agit, dans ce projet, de caractériser un canal de propagation à 60GHz dans un milieu minier souterrain afin de prédire les performances des futures solutions utilisant ces fréquences dans ce type d'environnement. Pour mener à bien ce travail, différentes campagnes de mesure ont été réalisées au sein de la mine et du laboratoire de CANMET.

A partir des mesures obtenues, les paramètres pertinents, notamment les paramètres à grande échelle tels que l'affaiblissement de parcours et à petite échelle tels que les paramètres de dispersion, sont analysés afin de caractériser le canal 60 GHz. La technique de mesure employée repose sur le sondage par balayage fréquentiel, exploitant un analyseur de réseau vectoriel.



# ABSTRACT

The wireless communication systems take an increasingly important place in our daily life, especially in industrial environments. They continue to evolve to support applications that need more bandwidth. This is reflected in the interest around the millimeter waves and specifically the 60 GHz frequency band. Offering 7 GHz of bandwidth, the 60 GHz band is the most attractive solution to satisfy the demand for higher operating bandwidth.

The increase to the range of millimeter waves can offer new frequency bands that are much wider with different propagation conditions. The systems that operate in this frequency band have several advantages such as the high bandwidth, the high data rate and the possibility of the miniaturization of components. The objective of this project is to characterize the 60 GHz propagation channel in the underground mining environment in order to predict the future performance solutions using this frequency band in this type of environments. To carry out this work, different measurement campaigns have been carried out in the CANMET's mine and laboratory.

From the obtained data, the relevant parameters, including large-scale parameters such as the path loss and small-scale parameters such as the dispersion parameters are analyzed to characterize the 60 GHz channel. The measurement technique used is based on frequency sweeping, using a vector network analyzer.

# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION

### 1.1 INTRODUCTION

La demande grandissante pour des débits de transmission très élevés justifie l'émergence de systèmes fonctionnant en ondes millimétriques et plus précisément des liens à 60 GHz qui représentent la solution la plus intéressante pour satisfaire cette demande. La montée vers la gamme des ondes millimétriques permet d'offrir de nouvelles bandes de fréquences beaucoup plus larges pour les WLAN et WPAN avec des conditions de propagation très différentes.

Il faut aussi savoir qu'au cours des dernières années, les progrès dans les technologies de processus et de solutions à faible coût d'intégration ont fait des ondes millimétriques une technologie permettant d'attirer beaucoup d'intérêt, surtout dans les milieux industriels, des organismes de normalisation et des milieux de la recherche universitaire tels que le LRTCS (Laboratoire de Recherche Télébec en Communications Souterraines).

Les ondes millimétriques représentent l'option la plus prometteuse pour permettre aux systèmes à haut débit de données d'exister et elles se situent dans la partie du spectre électromagnétique comprise entre 30 et 300 GHz, correspondant à des longueurs d'onde de 10 à 1 mm. [1] [2] D'importantes activités de recherche sont, maintenant, en cours pour concevoir la prochaine génération de systèmes de communication sans fil à haut débit dans cette bande, surtout autour de 60 GHz où

une entente internationale est intervenue pour réserver le spectre entre 60 et 67 GHz aux communications sans fils.

Les télécommunications sans fil connaissent un intérêt toujours soutenu depuis plus d'une décennie car elles permettent une simplification des infrastructures par rapport aux télécommunications filaires, une mobilité accrue des terminaux et finalement, un usage plus souple pour l'utilisateur.

Les systèmes de communications sans fil font partie de notre vie quotidienne et ne cessent d'évoluer pour nous donner une meilleure qualité. Nous allons donc nous intéresser, dans ce mémoire, aux systèmes de communications sans fil et spécialement ceux qui fonctionnent à 60 GHz.

Les ondes radio à 60 GHz permettent à de nombreuses applications qui ne peuvent pas être réalisées à des fréquences plus basses de voir le jour. Pour la technologie à 60 GHz, une portion appréciable de l'espace spectral a été allouée dans le monde entier pour les communications locales sans fil. [1]

## **1.2 OBJECTIF DU PROJET DE RECHERCHE**

Les chercheurs du LRTCS ont pour objectif principal le développement de systèmes de communication visant l'amélioration des communications, l'accroissement de la sécurité et l'automatisation dans les mines.

L'objectif de ce travail est la caractérisation du canal dans un environnement minier afin de vulgariser la propagation dans ce type d'environnements. Pour mener à bien ce travail, une étude de la propagation avec différentes configurations d'antennes et dans différentes galeries a été faite.

Ce mémoire présente les résultats expérimentaux obtenus au cours de campagnes de mesure sur une bande de fréquences allant de 59 GHz à 61 GHz dans un environnement minier souterrain. Les mesures ont été effectuées selon plusieurs scénarios : au milieu de la galerie et à proximité de la paroi, dans deux galeries différentes et en utilisant deux types d'antennes, directionnelles et omnidirectionnelles.

Les résultats obtenus permettent l'extraction des paramètres, à grande et à petite échelles, qui contribuent à la mise en place optimale de réseaux.

### **1.3 STRUCTURE DU MÉMOIRE**

Le mémoire se compose, outre cette introduction, de cinq chapitres représentant les étapes de la démarche suivie. Au deuxième chapitre, la technologie à 60 GHz est présentée, ainsi que ses avantages et inconvénients, permettant de mettre en exergue l'importance du passage en hautes fréquences. Le chapitre trois décrit le canal de propagation et ses caractéristiques. Le chapitre quatre décrit l'environnement minier, présente le système de mesure et définit les différents scénarios de mesures. Au cinquième chapitre, les paramètres du canal, basés sur des mesures expérimentales, sont définis. Enfin, au sixième chapitre, les conclusions de ce travail sont établies et quelques perspectives sont proposées.

## CHAPITRE 2

### LA TECHNOLOGIE À 60 GHz

#### 2.1 HISTORIQUE

Depuis la première transmission radio transatlantique, effectuée par Marconi de Cornwall en Angleterre, à Terre-Neuve au Canada, en 1901, les communications sans fil ont connu une grande évolution. [1]

Les technologies aux ondes millimétriques sont parmi les plus importantes technologies émergentes, ces dernières années. Bien qu'elles soient connues depuis de nombreuses décennies, ce n'est qu'au cours des six dernières années qu'elles sont devenues pertinentes d'un point de vue commercial, grâce aux progrès des technologies de processus et des solutions à faible coût d'intégration.

Initialement, les ondes millimétriques étaient utilisées pour des applications militaires ensuite elles se sont, rapidement, étendues à des fins commerciales. Entre autres, on y trouve la téléphonie cellulaire, le service de positionnement global, connu sous le nom GPS, les technologies de réseaux sans fil locaux et personnels, WLAN et WPAN. Aujourd'hui, la technologie des ondes millimétriques suscite un intérêt considérable auprès des milieux universitaires, des organismes de normalisation et des milieux de l'industrie.

Concernant ce mémoire, on se concentre, spécialement, sur les ondes radio à 60 GHz qui permettent à de nombreuses applications, qui ne peuvent pas être réalisées à des fréquences plus basses, de voir le jour. D'importantes activités de recherche sont

maintenant en cours pour concevoir la prochaine génération de systèmes de communication sans fil à haut débit dans cette bande.

## 2.2 DÉFINITION

La saturation de la bande passante à des fréquences plus basses est l'une des principales contraintes au développement des systèmes sans fil à large bande. La montée vers la gamme des ondes millimétriques, en particulier, vers la bande de fréquence à 60 GHz permet d'offrir de nouvelles bandes de fréquences beaucoup plus larges.

Les ondes millimétriques opèrent dans la bande des GHz, plus précisément, sur la partie du spectre électromagnétique comprise entre 30 et 300 GHz, correspondant à des longueurs d'onde de 10 à 1 mm [3], comme le montre la figure 2.1.

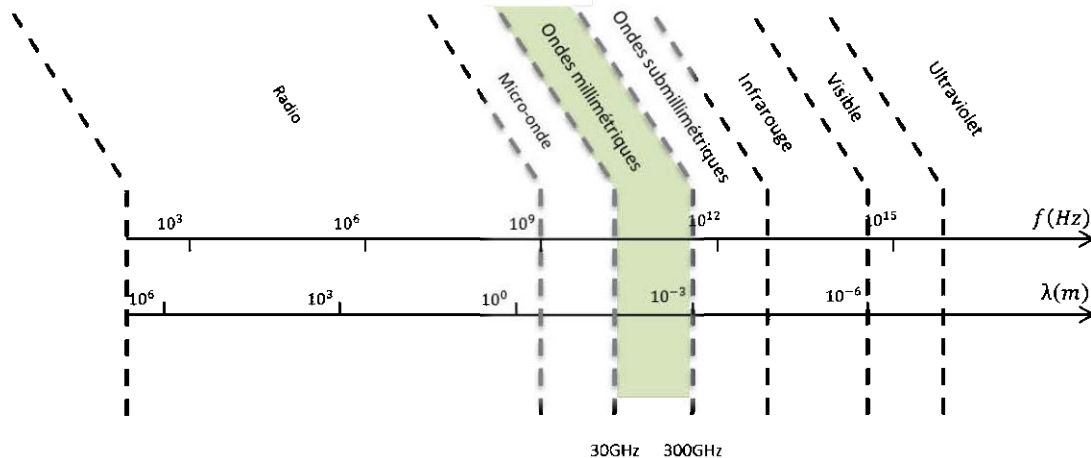


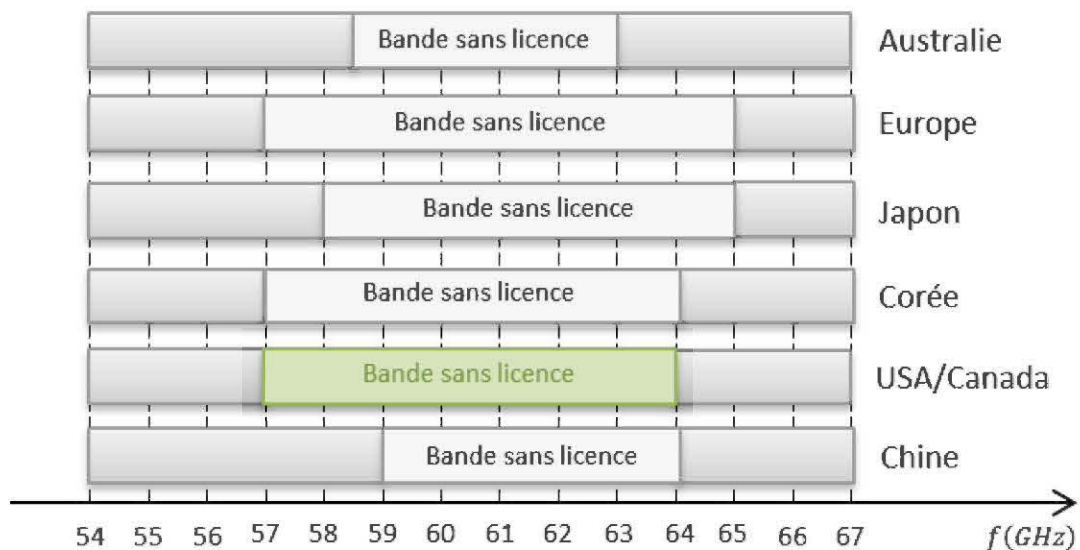
Figure 2-1 Répartition du spectre électromagnétique.

La bande de fréquence à 60 GHz, où se produit une forte absorption d'oxygène d'environ 15.5 dB par km, est la plus intéressante pour les communications

intérieures à courte portée en raison de sa grande largeur de bande d'environ 5 GHz. La longueur d'onde de 5 mm, liée à la fréquence 60 GHz, permet de concevoir des appareils plus compacts et beaucoup plus petits. [4]

### 2.3 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

La technologie à 60 GHz offre une quantité appréciable de l'espace spectral dans le monde entier [5]. Bien que cela soit comparable à la largeur de bande sans licence allouée pour l'ultra large bande [6], la bande passante à 60 GHz offre une certaine continuité et présente moins de restrictions en termes de limites de puissance. La largeur de bande à bande 60 GHz est l'une des plus grandes largeurs de bande sans licence attribuée dans l'histoire. La disponibilité d'au moins 5 GHz de bande passante continue à travers le monde, illustrée à la figure 2.2, représente le plus important avantage de cette technologie par rapport aux autres.



**Figure 2-2** Répartition et exploitation des fréquences à travers le monde pour la technologie à 60 GHz.

L'importante bande passante permet à la technologie à 60 GHz d'avoir un grand potentiel en termes de capacité et de flexibilité en plus de la rendre particulièrement intéressante pour les applications sans fil.

De plus, l'atténuation des ondes à 60 GHz, due aux pertes de trajet, est considérée comme un grand avantage, du point de vue de la réutilisation de fréquences, ce qui permet d'avoir des réseaux locaux à très haut débit.

La technologie à 60 GHz facilite la miniaturisation des composants, rendant ainsi les appareils beaucoup plus compacts; cela permet des solutions multi-antennes qui sont beaucoup plus difficiles à réaliser à des fréquences inférieures.

Malgré les divers avantages offerts par la technologie à 60 GHz, les communications basées sur les ondes millimétriques font face à un certain nombre d'inconvénients tels que la courte portée et la forte atténuation, ce qui représente un sérieux défi pour la conception de systèmes à faible coût pour les applications à très haut débit de données.

## **2.4 COMPARAISON AVEC D'AUTRES TECHNOLOGIES**

La réglementation de la technologie à 60 GHz permet des puissances d'émission beaucoup plus élevées par rapport aux technologies existantes.

Le tableau 2.1 présente des exemples de systèmes à 60 GHz, UWB et IEEE 802.11 qui fonctionnent à proximité de la limite réglementaire de l'US Federal Communications Commission (FCC).



**Tableau 2-1** Comparaison de l'implémentation des systèmes à 60 GHz, UWB et 802.11n en termes de puissance, du gain de l'antenne et du PIRE de sortie [1].

Technologie	Fréquence (Mhz)	Sortie du PA (dBm)	Gain de l'antenne (dBi)	PIRE à la sortie (dBm)
60 GHz	57-66	10	25	35
UWB	3.1-10.6	-11.5	1.5	-10
IEEE 802.11n	2.4/5.0	22	3	25

Bien que la réglementation de la FCC permette d'atteindre une puissance de 27 dBm pour les systèmes à 60 GHz, les contraintes de la fabrication limite les amplificateurs à 10 dBm. Cependant, l'énorme gain des antennes, atteignant les 40 dBi, compense la limitation de 10 dBm pour les amplificateurs et permet d'atteindre la puissance autorisée de 27 dBm.

La réglementation de la FCC impose aux systèmes UWB un masque spectral de puissances de -41.3 dBm/MHz impliquant une densité spectrale de puissance PIRE de l'ordre de -10 dBm. Ainsi, les systèmes UWB sont considérés comme des dispositifs à faible puissance et à très courte portée. Pour des fréquences allant de 2.4 à 5.0 GHz, la conception des amplificateurs de puissances est plus simple et la puissance délivrée est beaucoup plus importante.

Le tableau 2.1 indique que la PIRE des systèmes à 60 GHz est, environ, 10 fois plus grande que celle de la norme IEEE 802.11n et 30 000 fois plus grand que celle des systèmes UWB.

Pour les systèmes à 60 GHz, la puissance d'émission doit être élevée afin de compenser les grandes pertes de trajets. Bien que, dans certains cas, les grandes pertes de trajets soient considérées comme un désavantage, à 60 GHz, elles représentent un atout pour les environnements intérieurs. Autrement dit, les niveaux

d'interférences, à 60 GHz, sont moins élevés que pour des systèmes qui opèrent à des fréquences plus basses, entre 2 et 2.5 GHz et 5 et 5.8 GHz.

L'énorme bande passante disponible pour les technologies à 60 GHz et UWB peut, dans plusieurs applications, simplifier la conception de systèmes.

**Tableau 2-2** Comparaison de l'efficacité spectrale entre la technologie 60 GHz, UWB et IEEE 802.11n. [1]

Technologie	Bande passante (Mhz)	Efficacité spectrale à 1Gbits/s	Débit (Mbits/s)	Efficacité spectrale nécessaire (bits/s/Hz)
60 GHz	2000	0.5	4000	2.0
UWB	528	2.0	480	1.0
IEEE 802.11n	40	25.0	600	15.0

Le tableau 2.2 présente l'efficacité spectrale requise pour atteindre une transmission de 1 Gbits/s pour des systèmes à 60 GHz, UWB et IEEE 802.11. Un système à 60 GHz nécessite seulement 0.5 bits/s/Hz pour atteindre 1 Gbits/s.

Cette caractéristique en fait un candidat idéal pour supporter des applications à très haut débit de données en utilisant une modulation simple. Bien que le système UWB nécessite, seulement, 2 bits/s/Hz pour atteindre 1 Gbits/s, son déploiement effectif est limité à 400 Mbits/s sur une plage de fonctionnement de 1 m. Les systèmes IEEE 802.11n, semblables aux précédents, nécessitent 25 bits/s/Hz pour atteindre 1 Gbits/s, ce qui rend leur extension au-delà de 1 Gbits/s peu attrayante en termes de coût et de fabrication.

Les grandes pertes de trajets à 60 GHz permettent une réutilisation de fréquences pour les environnements intérieurs, rendant ainsi, les réseaux à très haut débit. La taille compacte des systèmes à 60 GHz permet également des solutions MIMO sur les

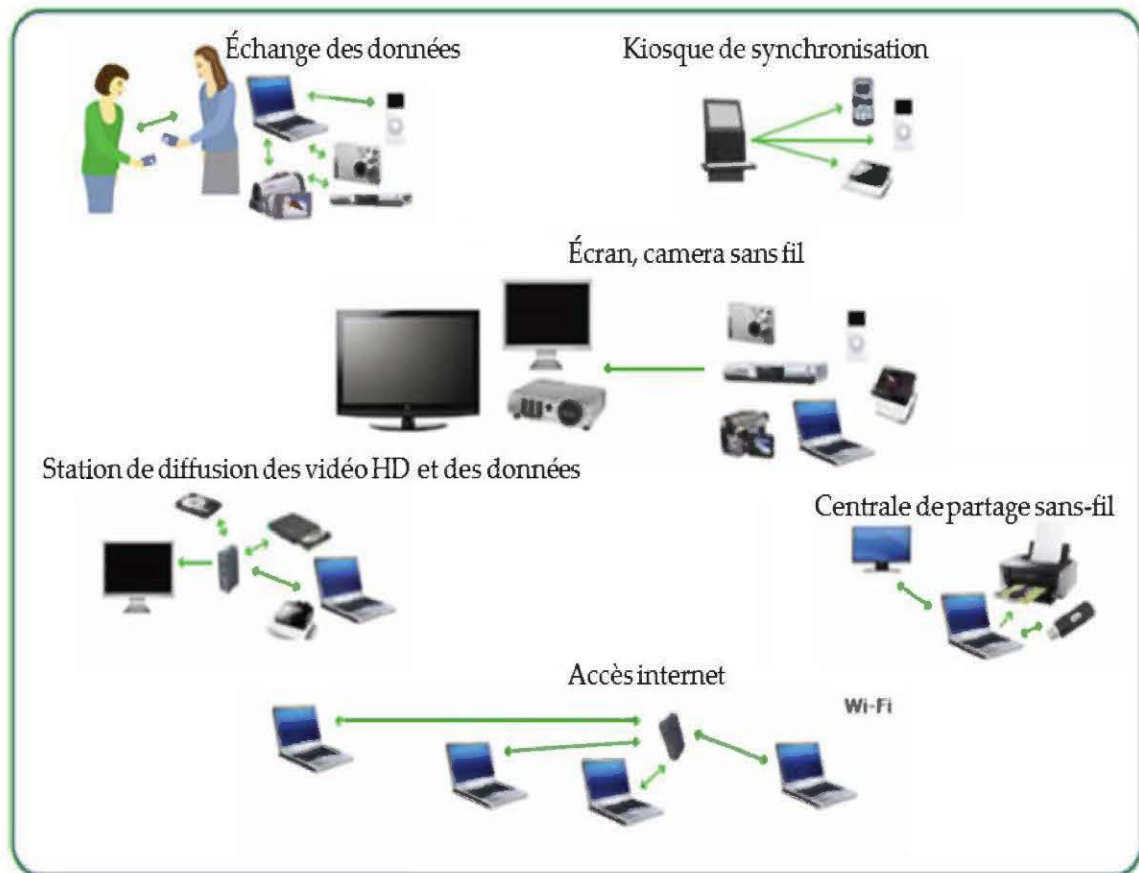
terminaux des utilisateurs qui sont, par ailleurs, difficiles à des fréquences inférieures, voire impossibles.

Le facteur de forme des systèmes à 60 GHz est environ 140 fois plus petit que les systèmes à 5 GHz, leur permettant, ainsi d'être facilement intégrés dans des dispositifs électroniques de commercialisation. Malgré les divers avantages des systèmes à 60 GHz, les communications basées sur cette technologie souffrent d'un certain nombre de problèmes qui doivent être résolus.

## 2.5 APPLICATIONS POTENTIELLES

Avec une largeur de bande allouée d'environ 7 GHz à travers le monde, la technologie à 60 GHz représente la solution pour de nombreuses applications nécessitant des transmissions à haut débit et ne pouvant être réalisées à des fréquences inférieures. Parmi les applications envisagées pour des environnements intérieurs, illustrées à la figure 2.3 :

- le remplacement du câble HDMI par la diffusion à haute définition sans fil qui permet aux utilisateurs d'afficher le contenu sur un écran à distance avec une qualité équivalente au câble;
- la réalisation d'un kiosque de synchronisation qui permet le transfert de plusieurs giga-octets de données en quelques secondes;
- la fabrication d'une station d'accueil sans fil permettant à plusieurs périphériques d'être connectés en même temps;
- le remplacement du câble Ethernet par le Gigabit-Ethernet sans fil obtenant ainsi un lien Ethernet multi-gigabit bidirectionnelle;
- le contrôle à distance des appareils de forage pour les environnements miniers afin d'améliorer la sécurité des travailleurs;
- la détection et localisation des travailleurs miniers en temps réel.



**Figure 2-3** Applications potentielles pour la technologie à 60 GHz.

## 2.6 CONCLUSION

Ce chapitre présente la technologie à 60 GHz afin de comprendre l'intérêt du passage en ondes millimétriques. Entre autres, on y trouve une définition de la technologie à 60 GHz, une comparaison avec d'autres technologies et les différentes applications potentielles.

La technologie à 60 GHz est dotée de différentes propriétés qui la rendent particulièrement intéressante pour les applications sans fil.

Bien que la technologie à 60 GHz permette la réalisation de plusieurs applications qui se sont révélés difficiles à des fréquences plus basses, la maîtrise du canal de propagation demeure indispensable pour une bonne conception des dispositifs sans fil à faible coût.

## CHAPITRE 3

### LE CANAL DE PROPAGATION

#### 3.1 INTRODUCTION

Les télécommunications sans fil connaissent un intérêt toujours soutenu depuis plusieurs décennies et ne cessent d'évoluer pour nous donner une meilleure qualité de service. Le canal de propagation est l'un des éléments clés de la chaîne de transmission.

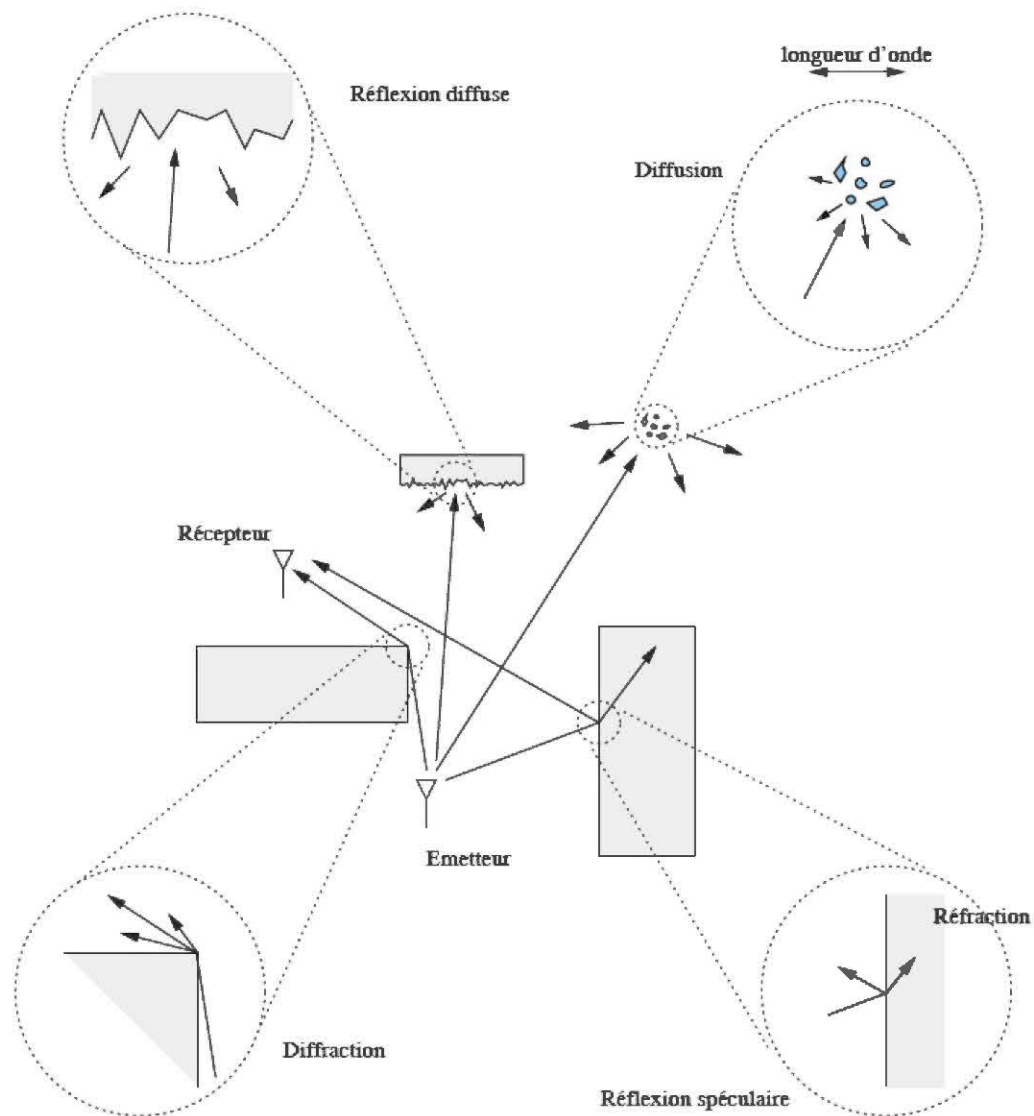
Le canal de propagation est le lien permettant le transfert d'informations d'un émetteur vers un récepteur. La connaissance précise du canal de propagation est indispensable à la conception optimale de systèmes de communications.

Les interactions du canal de propagation avec l'environnement provoquent différents phénomènes physiques qui se traduisent par une propagation par trajets multiples.

#### 3.2 LES PHÉNOMÈNES PHYSIQUES DE LA PROPAGATION

##### 3.3.1 *Les mécanismes de la propagation*

La réflexion, la réfraction, la diffraction, la diffusion et l'effet du guide d'ondes sont les principaux phénomènes physiques se produisant lors de la propagation d'une onde électromagnétique dans un environnement. [7]



**Figure 3-1** Les types d'interactions d'une onde électromagnétique avec le milieu. [8]

### *La réflexion :*

Il existe deux types de réflexions, spéculaire et diffuse, tel qu'illustré à la figure 3.1. Lorsque l'obstacle rencontré est de dimensions très supérieures à la longueur d'onde du signal, en plus d'avoir des irrégularités très petites par rapport à celle-ci, la

réflexion est dite spéculaire (du latin speculum -voulant dire miroir). Cependant, si l'obstacle rencontré présente des irrégularités aléatoires, l'onde subit une réflexion diffuse.

Idéalement, toute l'énergie incidente est réfléchi; cependant, une partie peut être absorbée par l'obstacle. Cela dépend de la nature de la surface de contact et de sa capacité d'absorption.

***La réfraction :***

Selon la nature de l'obstacle, l'onde incidente peut traverser la surface de contact et subir un affaiblissement de puissance, ce phénomène est appelé réfraction.

***La diffraction :***

La diffraction se produit lorsqu'une onde incidente rencontre un obstacle possédant des arêtes. Selon le principe de Huygens, chaque arête de l'obstacle se comporte comme une source secondaire, permettant ainsi au signal de se propager dans presque toutes les directions de l'espace. Ce phénomène démontre que la transmission peut avoir lieu, en l'absence de visibilité directe.

***Diffusion :***

Lorsque le chemin de la propagation est obstrué par un obstacle dont les dimensions sont du même ordre de grandeur ou inférieures à la longueur d'onde, une diffraction de l'onde incidente se produit.

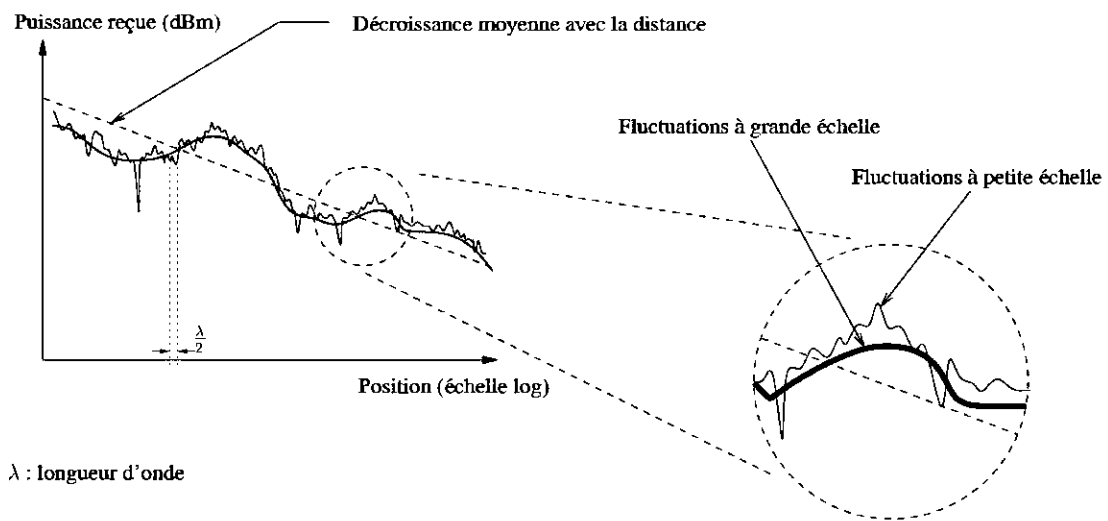
***Effet guide d'ondes :***

L'effet du guidage des ondes est un phénomène qui se produit dans des environnements dont la forme est similaire à un tunnel, un couloir ou une galerie.



Dans ce cas, l'onde se propage suivant la direction du milieu de la propagation en se réfléchissant successivement sur les parois parallèles de l'environnement.

La combinaison de ces divers phénomènes engendre une propagation par trajets multiples, provoquant, ainsi, des effets d'évanouissement. Il existe deux types d'évanouissement à grande et à petite échelle. La figure 3.2 représente la puissance reçue en fonction de la distance et illustre les types d'évanouissements.



**Figure 3-2** Fluctuations à petite et à grande échelles de la réponse du canal. [8]

### 3.3.2 Les fluctuations à grande échelle

Les évanouissements à grande échelle sont des fluctuations de la puissance moyenne du signal mesuré sur une distance suffisamment grande, entre 10 et 40 fois la longueur d'onde. Les deux phénomènes qui en résultent sont des effets d'ombrage et d'affaiblissement de parcours. [7]

L'évanouissement à grande échelle se caractérise par l'affaiblissement moyen de parcours  $PL$  et l'effet d'ombrage. Le  $PL$  désigne les pertes moyennes de la puissance du signal et dépend de la distance du lien.

L'ombrage est dû aux différents phénomènes physiques liés à la propagation des ondes et peut varier selon la nature de l'environnement où se produit la propagation de l'onde électromagnétique. Pour les ondes millimétriques, l'atténuation est d'autant plus importante. [8]

L'affaiblissement de parcours varie en fonction de la distance et décroît exponentiellement avec un facteur 2 en l'espace libre. Cependant, il varie en fonction du type de l'environnement dans lequel l'étude est effectuée. Les pertes pour l'espace libre dépendent également de la fréquence. En négligeant l'effet des antennes, les pertes peuvent se formuler ainsi [8]

$$A = \left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 \times d^\alpha \quad \text{avec} \quad \alpha = 2 \quad (3.1)$$

L'évanouissement à grande échelle  $F(d)$  peut être modélisé comme une combinaison de l'affaiblissement moyen de parcours  $PL_0(d)$  et de l'ombrage et s'écrit comme suit [9]

$$F(d) = PL_0(d_0) + 10 \times n \times \log(d/d_0) + \delta_\sigma \quad (3.2)$$

où l'affaiblissement de parcours pour l'espace libre à une distance de référence  $d_0 = 1$ ,  $PL_0(d_0)$  dépend de la fréquence, l'exposant de l'affaiblissement de parcours,  $n$  dépend de l'environnement et la déviation standard de l'ombrage,  $\delta_\sigma$ , dépend du système [9].

Le modèle de l'affaiblissement de parcours  $PL(d)$  de l'équation 3.2 est obtenu par la méthode de minimisation de l'erreur quadratique des données expérimentales. Cependant, le canal de propagation pour des environnements intérieurs est assez

complexe, ce qui rend l'utilisation du  $PL$  à la distance de référence  $d_0$  de l'espace libre inexacte dans certains cas. Ainsi, la droite du modèle de l'affaiblissement de parcours, définie dans la littérature, [9] est déduite par l'extraction des valeurs de la pente et de l'ordonnée directement des données expérimentales.

$$PL(d) = b + 10 \times n \times \log_{10}(d) \quad (3.3)$$

où  $b$  est l'ordonnée à l'origine et  $n$  est la pente en coordonnées semi-log.

Le principal avantage du modèle de l'affaiblissement de parcours de l'équation 3.3, est que le choix de la valeur de  $PL_0(d_0)$  n'est pas nécessaire; cependant, ce modèle ne permet pas d'étudier la dépendance fréquentielle.

### 3.3.3 *Les fluctuations à petite échelle*

L'évanouissement à petite échelle représente les fluctuations rapides de la puissance du signal reçu sur de courtes distances. L'évanouissement à petite échelle est causé par les signaux à trajets multiples qui arrivent au récepteur avec des phases aléatoires, provoquant ainsi des changements rapides de l'amplitude du signal sur une courte distance. L'évanouissement à petite échelle se caractérise par trois aspects du canal, soient la sélectivité en temps, la sélectivité en fréquence et la sélectivité spatiale.

La sélectivité en temps du canal est causée par l'effet Doppler. Le canal est considéré soit comme un canal à évanouissement rapide ou lent, en fonction de la rapidité avec laquelle les changements de canaux se produisent par rapport au débit de données.

La sélectivité en fréquence est due à la dispersion des temps d'arrivée des multi-trajets du signal d'émission dans le canal qui est considéré soit comme étant à

évanouissement plat ou sélectif en fréquence, en fonction de la taille et la largeur de la bande de cohérence du canal par rapport à la largeur de bande du signal appliqué.

La sélectivité spatiale du canal est causée par les trajets multiples provenant des différentes directions de l'espace et elle est, souvent, caractérisée par le spectre angulaire de puissance.

### 3.3 CARACTÉRISATION DU CANAL DE PROPAGATION

#### 3.3.1 *Caractérisation à grande échelle*

La caractérisation à grande échelle requiert la détermination de certains paramètres, principalement liés à l'affaiblissement de parcours. L'évanouissement du canal à grande échelle est, souvent, caractérisé par le modèle log-distance de l'affaiblissement de parcours. La formule de l'affaiblissement moyen de parcours  $PL$  en fonction de la distance  $d$  est donnée comme suit [2]

$$PL(d) = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |H(f_i, t_j, d)|^2 \right] \quad (3.4)$$

où  $H(f_i, t_j, d)$  est la réponse fréquentielle,  $N$  est le nombre de points de l'échantillonnage fréquentiel et  $M$  est le nombre de mesures prises pour chaque position.

L'affaiblissement de parcours en fonction de la distance peut être considéré comme une distribution aléatoire log-normale et s'exprime comme [2]

$$PL_{dB} = PL_{dB}(d_0) + 10 n \log(d/d_0) + \delta_{\sigma} \quad (3.5)$$

où  $PL_{dB}(d_0)$  est l'affaiblissement de parcours à une distance de référence  $d_0$ ,  $n$  est l'exposant de l'affaiblissement de parcours et  $\delta_\sigma$  est une variable aléatoire gaussienne, en dB, de moyenne nulle et d'écart type  $\sigma$ .

Le calcul de l'affaiblissement moyen de parcours, à partir des données expérimentales et l'utilisation la régression linéaire, permet d'extraire les différents paramètres de la droite en minimisant l'erreur quadratique moyenne.

### 3.3.2 Caractérisation à petite échelle

Les paramètres de dispersions temporelles étudiés sont l'étalement efficace, l'étalement moyen et l'étalement maximal des retards, ainsi que la bande de cohérence. Le paramètre le plus utilisé pour décrire le comportement des trajets multiples est l'étalement efficace (RMS) des retards (*RMS : Root Mean Square*). Ce paramètre détermine la sélectivité fréquentielle du canal et estime le débit de données maximal que le canal peut transmettre. Mathématiquement, c'est le second moment de la densité de probabilité et il est donné par [2]

$$\tau_{RMS} = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\bar{\tau})^2} \quad (3.6)$$

$\overline{\tau^2}$  est la puissance moyenne et  $(\bar{\tau})^2$  est l'étalement moyen des retards.

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k (a_k^2 \times \tau_k)}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \times \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (3.7)$$

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_k (a_k^2 \times \tau_k^2)}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \times \tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (3.8)$$

où  $a_k$  est l'amplitude,  $P(\tau_k)$  est la puissance et  $\tau_k$  est le temps d'arrivée du  $k^{\text{ième}}$  trajet.

La détermination des paramètres temporels se fait à partir de la réponse impulsionnelle du canal qui est obtenue en appliquant la transformation de Fourier inverse  $FFT^{-1}$  sur la réponse en fréquence du canal. Mais avant, un fenêtrage est appliqué sur les données du domaine des fréquences en utilisant une fenêtre de Kaiser ( $\alpha = 6$ ). Le fenêtrage permet la réduction des lobes secondaires dans la réponse impulsionnelle du canal et l'élargissement du lobe principal. Un seuil de 30 dB en dessous du niveau de la composante la plus élevée des trajets multiples, est choisi pour calculer l'étalement efficace des retards  $RMS$ .

La bande de cohérence est définie comme la gamme de fréquences où le canal est considéré comme stable. La bande de cohérence est étroitement liée à l'étalement efficace des retards; cette relation est inversement proportionnelle et elle est donnée par:

$$B_{cohérence} = \frac{1}{a \times \tau_{RMS}} \quad (3.9)$$

Pour ce travail de recherche,  $a$  vaut 5, ce qui correspond à 50 pour cent de la bande de cohérence.

### 3.4 CONCLUSION

Ce chapitre présente les généralités du canal de propagation, notamment, les phénomènes physiques liés à la propagation des ondes électromagnétiques. La combinaison de ces divers phénomènes provoque des effets d'évanouissement, à grande et à petite échelle.

La caractérisation du canal, telle que décrite dans la littérature, [2] [3] est, aussi, présentée. La caractérisation à grande et à petite échelle nécessite la détermination de

certaines paramètres, tels que l'affaiblissement de parcours et les paramètres de dispersions temporelles.

Pour une étude théorique plus approfondie du canal de propagation, plusieurs travaux, tels que, [9] [1] sont disponibles dans la littérature.

# CHAPITRE 4

## CAMPAGNES DE MESURES À 60 GHz

### 4.1 INTRODUCTION

L'objectif de ce travail de recherche est la caractérisation du canal de propagation dans un environnement minier afin de connaître et comprendre la propagation dans ce type d'environnements. Pour mener à bien ce travail, différentes campagnes de mesure ont été effectuées.

Les résultats présentés, dans ce mémoire, sont obtenus à partir de campagnes de mesure effectuées dans un environnement minier souterrain sur une gamme de fréquences allant de 59 GHz à 61 GHz. Les mesures ont été effectuées selon plusieurs scénarios : au milieu de la galerie et à proximité des parois, dans deux galeries différentes et en utilisant deux types d'antennes, directionnelles et omnidirectionnelles.

Ce chapitre est organisé comme suit; à la section 2, l'environnement minier est décrit, à la section 3, le système et le protocole de mesure sont présentés. Finalement, les différents scénarios de mesures sont définis à la section 4.

### 4.2 ENVIRONNEMENT DE MESURE

La mine expérimentale de CANMET à Val d'or en Abitibi-Témiscamingue est un environnement hostile. Les chercheurs du LRTCS y effectuent différentes campagnes de mesures. Ancienne mine d'or, la mine CANMET servait, jusqu'à



récemment, à former une nouvelle génération de mineurs, en plus de son engagement envers le LRTCS. [10]

Les conditions de sécurité font de cette mine un environnement minier idéal et sécuritaire pour diverses campagnes de mesures liées à la propagation.

La mine CANMET est composée de plusieurs galeries rocailleuses, chaque galerie est dotée de fortes rugosités et irrégularités des parois. De plus, le sol est généralement mouillé et inégal, ce qui rend la circulation et la prise de mesures plus difficiles.

Les mesures ont été prises dans deux galeries différentes, au niveau 40 et 70 mètres sous terre. La galerie au niveau 40, montré à la figure 4.1, est d'environ 3.8 mètres de large et 3.9 mètres de haut. Le plafond et les murs présentent de nombreuses irrégularités mais le sol est totalement sec, ce qui facilite le travail pour la prise de mesures.



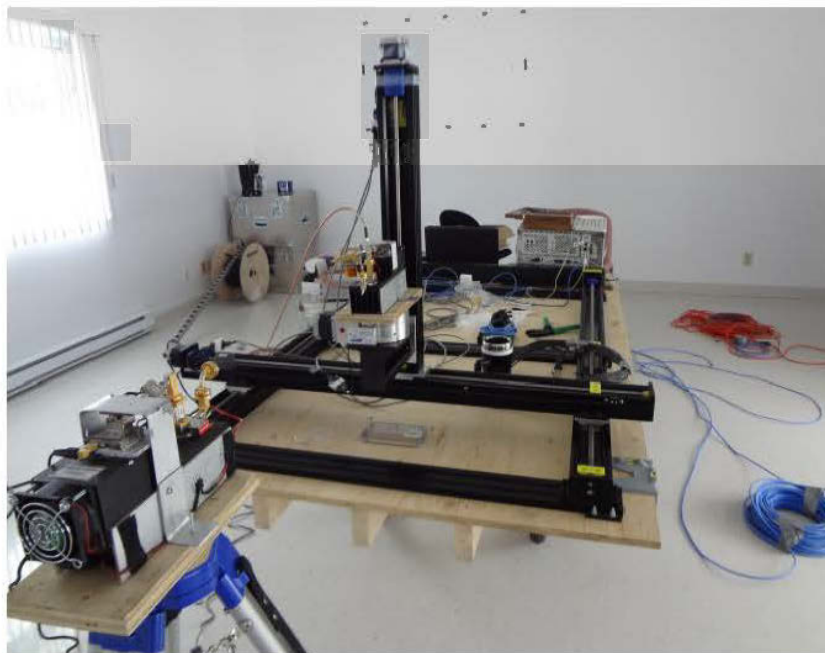
**Figure 4-1** Niveau 40m.



**Figure 4-2** Niveau 70m.

La galerie au niveau 70 est d'environ 2.8 mètres de large et 2.2 mètres de haut, comme le montre la figure 4.2. Le sol du niveau 70 comporte plusieurs flaques d'eau, contrairement au niveau 40, ce qui rend les manipulations et la ligne de vue d'autant plus difficiles.

En plus des mesures effectuées sous terre, une campagne de mesure au laboratoire de la mine CANMET a été réalisée. Le laboratoire de la mine CANMET est situé à la surface, il est de 4 mètres de large, 8 mètres de long et 4 mètres de haut, comme le montre la figure 4.3. Les mesures obtenues au laboratoire CANMET représentent un supplément pour d'éventuelles comparaisons.



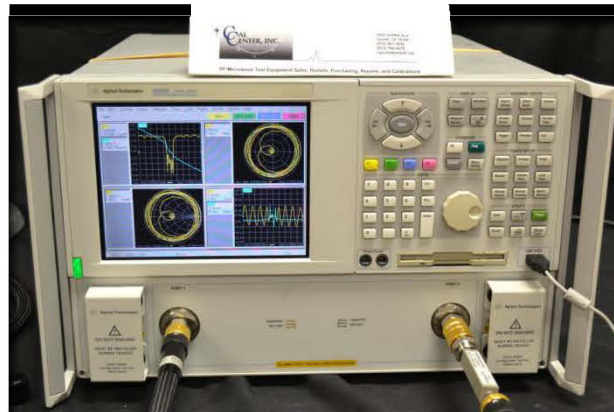
**Figure 4-3** Laboratoire CANMET.

## 4.3 TECHNIQUE DE MESURE

### 4.3.1 *Système de mesure*

La technique de mesure utilisée est basée sur le sondage par balayage fréquentiel du canal. [11] Cette technique permet de récupérer le paramètre  $S_{21}$  de la matrice de répartition (*scattering parameter*) à travers un analyseur de réseau vectoriel (VNA) de type Agilent E8363B, illustré à la figure 4.4.

Le VNA est utilisé pour mesurer la réponse complexe en fréquences du canal et il est capable de mesurer des fréquences allant de 10 MHz jusqu'à 40 GHz. Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser le principe de la conversion pour mesurer des fréquences de 60 GHz.



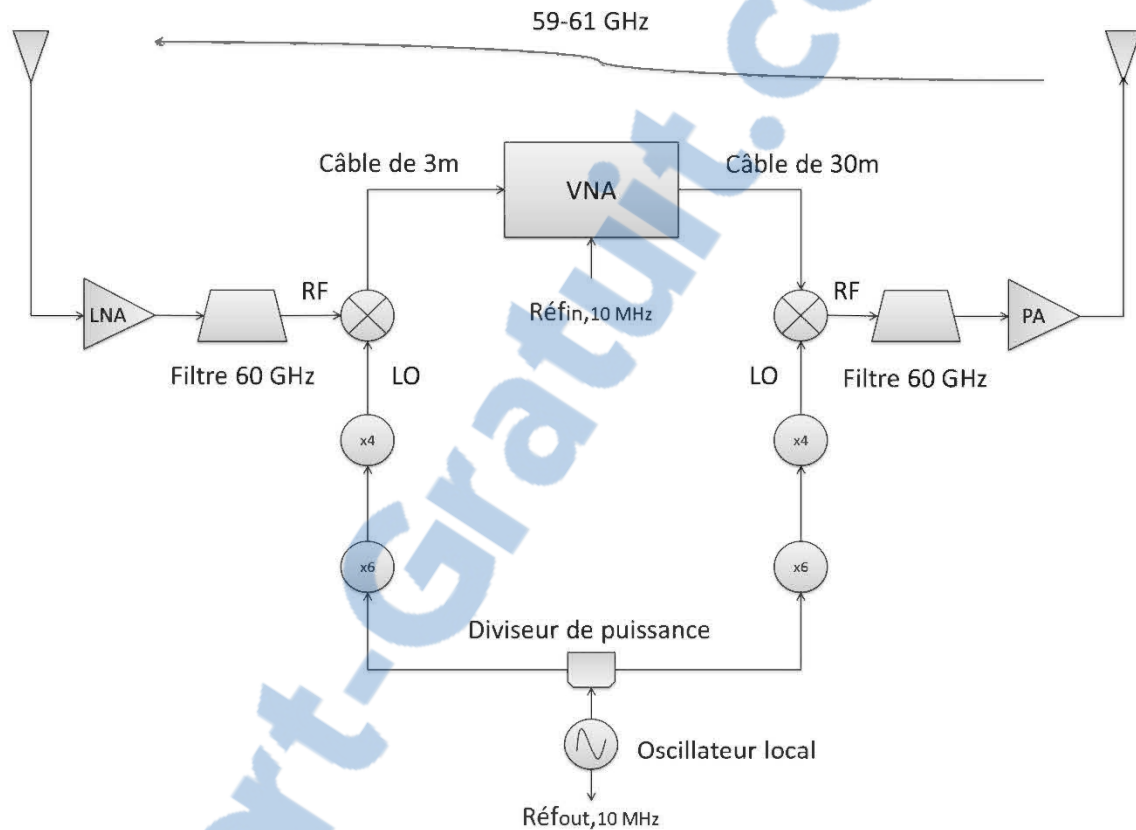
**Figure 4-4** Agilent E8363B.

Le VNA balaye 6401 valeurs discrètes en fréquences comprises entre 5 et 7 GHz correspondant aux fréquences allant de 59 à 61 GHz, avec une résolution fréquentielle de 0.97 MHz. En raison de la résolution 0.97 MHz, le délai maximum est de 1.03  $\mu$ s et la longueur maximale est de 309 m, ce qui est largement suffisant pour 5 m, la distance maximale qui sépare l'émetteur du récepteur.

Le VNA a deux accès (ports); le port de sortie, port 1, est relié à l'entrée du convertisseur à 60 GHz (CMB646405 CERNEX) de l'émetteur par un câble coaxial de 30 m de faible atténuation, 0,1 dB/m de 1 à 3 GHz. Enfin, la sortie du mélangeur est reliée à une antenne à 60 GHz pour transmettre des fréquences entre 59 et 61 GHz. Un filtre et un amplificateur de puissance à 60 GHz, CBM50751507-01, sont placés entre le mélangeur et l'antenne.

À la réception, le signal reçu passe par un amplificateur à faible bruit et un filtre à 60 GHz puis il est mélangé avec le signal de 54 GHz pour obtenir une sortie allant de 5 GHz à 7 GHz. La sortie du mélangeur est reliée à l'entrée (port 2) du VNA par un câble coaxial de 3m ayant une faible atténuation, 0,1 dB/m, de 1 à 3 GHz. L'oscillateur local et le VNA sont synchronisés par une horloge référence de 10 MHz. La figure 4.5 illustre le schéma du système expérimental. Pour plus de détails

concernant le système de mesure et sa conception, le travail de recherche de monsieur Anwar El RAFEI est disponible dans la littérature. [16]



**Figure 4-5** Schéma bloc du système de mesure.

À 60 GHz, la longueur d'onde est de 5 mm, donc le système de positionnement VELMEX [12] est utilisé pour avoir une localisation précise de l'antenne de réception lors du déplacement, tel qu'indiqué à la figure 4.6.

Deux types d'antennes sont utilisés lors des différents scénarios de mesure, une antenne directionnelle et une omnidirectionnelle. L'antenne directionnelle utilisée, Cernex CRA [ANNEXE A], est de type cornet, CRA15507520. Elle opère dans une gamme de fréquences allant de 50 à 75 GHz et son gain est de 20 dB.



L'antenne omnidirectionnelle utilisée est de type Millitech ODA-15. [ANNEXE A] Cette antenne fournit un gain de 2 dB dans sa bande de fréquence opérationnelle qui va de 57 à 63 GHz.



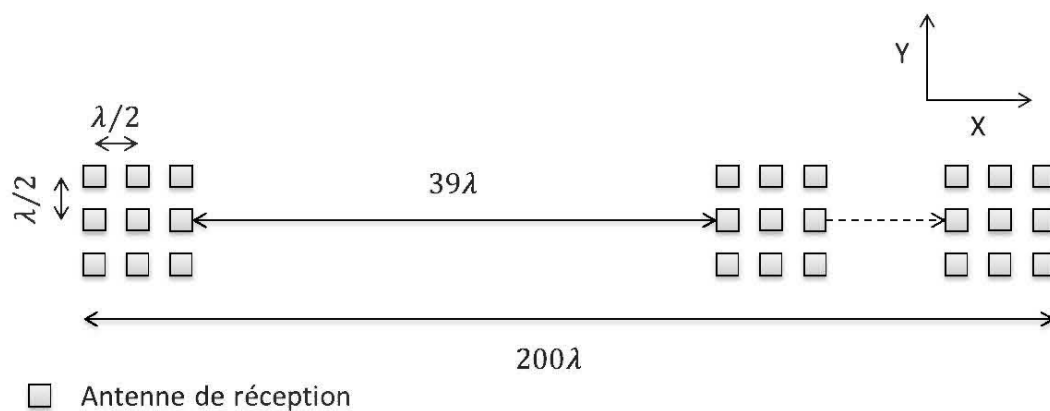
Figure 4-6 Système de positionnement VELMEX.

#### 4.3.2 Protocole de mesure

Les mesures sont effectuées en maintenant l'émetteur fixe et en déplaçant le récepteur sur les deux axes  $x$  et  $y$ . À chaque position, une grille spéciale de  $3 \times 3$  est appliquée pour avoir neuf emplacements différents autour de la position nominale. [14] Les neuf points sont espacés de 2.5 mm, correspondant à la moitié de la longueur d'onde afin d'éviter la corrélation entre les signaux.

Pour le déplacement à grande échelle, un espacement de 20 cm est appliqué entre deux positions nominales, correspondant à 40 fois la longueur d'onde.

La figure 4.7 représente le protocole de mesure effectué lors des différentes campagnes de mesure.



**Figure 4-7** Protocole de mesure.

À chaque position, la fonction de transfert du canal,  $S_{21}$ , est mesurée 15 fois afin de réduire l'effet du bruit aléatoire. Toutes ces mesures sont transférées et stockées dans un ordinateur via un port Ethernet.

Un faisceau laser a été utilisé pour fixer la hauteur des antennes à 1.25 mètre du sol horizontal. Durant toutes les campagnes de mesures, le canal est supposé stationnaire car il n'y a ni mouvements ni personnes dans les galeries. Les différents paramètres liés à la technique de mesure sont résumés dans le tableau 4.1.

**Tableau 4-1** Paramètres de mesure.

Paramètres	Valeurs
Largeur de bande	2 GHz
Fréquence centrale	60 GHz
Nombre de points d'échantillonnage	6401
Résolution fréquentielle	0.97 MHz
Résolution temporelle	1.0309 us
Hauteur des antennes	1.25 m
Distance de référence	0.5 m

#### 4.4 DIFFÉRENTS SCENARIOS DE MESURE

##### 5.2.4 *Scenario I*

Cette série de mesures a été effectuée au niveau 70 mètres et ce fut la première campagne de mesure de ce travail de recherche. La figure 4.8 représente le plan de la mine et les différentes positions prises au niveau 70 mètres. Les mesures ont été réalisées sur 5 mètres en ligne de vue directe en se positionnant, toujours au milieu de la galerie, illustré par la lettre A sur la figure 4.8. Les antennes utilisées au transmetteur et au récepteur sont directionnelles, leurs caractéristiques ont été énoncées plus haut, à la section 4.3.1. Aussi, des mesures longeant le mur droit de la galerie 70 mètres ont été effectuées pour observer l'effet de la position sur la propagation à 60 GHz; cet emplacement est illustré par la lettre B sur la figure 4.8.



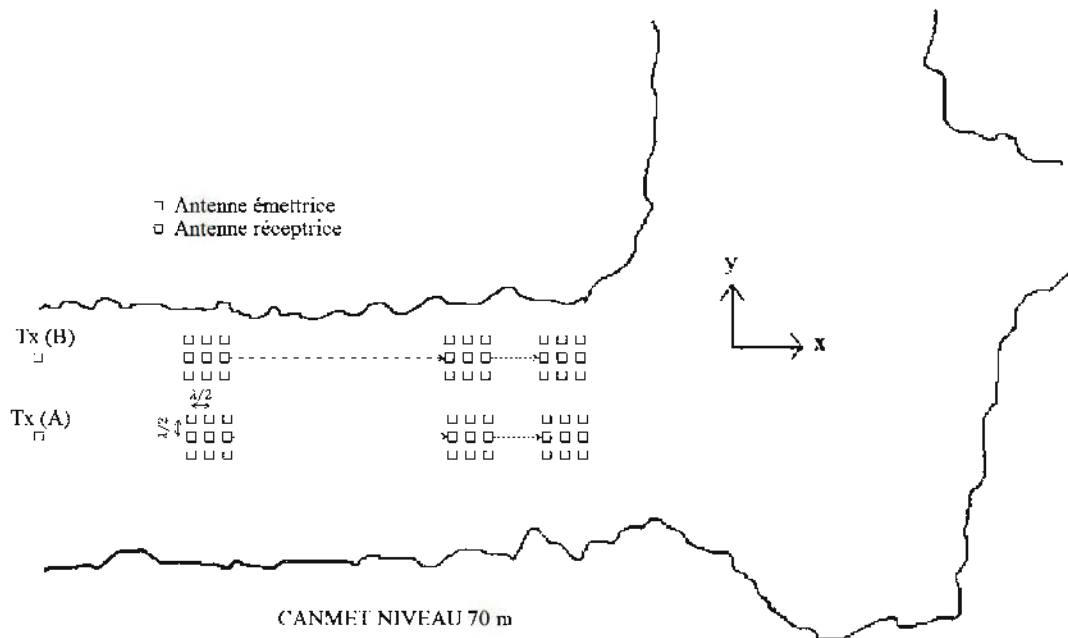


Figure 4-8 Les différentes positions au niveau 70 mètres.

### 5.2.5 Scenario II

Cette campagne de mesure a été effectuée dans la galerie 40 mètres et a pour but d'étudier l'effet de l'utilisation de différentes configurations d'antennes sur la propagation à 60 GHz. Autrement dit, ce scénario permet d'étudier l'effet de la directivité sur les différents paramètres de propagation à 60 GHz dans un environnement minier souterrain. Les mesures ont été prises sur 5 mètres en ligne de vue directe en positionnant, toujours, le transmetteur et le récepteur au milieu de la galerie. Le tableau II résume toutes les combinaisons d'antennes utilisées.

**Tableau 4-2** Les différentes combinaisons d'antennes au niveau 40m.

Combinaisons	Bande de Fréquence (Ghz)	Antennes		
		Tx	Rx	Hauteur (m)
DD	59-61	Directionnelle	Directionnelle	1.25-1.25
DO		Directionnelle	Omnidirectionnelle	

### 5.2.6 Scenario III

Dans cette partie, les mesures ont été prises dans le laboratoire de la mine CANMET, situé à la surface. Cette campagne permet d'avoir des mesures supplémentaires pouvant servir à d'éventuelles comparaisons avec la mine. Ces mesures ont été prises avec des antennes directionnelles à la transmission et à la réception avec la même hauteur par rapport au sol que les précédentes campagnes de mesure.

## 4.5 CONCLUSION

Ce chapitre permet de présenter tous les éléments qui sont en relation avec les différentes campagnes de mesures. Ceci afin de mieux interpréter les résultats obtenus.

Les galeries minières, ainsi que le laboratoire de la mine expérimentale de CANMET, sont décrits. La technique de mesure est, succinctement, présentée. Le système de mesure, ainsi que son principe de fonctionnement, sont définis. Le protocole de mesure, suivi lors des différentes campagnes de mesures effectuées dans les galeries des niveaux 70 et 40, ainsi qu'au laboratoire, est présenté. Enfin, les différents scénarios de mesures, permettant d'étudier l'effet de l'emplacement ainsi que la directivité des antennes sur la propagation, sont énoncés.

La connaissance du déroulement des différentes campagnes de mesures permet une bonne analyse des résultats en tenant compte de tous les aspects de la prise de mesure.

# CHAPITRE 5

## ANALYSE DES RÉSULTATS

### 5.1 INTRODUCTION

L'objectif de l'analyse des résultats est la caractérisation, à grande et à petite échelle, du canal de propagation à 60 GHz. Cette partie permet d'extraire les paramètres du canal afin de se familiariser et de vulgariser la propagation à 60 GHz dans des environnements miniers souterrains.

### 5.2 À GRANDE ÉCHELLE

La caractérisation à grande échelle est principalement liée à l'affaiblissement de parcours, autrement dit, à l'exposant de l'affaiblissement de parcours. La formule de l'affaiblissement moyen de parcours  $PL$ , en dB, en fonction de la distance  $d$ , en mètres, est donnée par [2]

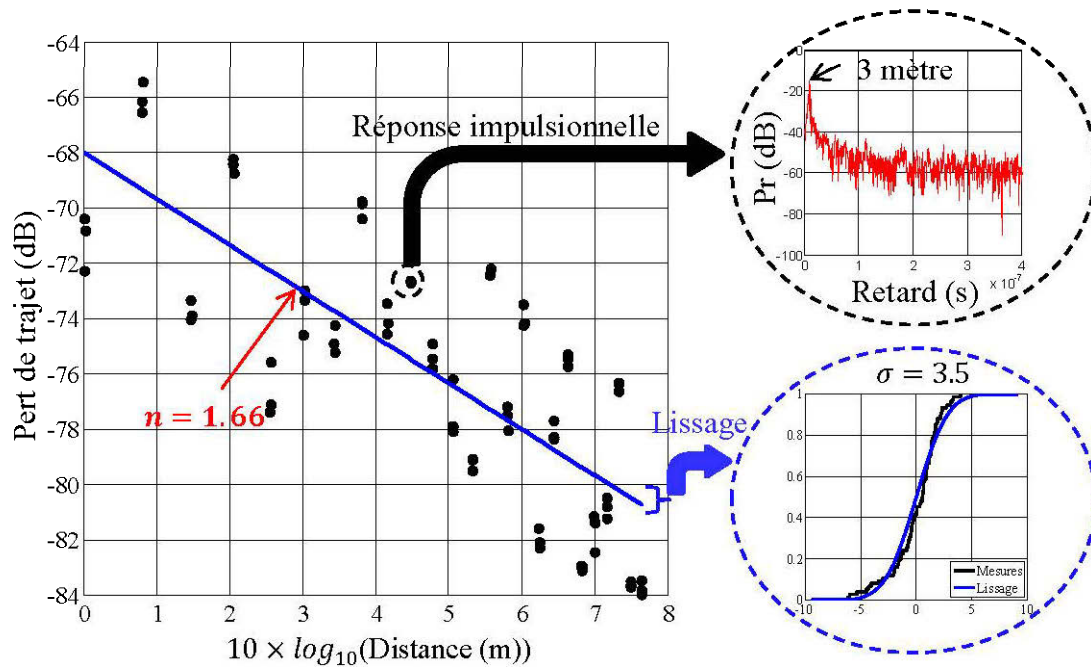
$$PL_{dB}(d) = 10 \times \log_{10} \left[ \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |H(f_i, t_j, d)|^2 \right] \quad (5.1)$$

où  $H(f_i, t_j, d)$  est la réponse fréquentielle,  $N$  est le nombre de points d'échantillonnage fréquentiel et qui représente, dans notre cas, 6401 valeurs discrètes de fréquences sur la bande allant de 59 GHz à 61 GHz et  $M$  est le nombre de mesures prises pour chaque position et qui est de 15 mesures/position.

#### 5.3.4 *Scenario I*

Pour le scenario I, les mesures ont été prises dans la galerie au niveau 70 mètres, en utilisant des antennes directionnelles, au milieu de la galerie et à proximité du mur

droit pour observer l'effet du positionnement sur la propagation à 60 GHz. Les mesures ont été enregistrées dans le domaine fréquentiel.



**Figure 5-1** L'affaiblissement de parcours en fonction de la distance pour l'emplacement A.

Les résultats de l'affaiblissement de parcours, en dB, en fonction de la distance entre le transmetteur et le récepteur, en mètre, pour les deux emplacements sont présentés par la figure 5.1 et la figure 5.2.

Les différentes valeurs obtenues du  $n$  et de l'écart-type de la variable aléatoire gaussienne sont indiquées dans le tableau 5.1.

**Tableau 5-1** Les valeurs du  $n$  et de l'écart-type pour les deux emplacements.

Emplacement	A	B
$n$	1.66	1.49
Ecart-type $\sigma$	3.5	2.2

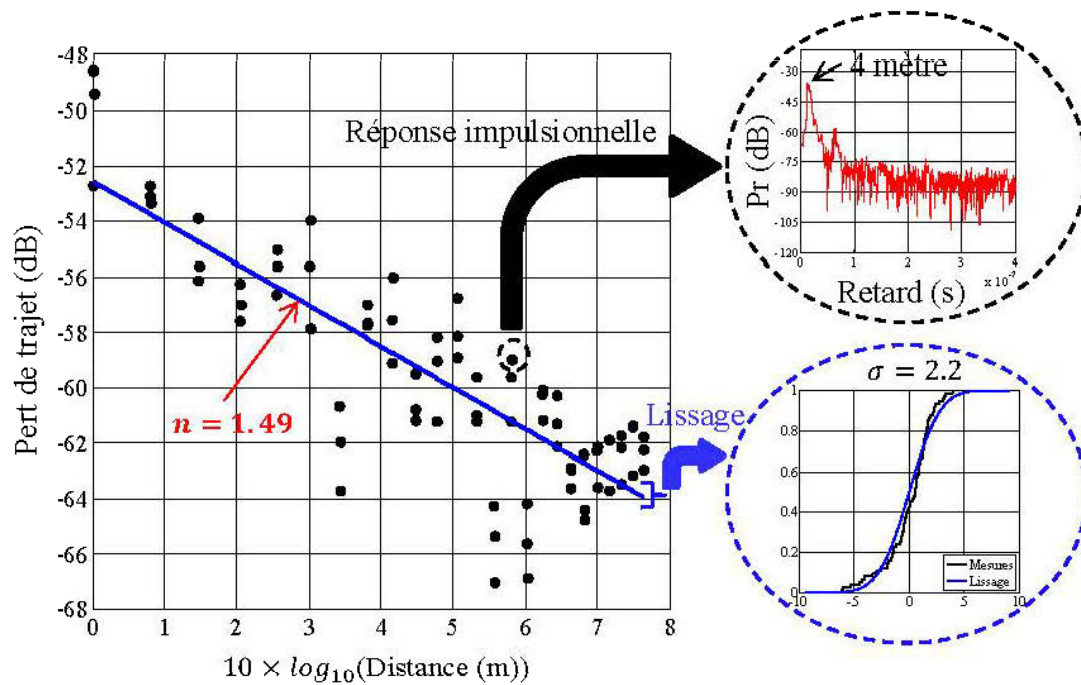


Figure 5-2 L'affaiblissement de parcours en fonction de la distance pour l'emplacement B.

L'exposant de l'affaiblissement de parcours au milieu d'une galerie d'un environnement minier souterrain, en utilisant des antennes directionnelles, est de 1.66. Ceci correspond aux résultats disponibles dans la littérature. [13-15] Le  $n$  obtenu est inférieur à l'exposant de l'affaiblissement de parcours de l'espace libre qui est de 2 à cause de l'accumulation de l'énergie des trajets multiples, contrairement au seul trajet de la ligne de vue pour l'espace libre. Cependant, l'exposant de l'affaiblissement de parcours de l'environnement minier pour des antennes directionnelles est, quand même, proche de celui de l'espace libre car une antenne directionnelle à l'émission limite l'énergie rayonnée à un cône étroit, ce qui entraîne moins de composantes par trajets multiples à la réception. De plus, l'utilisation d'une antenne directionnelle à la réception permet d'avoir un certain filtrage spatial, donc, une résistance aux trajets multiples offrant une meilleure stabilité des valeurs de l'affaiblissement de parcours.

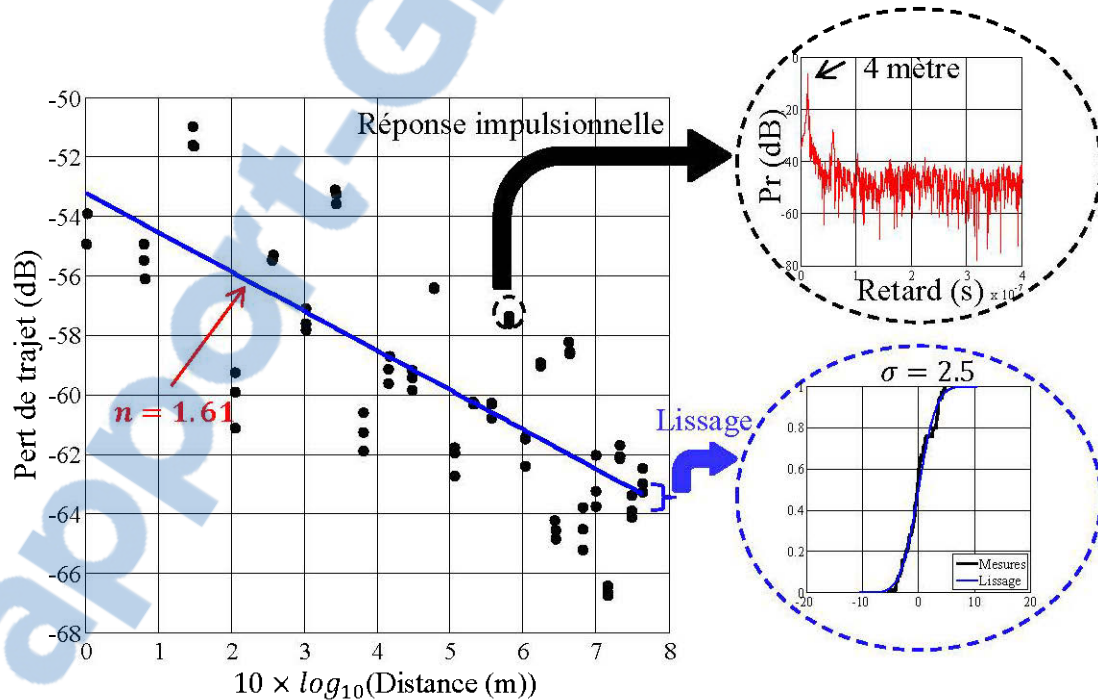
De plus, l'exposant de l'affaiblissement de parcours d'une galerie d'un environnement minier souterrain montre une diminution quand la propagation se fait à proximité du mur droit. Cela peut être expliqué par l'augmentation des composantes

par trajets multiples du fait qu'on s'est rapproché du mur car il faut noter que la rugosité du mur et ses nombreuses irrégularités ne font qu'augmenter les réflexions et diffractions en causant une nette augmentation de trajets multiples. Autrement dit, l'irrégularité du mur a un effet significatif sur l'énergie totale reçue.

### 5.3.5 Scenario II

Les mesures prises au niveau 40 mètres ont pour but de montrer l'effet des antennes sur la propagation à 60 GHz. Les mesures ont été prises au milieu de la galerie pour supprimer l'effet de l'emplacement.

Les résultats de l'affaiblissement de parcours, en dB, en fonction de la distance entre le transmetteur et le récepteur, en mètre, pour les deux combinaisons d'antennes sont présentés par la figure 5.3 et la figure 5.4.

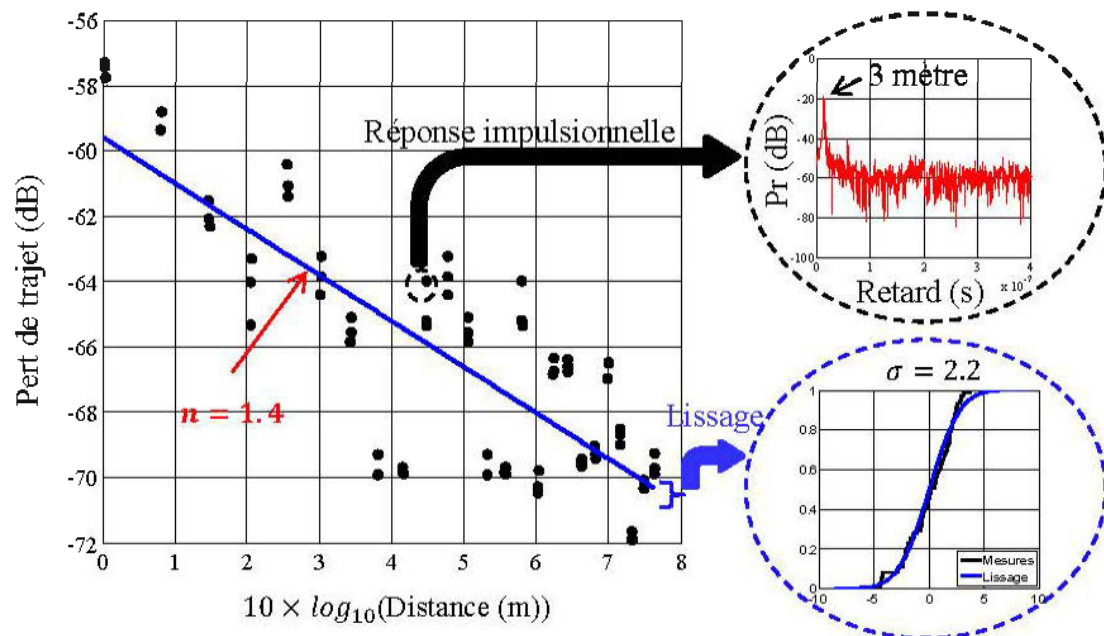


**Figure 5-3** L'affaiblissement de parcours en fonction de la distance pour les combinaisons DD.

Les différentes valeurs obtenues du  $n$  et de l'écart-type de la variable aléatoire gaussienne sont indiquées dans le tableau 5.2.

**Tableau 5-2** Les valeurs du  $n$  et de l'écart-type pour les deux combinaisons.

Configuration	DD	DO
$n$	1.61	1.4
Ecart-type $\sigma$	2.5	2.2



**Figure 5-4** L'affaiblissement de parcours en fonction de la distance pour les combinaisons DO.

On remarque que la valeur de l'exposant de l'affaiblissement pour la configuration DD, au niveau 40 mètres est similaire à celle trouvée au niveau 70 mètres. Cela est, principalement, dû à la ressemblance des galeries 40 et 70. [13-15] Cependant, en remplaçant l'antenne directionnelle par une antenne omnidirectionnelle à la réception, l'exposant de l'affaiblissement de parcours diminue, ceci en gardant le même emplacement que pour la configuration DD. Cela est, essentiellement dû à la capacité de l'antenne omnidirectionnelle à recevoir les signaux par trajets multiples arrivant des 360 degrés. L'antenne omnidirectionnelle permet de coupler plus de composantes par trajets multiples qu'une antenne directionnelle. L'utilisation d'une antenne directionnelle à la réception permet une



meilleure stabilité des valeurs de l'affaiblissement de parcours grâce à son filtrage spatial. Contrairement aux antennes directionnelles, les antennes omnidirectionnelles sont plus sensibles aux effets de la propagation par trajets multiples et il en résulte plus d'accumulation de l'énergie par trajets multiples.

### 5.3.6 Scenario III

Les mesures ont été prises au laboratoire de la mine CANMET, situé à la surface, en utilisant des antennes directionnelles. Les résultats de l'affaiblissement de parcours, en dB, en fonction de la distance entre le transmetteur et le récepteur, en mètre, pour le laboratoire de la mine CANMET, sont présentés à la figure 5.5.

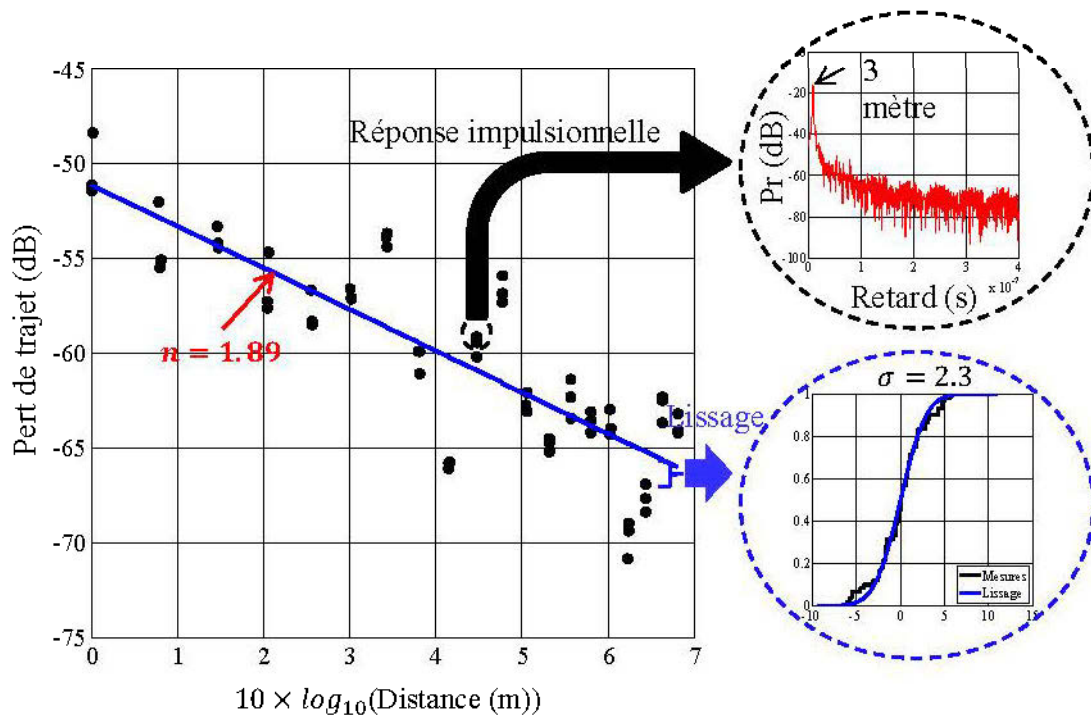


Figure 5-5 L'affaiblissement de parcours en fonction de la distance pour le laboratoire.

L'exposant de l'affaiblissement obtenu pour le laboratoire est de 1.89. Cette valeur est supérieure à celle trouvée dans les deux galeries minières pour la même combinaison d'antennes. Cela est, forcément, dû aux nombre inférieur de composantes par trajets multiples existants dans le laboratoire. Il faut noter que le

laboratoire est plus large que les deux galeries et que les murs ne présentent aucune irrégularité. Par conséquent, il y a beaucoup moins de réflexions par rapport aux galeries minières. De plus, l'exposant de l'affaiblissement du laboratoire est, légèrement, inférieur à celui de l'espace libre à cause des quelques composantes par trajets multiples dues aux fenêtres, poignées de portes et équipements métalliques, ceci est en accord avec [13].

### 5.3 À PETITE ÉCHELLE

Les paramètres de dispersions temporelles étudiés sont l'étalement efficace, l'étalement moyen et l'étalement maximal des retards, ainsi que la bande de cohérence.

#### 5.3.1 Scénario I

La figure 5.6 représente l'étalement efficace des retards en fonction de la distance pour les deux emplacements dans la galerie.

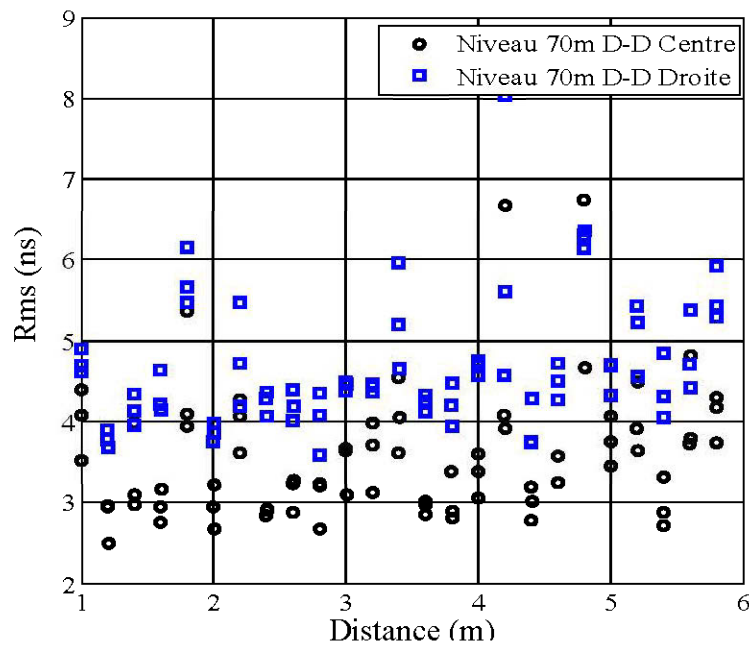


Figure 5-6 L'étalement efficace des retards en fonction de la distance pour les emplacements A et B.

Le tableau 5.3 résume tous les résultats des paramètres de dispersions temporels obtenus à partir de mesures réalisées au niveau 70.

A partir de la figure 5.6 et du tableau 5.3, nous pouvons constater que l'étalement efficace des retards à proximité du mur de la galerie augmente nettement, d'environ 1 ns, par rapport à l'étalement efficace des retards au milieu de la galerie.

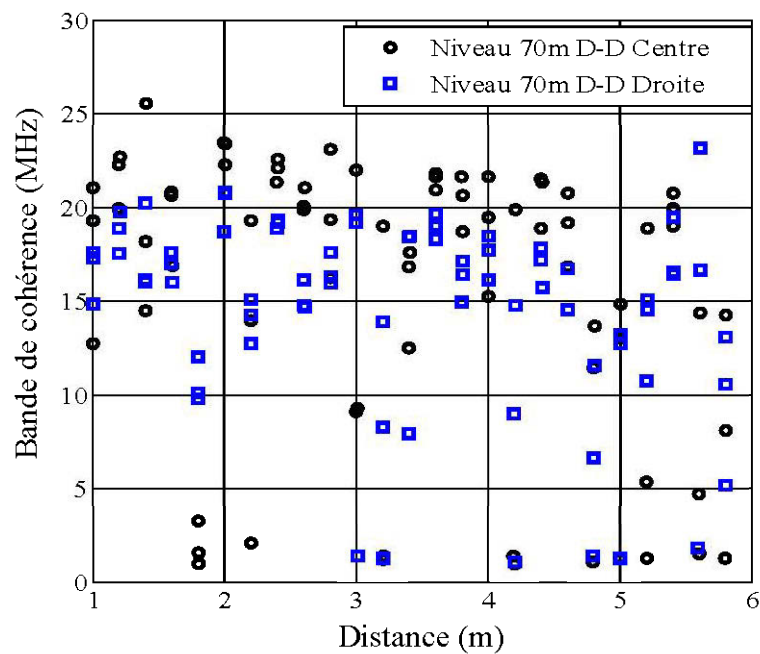
**Tableau 5-3** Les paramètres de dispersion scenario I.

Emplacement	Paramètres	$\tau_{RMS}$ (ns)	$\tau_{max}$ (ns)
A	Valeur moyenne	3.6	48.43
	Ecart-type	0.84	0.62
	Valeur maximale	6.74	49.47
B	Valeur moyenne	4.65	59.53
	Ecart-type	0.76	10.91
	Valeur maximale	8.03	131.93

Cela est dû à la quantité de l'énergie capturée qui est plus élevée au milieu de la galerie et arrive avec moins de dispersion, contrairement à la forte dispersion à proximité du mur qui est due aux nombreuses réflexions et diffractions.

La figure 5.6 montre les bandes de cohérence, à 90 %, du canal de propagation pour les deux emplacements. La bande de cohérence est obtenue par la relation 3.6.

Il existe, donc, une relation inversement proportionnelle entre la bande de cohérence et l'étalement efficace des retards. En effet, on constate que pour le milieu de la galerie, la bande de cohérence est un peu plus élevée qu'à proximité du mur car l'étalement efficace des retards près du mur est à peine plus élevé qu'au milieu de la galerie.



**Figure 5-7** La bande de cohérence en fonction de la distance pour les emplacements A et B.

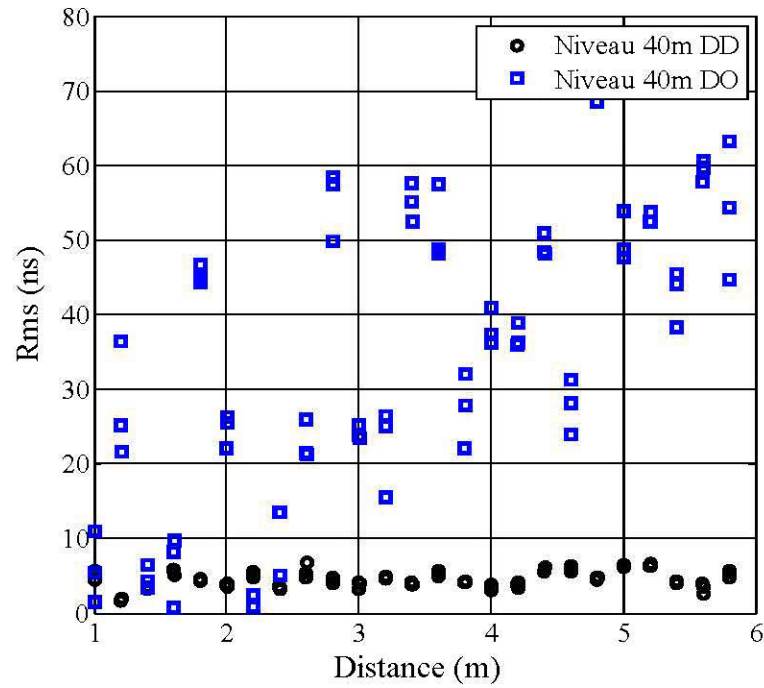
### 5.3.2 Scénario II

La figure 5.8 représente l'étalement efficace des retards en fonction de la distance pour les deux configurations d'antennes.

Pour la configuration DD, l'étalement efficace des retards varie entre 3 et 6 ns. Ceci est en accord avec les résultats rapportés dans [13], où il est indiqué que l'étalement efficace des retards varie, généralement, entre 1 et 8 ns pour des environnements similaires

Pour la configuration DO, l'étalement efficace des retards va de 1 à 70 ns. Ceci démontre une nette augmentation des délais des trajets multiples.

Nous notons, donc, que lorsque l'antenne directionnelle est utilisée, l'étalement efficace des retards diminue et cela est dû à la directivité du faisceau qui limite les composantes des trajets multiples reçus. Par conséquent, lors de l'utilisation d'antennes directionnelles, il y a plus d'énergie capturée avec moins de dispersion.



**Figure 5-8** L'étalement efficace des retards en fonction de la distance pour les combinaisons DD et DO.

Le tableau 5.4 résume tous les résultats des paramètres de dispersions temporels obtenus à partir de mesures effectuées au niveau 40.

**Tableau 5-4** Les paramètres de dispersion scenario II.

Configuration	Paramètres	$\tau_{RMS}$ (ns)	$\tau_{max}$ (ns)
DD	Valeur moyenne	4.53	46.51
	Ecart-type	1.14	0.94
	Valeur maximale	6.85	47.99
DO	Valeur moyenne	34.62	226.36
	Ecart-type	19.5	62.98
	Valeur maximale	70.28	255.37

Le tableau 5.4 montre que la combinaison DD permet de réduire la valeur moyenne de l'étalement efficace des retards à 4 ns. Cela confirme que les antennes



### 5.3.3 Scénario III

Dans un environnement souterrain minier, la présence de composantes par trajets multiples est, considérablement, plus importante en raison des réflexions, réfractions et diffusions dus au sol et aux surfaces rugueuses des galeries. Les trajets arrivant avec différents retards peuvent provoquer des interférences inter symboles, ISI.

La figure 5.10 représente l'étalement efficace des retards en fonction de la distance pour le laboratoire de la mine CANMET.

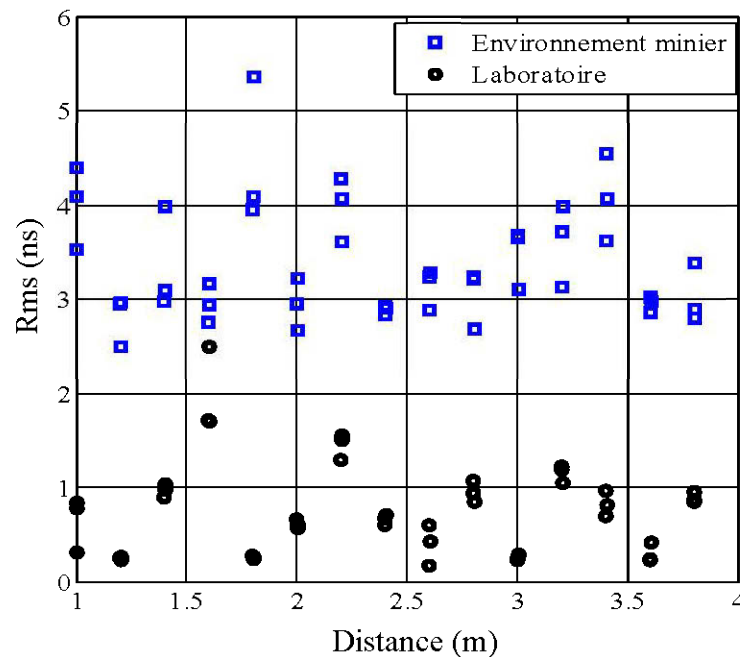


Figure 5-10 L'étalement efficace des retards en fonction de la distance pour le laboratoire.

Le tableau 5.5 résume tous les résultats des paramètres, tels que la valeur moyenne, l'écart-type et la valeur maximale des paramètres de dispersions temporels obtenus à partir des mesures réalisées au laboratoire de la mine CANMET.

Tableau 5-5 Les paramètres de dispersion scenario III.

Paramètres	$\tau_{RMS}$ (ns)	$\tau_{max}$ (ns)
Valeur moyenne	22.66	243.6
Ecart-type	4.77	2.12
Valeur maximale	35.66	248.9

La comparaison de l'étalement des retards de la mine souterraine et du laboratoire est montrée à la figure 5.10. On peut constater que l'étalement des retards, pour la mine souterraine et le laboratoire, varie entre 2.49 et 6.75 ns et 0.17 et 2.48 ns, respectivement. Les valeurs moyennes pour la mine et le laboratoire sont 3.61 et 0.78 ns, respectivement.

La figure 15 montre la bande de cohérence, à 90 %, du canal de propagation en fonction de la distance pour le laboratoire.

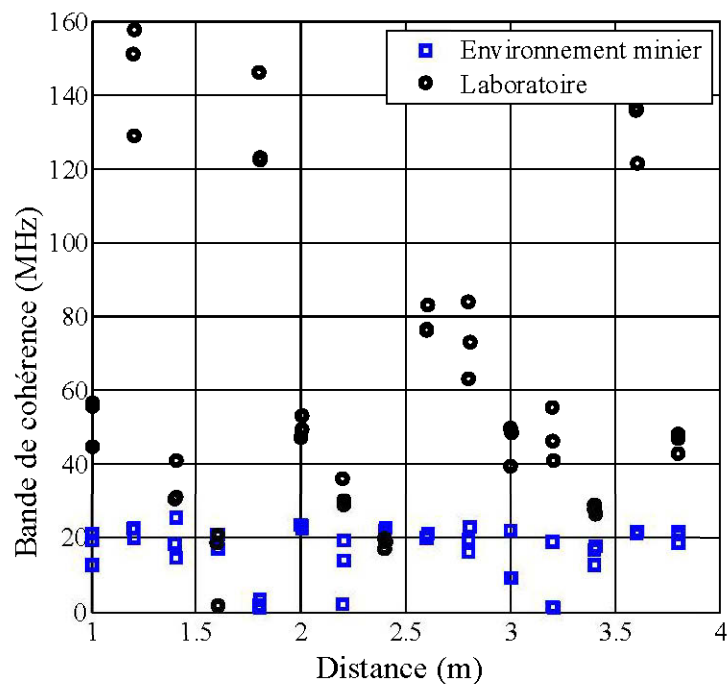


Figure 5-11 La bande de cohérence en fonction de la distance pour le laboratoire.



D'après les résultats observés à la figure. 5.11, on peut constater que la bande de cohérence moyenne pour la mine souterraine et le laboratoire est de 15.98 MHz et 61.81 MHz, respectivement. Cette différence est due au fait qu'il y ait moins de diffractions et dispersions dans le laboratoire.

## 5.4 CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre est l'analyse des résultats obtenus lors des différentes campagnes de mesures. L'extraction des paramètres, à grande et à petite échelle, permet la caractérisation complète du canal de propagation à 60 GHz.

L'analyse des résultats à grande échelle, notamment, l'affaiblissement du parcours, a été effectuée pour les deux galeries, 70 et 40 mètres et le laboratoire. L'étude à grande échelle a, également, été effectuée pour les deux combinaisons d'antennes, DD et DO.

Au milieu de la galerie du niveau 70 mètres, l'exposant de l'affaiblissement de parcours, en utilisant des antennes directionnelles, vaut 1.66; ce qui est proche de l'exposant de l'affaiblissement de parcours de l'espace libre. Une antenne directionnelle à l'émission limite l'énergie rayonnée à un cône étroit, ce qui entraîne moins de composantes par trajets multiples. L'utilisation d'une antenne directionnelle à la réception permet d'avoir un certain filtrage spatial, cependant, à proximité de la paroi, l'exposant de l'affaiblissement de parcours diminue. Cela peut être expliqué par l'augmentation des composantes par trajets multiples du fait que la paroi présente de nombreuses irrégularités causant, ainsi, une nette augmentation de trajets multiples

Dans la galerie du niveau 40 mètres, la valeur de l'exposant de l'affaiblissement, pour la configuration DD, est similaire à celle du niveau 70 mètres. Cela est, principalement, dû à la ressemblance des galeries 40 et 70 mètres. Cependant, en remplaçant l'antenne directionnelle par une antenne omnidirectionnelle à la réception,

l'exposant de l'affaiblissement de parcours diminue. Cela est, essentiellement, dû à la capacité de l'antenne omnidirectionnelle à collecter les signaux par trajets multiples arrivant des 360 degrés.

L'exposant de l'affaiblissement de parcours obtenu pour le laboratoire vaut 1.89. Cette valeur est supérieure à celles des deux galeries minières, des niveaux 70 et 40 mètres, pour la même combinaison d'antennes. Cela est, forcément, dû au nombre inférieur de composantes par trajets multiples existants dans le laboratoire.

Les paramètres temporels de dispersion ont, aussi, été analysés pour les deux niveaux 70 et 40 mètres, les deux combinaisons d'antennes, DD et DO et le laboratoire.

À la galerie du niveau 70 mètres, l'étalement efficace des retards, à proximité de la paroi, augmente d'environ 1 ns, par rapport à celui du milieu de la galerie. Au milieu de la galerie, la quantité de l'énergie capturée qui est plus élevée, arrive avec moins de dispersion. À proximité du mur, la forte dispersion est due aux nombreuses réflexions et diffractions.

Au niveau 40 mètres, l'étalement efficace des retards, pour la configuration DD, varie entre 3 et 6 ns. Pour la configuration DO, l'étalement efficace des retards va de 1 à 70 ns; ce qui représente une nette augmentation des délais des trajets multiples. L'étalement efficace des retards diminue, lorsque l'antenne directionnelle est utilisée à la réception car la directivité du faisceau limite les composantes des trajets multiples reçus.

Pour la mine souterraine et le laboratoire, l'étalement des retards varie entre 2,49 et 6,75 ns et 0,17 et 2,48 ns, respectivement. Les valeurs moyennes pour la mine et le laboratoire sont 3,61 et 0,78 ns, respectivement. Dans un environnement souterrain minier, les composantes par trajets multiples sont plus importantes en raison des réflexions, réfractions et diffusions dus au sol et aux surfaces rugueuses des galeries.

Les antennes directionnelles donnent un meilleur exposant de l'affaiblissement de parcours en raison leur capacité du filtrage spatial et permettent de réduire les délais des trajets multiples. L'utilisation des antennes directionnelles au milieu de la galerie offre une certaine stabilité des valeurs de l'affaiblissement de parcours.

## CHAPITRE 6

### CONCLUSION

Du fait de la saturation du spectre électromagnétique, la montée vers les bandes de fréquences plus élevées, notamment celles des ondes millimétriques, est nécessaire.

Les conditions de travail dans les environnements miniers sont parfois très difficiles car ce sont des milieux hostiles qui peuvent parfois être non sécuritaires. Actuellement, la majorité des dispositifs existants dans les environnements miniers sont filaires, rendant ainsi les milieux isolés en cas de coupures ou d'incidents; ce qui peut nuire à la sécurité des travailleurs.

Ce travail de recherche a visé l'amélioration de la sécurité des travailleurs miniers en contribuant à l'automatisation de la mine. Le contrôle à distance des véhicules et engins peut réduire les conditions dangereuses pour les travailleurs miniers sous terre et la vidéo surveillance permet également de suivre l'évolution des travaux en temps réel. D'autres applications pertinentes pour les environnements miniers peuvent s'ajouter.

La technologie à 60 GHz est la solution la plus intéressante pour atteindre ces objectifs. La disponibilité mondiale d'au moins 7 GHz de bande passante représente le plus important avantage de cette technologie par rapport aux autres.

Pour une bonne conception des dispositifs sans fil opérant à 60 GHz, la connaissance du canal de propagation ainsi que ses propriétés, demeure indispensable.

Ce travail a présenté les résultats de la caractérisation d'un canal de propagation à 60 GHz pour différentes configurations d'antennes et différents emplacements dans un environnement minier souterrain.

Les mesures ont été prises en ligne de vue, dans différentes galeries de la mine CANMET et en utilisant deux types d'antennes, directionnelle et omnidirectionnelle. Le dispositif de mesure ainsi que l'environnement minier ont été présentés.

La caractérisation du canal de propagation à 60 GHz s'est faite en deux parties, à grande et à petite échelle. La caractérisation à grande échelle est basée sur les fonctions de transfert du canal de propagation dans le domaine fréquentiel. Cependant, la caractérisation à petite échelle se fait en considérant les réponses impulsionnelles du canal, obtenues par la transformée de Fourier inverse.

Les résultats obtenus ont montré que la combinaison d'antennes directionnelle/directionnelle donne un meilleur exposant de l'affaiblissement de parcours et cela est dû à la capacité du filtrage spatial de ce type d'antennes. Le milieu de la galerie représente le meilleur emplacement pour la stabilité des valeurs de l'affaiblissement de parcours.

Les résultats des paramètres de dispersion temporels ont aussi montré que les antennes directionnelles permettent de réduire les délais des trajets multiples causés par les nombreuses réflexions et diffractions. Ceci permet un taux de transmission de données plus élevé et une meilleure capacité du canal.

L'utilisation d'une antenne omnidirectionnelle, à la réception, augmente nettement le nombre de trajets multiples reçus grâce à sa capacité à collecter des signaux par trajets multiples arrivant sur 360 degrés. La propagation à proximité du mur donne naissance à davantage de trajets multiples à cause de l'importante rugosité des parois rocheuses.

Ce travail de recherche offre un ensemble d'outils efficaces pour l'investigation et l'exploitation des résultats présentés pour diverses modélisations et conceptions de réseaux.

Au cours de ce travail de recherche, le canal de propagation a été considéré statique, ce qui n'est pas tout à fait réaliste en considérant l'activité existante dans les mines souterraines en opération. L'étude du canal minier en mouvement représente, donc, l'une des différentes perspectives pour compléter l'étude du canal minier à 60 GHz.

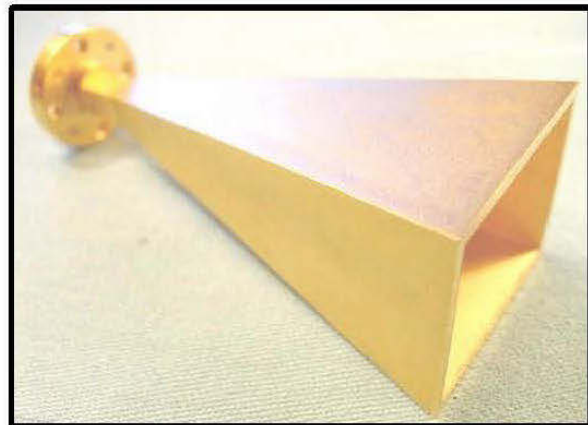
# ANNEXE A : SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DES ANTENNES

## A.1 L'ANTENNE DIRECTIONNELLE

**CERNEX, Inc.**

### Cornes de gain standard et large bande Cors Ridge :

- Gain nominal de 25 dBi.
- Disponible 1-220 GHz et Broadband Double Ridge.
- Fabriqué avec contrôle de tolérance dimensionnelle précise.
- Gain de calibration est précis à 0.5.
- Les autres valeurs de gain disponibles sur demande, ex: 10, 15, 20, etc



### CARACTÉRISTIQUES:

Waveguide Band	X	Ku	K	Ka	Q	U	V	E	W	F	D
Waveguide Size	WR-90	WR-62	WR-42	WR-28	WR-22	WR-19	WR-15	WR-12	WR-10	WR-8	WR-6
Frequency Range (GHz)	8.2 to 12.4	12.4 to 18	18 to 26.5	26.5 to 40	33 to 50	40 to 60	50 to 75	60 to 90	75 to 110	90 to 140	110 to 170
Waveguide Dimension	.900 by .400	.622 by .311	.420 by .170	.280 by .140	.224 by .112	.188 by .094	.148 by .074	.122 by .061	.100 by .050	.080 by .040	.065 by .0325

Flange Types (UG)		39	425	595	599	383	385	385	387	387	387	387
A	in	–	5.62	4.12	2.84	2.30	1.81	1.72	1.46	1.21	1.00	0.83
	mm	–	142.8	104.7	72.1	58.4	46.0	43.7	37.1	30.7	25.4	21.1
B	in	–	4.18	3.40	2.35	1.91	1.38	1.43	1.21	1.02	0.84	0.70
	mm	–	106.2	86.4	59.7	48.5	35.1	36.3	30.8	25.9	21.3	17.8
C	in	–	12.50	9.20	6.60	5.10	4.05	3.90	3.20	2.80	2.10	1.73
	mm	–	317.5	233.7	167.6	129.5	102.9	99.1	81.3	71.1	53.3	43.9

## A.1 L'ANTENNE OMNIDIRECTIONNELLE



Caractéristiques électriques :

Model	ODA-42	ODA-28	ODA-22	ODA-15	ODA-10
Frequency (GHz) ± 5%	22	35	43	60	94
Azimuth	360°				
Elevation	+140° from beam peak to -20° from beam peak				
Beam peak	± 10° from horizontal center				
Gain	2 dB (nom)				
Polarization	Vertical				



## ANNEXE B : PUBLICATIONS

Lounis, C, Hakem, N, Delisle, G.Y, Coulibaly, Y, “Large-scale characterization of an underground mining environment for the 60 GHz frequency band,” IEEE ICWCUCA, 2012.

Lounis, C, Hakem, N, Delisle, G.Y, “Characterization of the 60 GHz channel in underground mining environment,” IEEE APSURSI, 2012.

### Large-scale characterization of an underground mining environment for the 60 GHz frequency band

C. Lounis, N. Hakem, G.Y. Delisle, Y. Coulibaly  
 Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)  
 Laboratoire de recherche Télébec en communications souterraines (LRTCS)  
 Val d’Or, Québec, Canada, J9P 1S2  
 (chanez.lounis, nadir.hakem, gilles.delisle,yacouba.coulibaly@uqat.ca)

*Abstract*— In order to improve the mining communication applications such as video with high data rates, a characterization of the underground mining channel was done. The use of the IEEE.802.15.3c standard with an OFDM modulation scheme for the 60 GHz can allow obtaining a data rate range from 31.5 Mbps to 5.67 Gbps. This paper provides the propagation characteristics of the mine, which is a complex electromagnetic environment, necessary to the deployment of networks in the IEEE.802.15.3c or the IEEE.802.11ad standard. The experimental results were obtained during an extensive measurement campaign over a frequency range of 61 GHz to 63 GHz in an underground mining environment. These results allow the extracting of the large scale parameters such as the path loss exponent which help to design wireless communication systems. The line of sight (LOS) measurements were performed in the middle of the gallery. Finally, a comparison of the results obtained in a mining environment and in a laboratory is done. The path loss exponents are less than 2 in both scenarios as the environments have dense concentration of scatterers.

*Keywords*-component; 60 Ghz; Channel; underground; Measurement; Characterization

#### I. INTRODUCTION

Nowadays, there is an increasing interest in wireless communication systems which can provide multiple

services in confined environments, such as tunnels and underground mines. Wireless technology is required in the mining industry in order to improve the production through automation, to increase the safety, to reduce the maintenance costs and to allow the transfer of voice, data and video, in any remote location of the mine [1]. The demand for these high data rates and multiple services has led to different potential viable solutions for wireless communications. One of the attractive solution is to use the millimeter-wave frequency band, especially the universal unlicensed spectrum around 60 GHz [2].

This frequency band is of great interest because it allocates a massive amount of spectral space (5-7 GHz) for short range communication systems. Furthermore, the use of this frequency band also exhibits interesting features such as high available bandwidth, high capacity and the promise of short frequency reuse distances. Therefore, by using the 60 GHz unlicensed frequency band, it is expected to achieve

explicit transmission rates in order to provide enhanced broadband services.

The interest for the use of wireless communications in underground mining operations has led the LRTCS (Télébec Underground Communications Research Laboratory) researchers to develop improved communication systems aimed at the mining industry. This laboratory is located in the mining region of Val d'Or, Québec, Canada [3-4]. The experimental measurements are performed in CANMET (Canadian Center for Minerals and Energy Technology), which is a government own experimental mine in Val d'Or, Canada. It is an old gold mine used to train miners or perform different type of experiments.

Results for the 60 GHz propagation channel for both indoor and outdoor environments are available in the literature [5-7]. To date, very little attention has been given to the characterization of the 60 GHz radio channel in underground mines, even though an example in another confined area has been proposed [8]. The measurements were carried out in two lanes railroad tunnel in Germany.

The objective of this work is the deployment of the bi-directional 60 GHz networks in the IEEE.15.3c standard using the OFDM modulation scheme in order to achieve throughputs ranging from 31.5 Mbps to 5.67 Gbps.

To achieve this purpose, the characterization of a mining channel is required. In addition, a study of the propagation in different environments was made. This paper presents the experimental results obtained during a measurement campaign over a frequency range of 61GHz to 63 GHz in an underground mining environment and in a laboratory. The results allow the extracting of the large scale parameters which help to the optimal deployment of networks. The paper is organized as follows. In section II, the measurement system is presented, the underground mining environment is described and the laboratory environment is defined. In section III, the channel parameters based on measurements are defined. Finally, in section IV, the conclusion of this work is drawn.

## II. MEASUREMENT TECHNIQUE

### A. Experimental setup

The measurement technique used is based on a frequency channel sounding technique, which yields knowledge of the scattering S21 parameter through an E8363B Agilent Vector Network Analyzer (VNA). The VNA is used to measure the complex frequency response of the channel and it is capable of measuring frequencies from 10MHz up to 40GHz; therefore, it was necessary to up convert the signal in order to get the 60 GHz frequency band. The VNA is set to sweep 2048 discrete values of frequencies between 1 to 3 GHz corresponding to 61 to 63 GHz, with 0.97 MHz frequency resolution. Due to the 0.97 MHz frequency resolution, the maximum delay is 1.0309 us and the maximum path length is 309 m which is enough for 5m, the maximum distance that separate both the transmitter and the receiver. The VNA has two ports, the output port (port 2) is connected to the IF mixer input of the 60GHz up converter (CMB646405 CERNEX) of the transmitter with a 30 m coaxial wire with

low attenuation (0.1dB/m for 1 to 3 GHz). The IF signal is mixed with the 60 GHz signal (LO input). The 60 GHz signal is obtained by multiplying the 2.5 GHz synthesizer signal through a CFM 0203X610-01 frequency sextupler and a CFM13 16X413-01 frequency quadrupler. Finally, the output of the mixer is connected to a 60 GHz antenna in order to transmit frequencies between 61 and 63 GHz. A 60 GHz filter and a 60 GHz puissance amplifier CBM50751507-01 are placed between the mixer and the antenna.

At the reception, the received signal pass through a 60 GHz low noise amplifier and a 60 GHz filter, then it is mixed with the LO 60 GHz signal obtained by multiplying the 2.5 GHz synthesizer signal through a CFM 0203X610-01 frequency sextupler and a CFM13 16X413-01 frequency quadrupler to get the IF output ranging from 1 GHz to 3 GHz. The IF output of the mixer is filtered by a filter, then it is connected to the input port (port 1) of the VNA with a 3m coaxial wire having a low attenuation (0.1dB/m for 1 to 3 GHz). Both oscillator and VNA are synchronized by connecting the 10 MHz reference clocks on them. Fig. 1 illustrates the scheme of the experimental protocol.

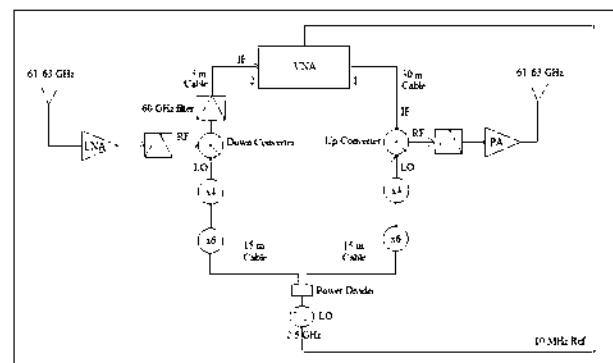


Figure 1. Block diagram of the measurement system.

At 60 GHz, the wavelength is 5mm, so the VELMEX positioning system is used to have an accurate location of the receiving antenna when it is moving away for transmitting antenna as shown in Fig. 2. Measurements are done by keeping the transmitter fixed and shifting the receiver on both x and y axes. At each position, a special 3\*3 grid is used to have nine different horizontally-spaced receiver placements, around the nominal position, separated by 2.5mm corresponding to the half wavelength in order to avoid the correlation between signals. For the large scale step, 40 wavelengths are applied between two nominal positions corresponding to 20 cm.

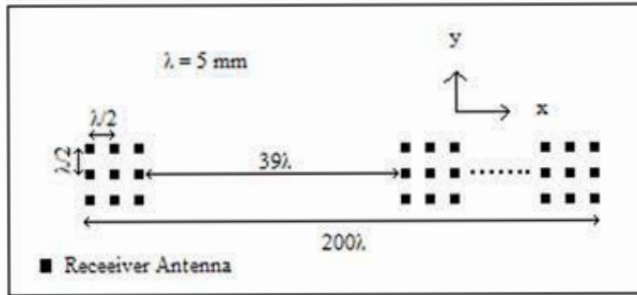


Figure 2. Measurement grid.

Two Cernex CRA directional horn antennas (CRA15507520) have been used at both transmitter and receiver. Their operating frequency range is from 50 to 75 GHz. Both azimuth and elevation 3 dB beamwidth plans are 12 degrees. A laser beam has been used to fix the height of the antennas from the horizontal ground at 1.25 meter. All antennas are vertically polarized and provide a gain of 20 dB in the operational frequency band. The effect of antennas is removed from the measurements by using the calibration at the reference distance of 50 cm. During all measurements, the channel is assumed stationary because there was no movement or person in the gallery or the laboratory. The overall measurement process was automated because of the extensive and large number of measurements involved. This automation of the measurement system reduces the data collection time and allows measurements in a wider range of deployment scenarios.

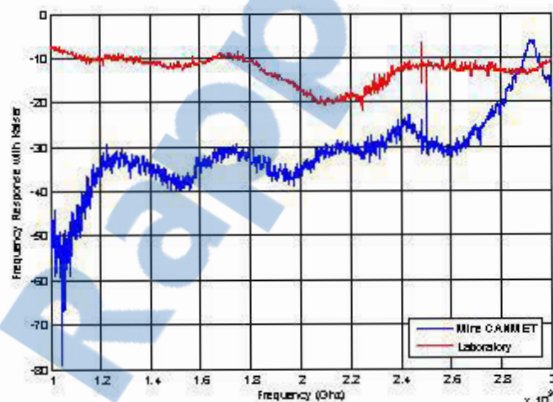


Figure 3. Measured frequency response at 3 m.

At each position, the channel transfer function  $S_{21}$  is measured 5 times in order to reduce the effect of the random noise. All these measurements are transferred and stocked into a computer via an Ethernet port. The measurement data were windowed by using a Kaiser Window technique. The dispersion of the energy in adjacent delay bin was therefore suppressed. The time domain channel responses are obtained from measurements data by using an Inverse Fast Fourier transform (IFFT).

Fig. 3 and fig. 4 illustrate a measured channel transfer function and the power delay profile (PDP) at a distance of 3 meters for both mining and laboratory environments. To verify the accuracy of the measurements, the PDP, which shows the relative received power as a function of delay, is utilized to extract the exact distance between the transmitter and the receiver. The arrival time of the first signal component in the PDP is used to deduce this distance. A distance of 2.95 and 2.96 meters is found for mining and laboratory environments, respectively. The first arrival time error for both environments is less than 1.6% or less than 1 degree in alignment between transmitter and receiver, which is sufficiently accurate considering mine environment.

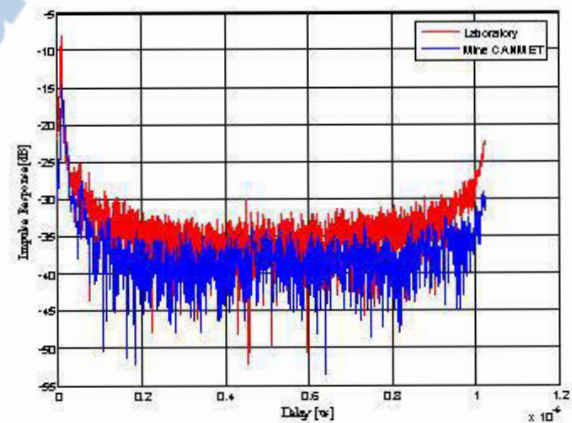


Figure 4. Measured impulse response at 3 m.

### B. Indoor environment

The experimental mine used by the LRTCS to perform the measurements is a hostile and normally wet environment and it is composed of several galleries as shown in Fig. 5. The measurements were taken in a gallery at 70 meters depth. This gallery is approximately 3 meters wide and 2 meters high.



Figure 5. Mining environment.



Figure 6. Laboratory environment.

The ceiling and walls are mostly irregular rough surfaces; the floor is unequal with many pods of water, which makes the circulation and the line of sight measurements more difficult. The CANMET laboratory is illustrated by fig. 6. It is 4 meters wide, 8 meters long and 4 meters high.

### III. RESULTS

In mine tunnels different propagation phenomena, such as reflections, diffusions and refractions, can exist. Therefore, the mines are rich in multipath components. Underground mines do not have ideal scattering environment. The path loss of electromagnetic waves affects the received power and link budget of the system. In a practical perspective, it can provide valuable information that enables engineers to design low cost, high performance and more reliable communications systems. The average path loss in term of distance can be written as [9]:

$$PL(d) = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |H(f_i, t_j, d)|^2 \right] \quad (1)$$

where:

$H(f_i, t_j, d)$  is the frequency response.

$N$  is the number of frequency sweeping points.

$M$  is the measurement number for each distance.

It is well known that the path loss can be modeled as a function of distance using the following relationship [9]:

$$PL_{dB} = PL_{dB}(d_0) + 10 \log(d/d_0) + \delta_\sigma \quad (2)$$

where:

$PL_{dB}(d_0)$  is the path loss at the reference distance.

$n$  is the path loss exponent.

$\delta_\sigma$  is the centred gaussian random variable in dB with a standard deviation  $\sigma$ .

The measurements are taken in the frequency domain for the LOS case between 50 cm and 6 m. Fig. 8 represent the path loss, in dB, according to the distance between the transmitter and the receiver and it shows the effect of the environment on measurements.

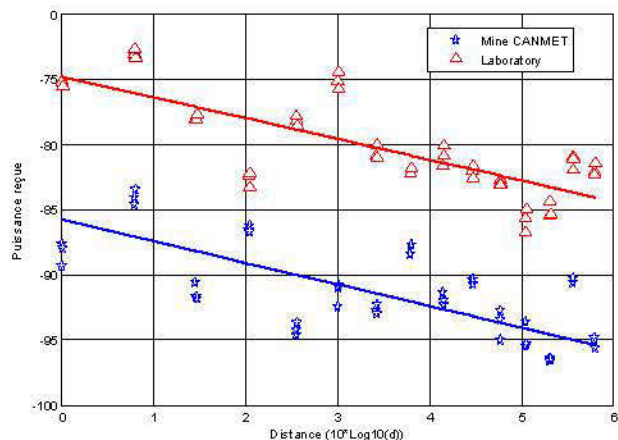
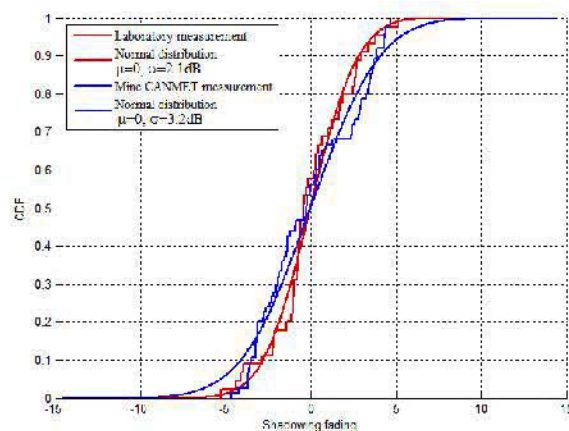


Figure 7. Effect of environments on the path loss.

Figure 8. Effect of environments on  $\sigma$ .

The different values of  $n$  and  $\sigma$  for the two environments are summarized in Table I.

TABLE I. THE OBTAINED  $n$  AND  $\sigma$  FOR DIFFERENT ENVIRONMENTS.

Environment	Mine	Laboratory
-------------	------	------------



<b>n</b>	1.656	1.5973
<b>PL(d<sub>0</sub>)</b>	-15.7679	-4.7733
<b>Sigma[dB]</b>	3.2	2.1

Comparing our results with the path loss exponents reported in [5-7] for the different indoor environments, the path loss exponent found for the mining environment is about 1.6, while published results range from 1.4 to 1.8 for other types of environments. It is smaller than the free space path loss exponent due, probably, to the use of the directive antenna on both sides or to the wave-guiding effects of the gallery walls. The path loss obtained from our measurements is close to the path loss obtained in [7], calculated in a corridor, due to the similitude on the setup and type of antennas; the wave-guiding effect are also noted in [7]. The path loss exponent found for the laboratory is about 1.59 and it is smaller than the path loss exponent found in the mining environment. Furthermore, there are 12 dB between the two curves. So, in the mine there are more losses than in the laboratory.

#### IV. CONCLUSION

This paper has presented the results for the 60 GHz propagation channel path loss characterization for different environments, in an underground mining environment and in a laboratory. Measurements were taken in a line of sight case over 6m using horn antennas. The path loss exponent for a LOS scenario in a mining environment has been determined and its value is close to the path loss exponent found by in other indoor environments. So, the mine has a waveguiding effect on measurements. Also, the gap between the path loss exponent of the laboratory and the path loss exponent of the mine is very small. This means that the form of the gallery doesn't influence, so much, the path loss. In addition, other measurements will be done in order to explain the difference between the laboratory and mining results.

#### REFERENCES

- [1] S. Outalha, R. Le, P.M. Tardif, "Toward a unified and digital communication system for underground mines", *Revue of Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum*, Vol. 93, No. 1044, pp. 100-105, 2000.
- [2] Su-Khiong Yong, Pengfei Xia, Alberto Valdes-Garcia, 60 GHz technology for GBPS WLAN and WPAN. From theory to practice, John Wiley & Sons Ltd, 2011, pp.3-61.
- [3] C. Nerguizian, C. Despins, S. Affes, M. Djadel, "Radio-channel characterization of an underground mine at 2.4 GHz", *Wireless Communications*, IEEE Transactions, Vol 4, Issue 5, Sept 2005 pp.2441-2453.
- [4] M. Boutin, A. Benzakour, C.L. Despins, S. Affes, "Radio Wave Characterization and Modeling in Underground Mine Tunnels," *Antennas and Propagation*, IEEE Transactions on, vol.56, no.2, pp.540-549, Feb. 2008.
- [5] P. F.M. Smulders, "Statistical Characterization of 60 GHz Indoor Radio," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 57, No. 10, October 2009.
- [6] N. Moraitis, P. Constantinou, "Indoor channel Measurements and Characterization at 60GHz for wireless local area network," *IEEE transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 52, No. 12, December 2004.

- [7] S. Geng, J. Kivinen, X. Zhao, P. Vainikainen, "Millimeter-wave propagation channel characterization for short-range wireless communications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 58, No. 1, January 2009, pp.1-7.
- [8] N. Prediger, A. Plattner, "Propagation measurements at 60 GHz in railroad tunnels", *Microwave Symposium Digest*, 1994., IEEE MTT-S International, 1085 - 1087 vol.2, 1994
- [9] Theodore S. Rappaport, *Wireless communications principles and practice*, Prentice Hall PTR, 2002, pp.102-106.

# Characterization of the 60 GHz channel in underground mining environment

Chanez Lounis  
LRTCS-UQAT  
Val-d'Or, Quebec, Canada  
chanez.lounis@uqat.ca

Nadir Hakem, MIEEE, Gilles Y. Delisle, FIEEE  
LRTCS-UQAT  
Val-d'Or, Quebec, Canada  
{nadir.hakem, gilles.delisle}@uqat.ca

**Abstract**—This paper presents the first results at 60GHz of the path loss characterization in underground mining environment. The results are based on experimental data obtained during a measurement campaign using a frequency range from 60 to 62 GHz and a simple path loss model is used to characterize the large-scale fading of this type of environment.

## V. INTRODUCTION

The demand for higher data transmission rates in the mining environment is increasing and many attempts to use the millimeter waves spectrum is currently underway. The 60 GHz band has several advantages, namely a very large bandwidth all over the world [1]. The interest for the use of the 60GHz frequency in underground mining operations has led the LRTCS researchers to develop improved communication systems aimed at the reduction of underground incidents. Results for the 60 GHz propagation channel for both indoor and outdoor environments are available in the literature but no results applicable to the mining environment have been published so far [2] [3] [4]. The objective of this work is to present the experimental approach used to collect the measurements and apply it with a best fitting approach to simple path loss model.

## VI. MEASUREMENT TECHNIQUE

### A. Measurement environment

The experimental mine used by the LRTCS to perform the measurements is a hostile and normally wet environment and it is composed of several galleries (Fig. 1). The measures were taken in a gallery 70 meters underground and this gallery is approximately 3 meters wide and 2 meters high. The ceiling and walls are mostly irregular rough surfaces; the floor is unequal with many pods of water, which makes the circulation and the line of sight measurements more difficult.



Figure 1. Measurement setup.

### B. Measurement campaign

The measurement technique used is based on a frequency channel sounding technique, yielding knowledge of the scattering  $S_{21}$  parameter through a E8363B Network Analyzer (VNA).

As illustrated in Fig. 2, the VNA is set to sweep the frequencies between 1 to 3 GHz, with 312,5 kHz frequency resolution. The 1<sup>st</sup> port of the VNA is connected to a 60GHz up converter with a 15 m coaxial wire with low attenuation (0,1 dB /m for 1 to 3 GHz). This up converter is connected to a 60 GHz horn antenna. At the other VNA port, a down converter with the same horn antenna is connected with a 2m coaxial wire having the same attenuation as in the sending side.

The down converter takes any frequency between 60 GHz and 62 GHz and subtracts 59GHz. It is composed of a CMB646405 CERNEX mixer, a CFM 1316X413-01 frequency doubler and a CFM 0203X610-01 frequency quadrupler. Conversely, in the up converter, 59GHz is added to any frequency between 1 and 3 GHz.

A VELMEX positioning system is used to have an accurate location of the receiving horn antenna when it is moving away for transmitting antenna. Measurements are done by keeping the transmitter fixed and shifting the receiver on the x axis. Note that the two antennas are directives, pyramidal horn type, with 15 dB gain and they are 1,37 meter height from the horizontal floor. During all measurements, in a line of sight, the channel is assumed stationary.

The VNA sweeps 6401 discrete values of frequencies between 60 and 62 GHz uniformly distributed over the

bandwidth. Each distance is noted and 15 measurements are taken. All these measurements are transferred and stocked into a computer via an Ethernet port.

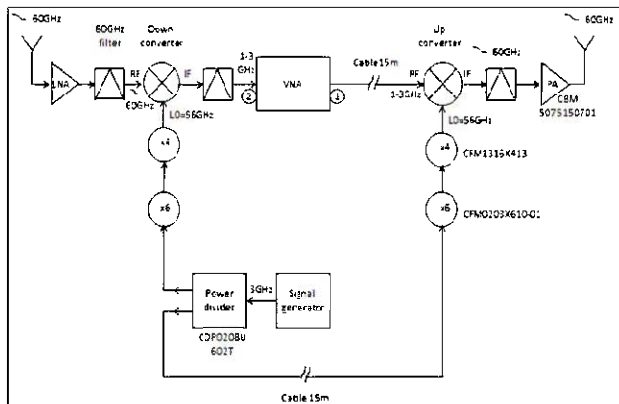


Figure 2. Block diagram of the measurement system.

## VII. RESULTS

The average path loss in term of distance can be written as: [5]

$$PL(d) = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |H(f_i, t_j, d)|^2 \right] \quad (1)$$

where:

$H(f_i, t_j, d)$  is the frequency response.

$N$  is the number of frequency sweeping points.

$M$  is the measurement number for each distance.

The path loss in term of distance in dB can be written as a random log normal distribution: [5]

$$PL_{dB} = PL_{dB}(d_0) + 10 \log(d/d_0) + \delta_{\sigma} \quad (2)$$

where:

$PL_{dB}(d_0)$  is the path loss at the reference distance.

$n$  is the path loss exponent.

$\delta_{\sigma}$  is the centred gaussian random variable in dB with a standard deviation  $\sigma$ .

Fig. 3 represents the path loss, in dB, according to the distance, in meters, between the transmitter and the receiver. Note that the line of sight measures were taken between 1 and 5 m. The path loss exponent from this figure is 1.65 and the standard deviation is 4.45. Comparing our results with the path loss exponents reported in [2],[3] and [4] for the different indoor environments, the path loss exponent found for the mining environment is about 1,7 while published results range from 1,4 to 1,8 for other types of environments. It is smaller than the free space path loss exponent due probably to the use of directive antenna on both sides or to the wave-guiding effects of the gallery walls. The path loss obtained from our measurements is close to the path loss of [4], calculated in a corridor, due to the similitude on the setup and type of antennas; the wave-guiding effects are noted in [4]. The standard calculated deviation is 4.45. It is greater than the standard deviation of the different indoor environments (2.1 on average) [2] [3] [4] and that is due to the irregular walls of the mine.

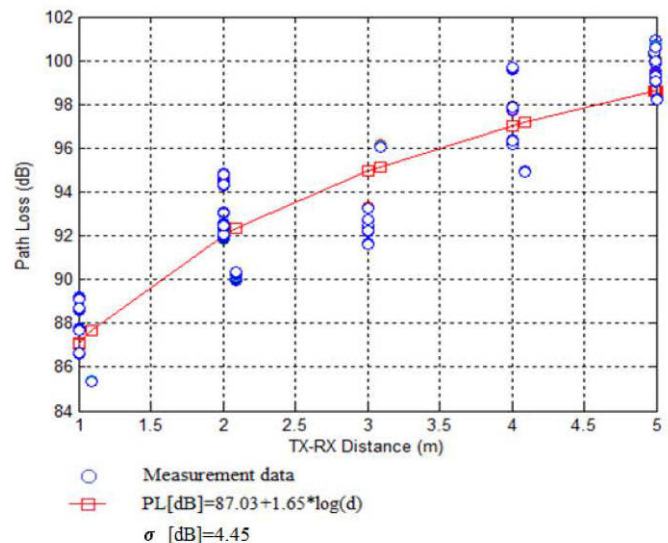


Figure 3. Path loss result for a mining environment.

## VIII. CONCLUSION

This paper has presented preliminary results for the 60 GHz propagation channel path loss characterization in an underground mining environment. Measurements were taken in a line of sight scenario over 5m using directional antennas. The path loss exponent for a LOS scenario in a mining environment has been determined and its value is close to the path loss exponent found by in other indoor environments. So, the form of the gallery doesn't influence, so much, the path loss.

## REFERENCES

- [10] Su-Khiong Yong, Pengfei Xia, Alberto Valdes-Garcia, 60 GHz technology for GBPS WLAN and WPAN. From theory to practice, John Wiley & Sons Ltd, 2011, pp.3-61.
- [11] P. F.M. Smulders, "Statistical Characterization of 60 GHz Indoor Radio," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 57, No. 10, October 2009.
- [12] N. Moraitis, P. Constantinou, "Indoor channel Measurements and Characterization at 60GHz for wireless local area network," IEEE transactions on Antennas and Propagation, Vol. 52, No. 12, December 2004.
- [13] S. Geng, J. Kivinen, X. Zhao, P. Vainikainen, "Millimeter-wave propagation channel characterization for short-range wireless communications," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 58, No. 1, January 2009, pp.1-7.
- [14] Theodore S. Rappaport, Wireless communications principles and practice, Prentice Hall PTR, 2002, pp.102-106.

## RÉFÉRENCES

- [1] Su-Khiong Yong, Pengfei Xia, Alberto Valdes-Garcia, “60 GHz technology for Gbps WLAN and WPAN, from theory to practice,” John Wiley & Sons Ltd, 2011, pp.3–61.
- [2] Theodore S. Rappaport, “Wireless communications principles and practice,” Prentice Hall PTR, 2002, pp.102–106.
- [3] Oliver, A.D, “Millimeter wave systems – past, present and future,” IEE Proceedings, 1989, pp.35–52.
- [4] P. Smulders, “Exploiting the 60 GHz band for local wireless multimedia access: Prospects and future directions,” IEEE Commun. Mag, vol. 40, Janvier 2002, pp.140-147.
- [5] Yong, S.K. and Chong, C.C, “An overview of multigigabit wireless through millimeter wave technology: Potentials and technical challenges,” EURASIP J. Wireless Commun. And Networking, 2007, 10 pp.
- [6] FCC, “First report and order, revision of part 15 of the commission’s rules regarding ultra-wideband transmission systems,” Technical report, Feb 2004.
- [7] T. Wada, M. Maeda, M. Okada, K. Tsukamoto, et S. Komaki, “Theoretical analysis of propagation and network characteristics in millimeter waves inter-vehicle communication system”, Global Telecommunications Conference, Sydney, Australia, vol. 2, 1998, pp. 910-915.
- [8] S, COLLONGE, “Caractérisation et modélisation de la propagation des ondes électromagnétiques à 60 GHz à l’intérieur des bâtiments”, L’institut national des sciences appliquées de RENNES, May 2005, pp. 25-30.
- [9] Suiyan Geng, “Millimeter Wave and UWB Propagation for High Throughput Indoor Communications”, Aalto University School of Electrical Engineering, 2011, pp. 14-16.



- [10] Y. Rissafi, "Caractérisation d'un canal minier souterrain ultra-large bande (3GHz-10GHZ)", Université du Québec en Outaouais, Département d'informatique et d'ingénierie, juin 2007, pp. 10-11.
- [11] P. Pagani, "Caractérisation et modélisation du canal de propagation radio en contexte Ultra Large Bande", L'institut national des sciences appliquées de RENNES, Décembre 2005, pp. 46-47.
- [12] Système robotisé : [http://www.velmex.com/pdf/bislide-pdf/motorized\\_bislide.pdf](http://www.velmex.com/pdf/bislide-pdf/motorized_bislide.pdf)
- [13] P. F.M. Smulders, "Statistical Characterization of 60 GHz Indoor Radio," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 57, No. 10, October 2009.
- [14] N. Moraitis, P. Constantinou, "Indoor channel Measurements and Characterization at 60GHz for wireless local area network," IEEE transactions on Antennas and Propagation, Vol. 52, No. 12, December 2004, pp.3182.
- [15] S. Geng, J. Kivinen, X. Zhao, P. Vainikainen, "Millimeter-wave propagation channel characterization for short-range wireless communications," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 58, No. 1, January 2009, pp.1-7.
- [16] A. El Rafei, "Caractérisation à grande échelle d'un signal 60 GHz dans un environnement minier confinés.", Université de Québec en Abitibi-Témiscamingue, Faculté des Sciences et de Génie, Mai 2012, pp. 45-64.