



BIBLIOTHÈQUE

CÉGEP DE L'ABITIBI-TÉMISCAMINGUE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans [Depositum](#), site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous. L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) obtained the permission of the author to use a copy of this document for nonprofit purposes in order to put it in the open archives [Depositum](#), which is free and accessible to all. The author retains ownership of the copyright on this document.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

ÉCOLE DE GÉNIE

**Étude et analyse de la connectivité d'un réseau V2X dans un
environnement minier souterrain**

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

NABIH ALLAW

SEPTEMBER 2023

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de mémoire, professeur *Nahi Kandil*, pour ses précieux conseils, son soutien constant et sa patience tout au long de ce projet. Sa grande expertise et sa passion pour le sujet m'ont été d'une grande inspiration et m'ont permis de mener à bien ce travail.

Je suis également reconnaissant à mon codirecteur de thèse, professeur *Nadir Hakem*, pour m'avoir guidé et encouragé tout au long de ce travail. J'aimerais également lui dire à quel point j'ai apprécié toutes les heures qu'il a consacrées à diriger cette recherche.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance à responsable du Laboratoire Eng. *Mohamad Ailas* pour m'a aidé, en mettant à ma disposition le matériel et les ressources logiques nécessaires pour mener à bien mon projet. et l'environnement de travail stimulant qu'ils ont créé.

Un merci particulier à Ali Issa, Bassam Zahreddine, Mohamad El-Hajj Khalil, Mohamad Madi pour leurs précieuses discussions et leur soutien moral tout au long de cette aventure.

Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude à ma famille, pour leur amour inconditionnel, leur soutien et leur compréhension tout au long de mes études. Cette réussite est aussi la leur.

TABLE DES MATIÈRES

<i>RÉSUMÉ</i>	10
<i>ABSTRACT</i>	11
<i>LISTE DES VARIABLES</i>	12
<i>Introduction</i>	13
I. Motivation et problème:	13
II. Solutions proposées:	14
1. Utilisation de la radio définie par logiciel (SDR)	14
2. Système de sondeur de canal basé sur SDR	15
3. Optimisation des systèmes de communication V2X pour les mines souterraines	15
III. Méthodologie:	16
IV. Hypothèse	19
<i>Chapitre 1</i>	20
<i>L'état de L'ART :</i>	20
1.1. Frequency Domain Zadoff-Chu Sounding Technique for USRPs: 20	
1.1.1. Aperçu:	20
1.1.2. Description du model:.....	20
1.2. USRP-Based Indoor Channel Sounding for D2D and Multi-Hop Communications	22
1.2.1. Aperçu:	22
1.2.2. Description du model:.....	22
1.3. RMS Delay Spread vs. Coherence Bandwidth from 5G Indoor Radio Channel Measurements at 3.5 GHz Band	23
1.3.1. Aperçu:	23

1.3.2.	Description du model:.....	24
1.4.	A Measurement Study of Time-Scaled 802.11a Waveforms over the Mobile-to-Mobile Vehicular Channel at 5.9 GHz.....	25
1.4.1.	Aperçu dans ce papier :.....	25
1.4.2.	Description du modèle :.....	25
1.5.	Performance Analysis of an OFDM-based Method for V2X Communication	26
1.5.1.	Aperçu dans ce papier :.....	26
1.5.2.	Description du modèle :.....	26
	<i>Chapitre 2</i>	28
	<i>Plateformes SDR et méthodologie d'analyse pour les communications V2X..</i>	28
2.1	Software-Defined radio (SDR) Platforms:.....	28
2.1.1.	Software-Defined Radio (SDR).....	28
2.1.2.	Sondage des canaux	30
2.1.4	PN séquence.....	31
2.2.	Matériel et logiciel.....	32
2.2.1.	Ubuntu.....	32
2.2.2.	GNU Radio.....	33
2.2.3.	USRP.....	35
2.2.4.	Matlab	37
2.2.5.	Antenne omnidirectionnelle extérieure	39
2.2.6.	Outils utilisés dans le cadre du projet.....	41
	<i>Chapitre 3</i>	42
	<i>Analyse et mise en œuvre du sondeur de canal pour les communications V2X souterraines</i>	42
3.1.	Schéma fonctionnel.....	42
3.2.	Équations et architecture.....	44
3.2.1	fréquence doppler	46

3.2.2 Étalement du retard RMS (RMS Delay Spread) et Coherence Bandwidth (Bande de cohérence).....	50
3.3. Description du GNU radio block Diagram.	54
3.3.1 Émetteur TX.....	55
3.3.2 Récepteurs RX.....	59
CHAPITRE 4	66
Analyse des mesures.....	66
4.1. Tests en laboratoire à l'Université UQAT Val-d'Or	66
4.1.1. Conditions expérimentales et matériel utilisé	66
4.1.2. Étapes des tests en laboratoire	69
4.1.3. Résultats et analyse des tests en laboratoire.....	71
4.2. Tests en mine [La cite de l'or] souterraine à Val-d'Or	77
4.2.1. Conditions expérimentales et matériel utilisé	77
4.2.2. Scénarios de test et objectifs de chaque scénario.....	80
4.2.3. Étapes des tests en mine souterraine.....	82
4.2.4. Résultats et analyse des tests en mine souterraine	87
Chapitre 5	104
Conclusion.....	104
Références	107

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1: <i>THESIS METHODOLOGY</i>	18
FIGURE 2 : <i>REPOSE IMPULSIONNELLE DU CANAL ET RETARD EXCESSIF ET VALEURS D'ENERGIE DU CANAL POUR 110 MESURES CIR DU CANAL LOS OU LA SEPARATION TX-RX D = 8 M</i>	21
FIGURE 3 : <i>CONFIGURATION DU SYSTEME POUR LES MESURES DE CANAL</i>	23
FIGURE 4 : <i>COHERENCE BANDWIDTH AT CORRELATION LEVEL 0.9 VS. RMS DELAY SPREAD IN THE AUDITORIUM WITH THE RECEIVER MOVING AWAY FROM THE TRANSMITTER</i>	24
FIGURE 5 : <i>MEASURED CHANNEL PARAMETERS</i>	25
FIGURE 6 : <i>DOPPLER RANGE (COHERENCE TIME) VS. RELATIVE SPEED</i>	27
FIGURE 7 : <i>ARCHITECTURE FONCTIONNELLE GENERALE DE SDR</i>	30
FIGURE 8 : <i>USRP N210</i>	35
FIGURE 9 : <i>CARTE MERE USRP N210 RFX2400</i>	37
FIGURE 10 : <i>ANTENNE OMNIDIRECTIONNELLE EXTÉRIEURE</i>	40
FIGURE 11 : <i>SCHÉMA FONCTIONNEL</i>	42
FIGURE 12 : <i>LE DIAGRAMME DE FLUX RADIO DE L'EMETTEUR GNU POUR LE SONDEUR DE CANAL</i>	55
FIGURE 13 : <i>BLOC SOURCE GLFSR</i>	56
FIGURE 14 : <i>BLOC PSK MOD</i>	57
FIGURE 15 : <i>BLOC UHD USRP SINK</i>	58
FIGURE 16 : <i>LE DIAGRAMME DE FLUX RADIO DE RECEPTEUR GNU POUR LE SONDEUR DE CANAL</i>	59
FIGURE 17 : <i>BLOC UHD: USRP SOURCE</i>	60
FIGURE 18 : <i>BLOC PSK DEMOD</i>	61
FIGURE 19 : <i>BLOC PN CORRELATOR</i>	62
FIGURE 20 : <i>BLOC FILE SINK</i>	63
FIGURE 21 : <i>PREPARATION DES EQUIPEMENTS</i>	67
FIGURE 22 : <i>TEST DANS LES COULOIRS DE L'UNIVERSITE</i>	68
FIGURE 23 : <i>VERIFIER LA CONNEXION DES USRP "UHD_FIND_DEVICES"</i>	71
FIGURE 24 : <i>DOPPLER SHIFT VS SPEED LOS</i>	72
FIGURE 25 : <i>DOPPLER SHIFT VS SPEED NLOS</i>	72
FIGURE 26 : <i>COHERENCE BANDWIDTH VS. RMS DELAY SPREAD LOS</i>	74
FIGURE 27 : <i>COHERENCE BANDWIDTH VS. RMS DELAY SPREAD NLOS</i>	74
FIGURE 28 : <i>MAPP DES TESTS DANS LA MINE LOS AVEC VEHICULE</i>	78
FIGURE 29 : <i>MAPP DES TESTS DANS LA MINE NLOS VEHICULE</i>	79

FIGURE 30 : <i>INSTALLATION DES MATERIELLE DANS LA MINE</i>	83
FIGURE 31 : <i>LES TESTS DANS LA MINE AVEC VEHICULE</i>	84
FIGURE 32 : <i>PHOTOGRAPHY OF THE MINE GALLERY</i>	85
FIGURE 33 : <i>GRAPHE DE FREQUENCE DOPPLER VS VITESSE LOS AVEC VEHICULE</i>	88
FIGURE 34 : <i>GRAPH DU 90% COHERENCE BANDWIDTH VS. RMS DELAY SPREAD LOS</i>	89
FIGURE 35 : <i>GRAPHE DE FREQUENCE DOPPLER VS VITESSE NLOS AVEC VEHICULE</i>	91
FIGURE 36 : <i>GRAPH DU 90% COHERENCE BANDWIDTH VS. RMS DELAY SPREAD NLOS</i>	92
FIGURE 37 : <i>DOPPLER VS VITESSE V2PTHROW</i>	95
FIGURE 38 : <i>DOPPLER VS VITESSE V2PAWAY</i>	95
FIGURE 39 : <i>DOPPLER VS VITESSE V2I</i>	96
FIGURE 40 : <i>90% COHERENCE BANDWIDTH VS. RMS DELAY SPREAD V2PTHROW</i>	98
FIGURE 41 : <i>90% COHERENCE BANDWIDTH VS. RMS DELAY SPREAD V2PAWAY</i>	99
FIGURE 42 : <i>90% COHERENCE BANDWIDTH VS. RMS DELAY SPREAD V2I</i>	99

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : <i>SYSTEM CONFIGURATION</i>	70
TABLEAU 2 : <i>ÉTALEMENT DU RETARD RMS (RMS DELAY SPREAD) LOS ET NLOS LABORATOIRE</i>	76
TABLEAU 3 : <i>SYSTEM CONFIGURATION MINE</i>	86
TABLEAU 4 : <i>ÉTALEMENT DU RETARD RMS (RMS DELAY SPREAD) LOS ET NLOS MINE</i>	93
TABLEAU 5 : <i>ÉTALEMENT DU RETARD RMS (RMS DELAY SPREAD) V2I V2PTHROW V2PAWAY MINE</i>	101
TABLEAU 6 : <i>RESUME DES RESULTATS DES TESTS - RMS DELAY SPREAD ET DOPPLER SHIFT PAR SCENARIO ET ENVIRONNEMENT</i>	103

RÉSUMÉ

Travailler dans les mines, en particulier en profondeur, engendre des risques, des désagréments et des coûts importants. Afin d'assurer une surveillance efficace, l'utilisation de la télécommande et d'un système de communication fiable est indispensable. Cependant, l'installation et le déploiement d'un système de communication dans cet environnement se révèlent complexes. Par conséquent, il est primordial de procéder à une sélection méticuleuse du type de système de communication, en prenant en considération la complexité liée à l'installation et à la réparation de l'équipement.

Ce projet vise à examiner et à analyser la connectivité du réseau V2X dans un environnement minier souterrain à l'aide d'un sondeur de canal, une technique non aveugle pour caractériser les canaux sans fil. Cette technique consiste à transmettre une séquence pseudo-aléatoire à travers le canal, puis à calculer l'autocorrélation de cette séquence pour estimer la réponse impulsionnelle du canal. Ces informations sont ensuite utilisées pour déterminer le retard RMS et la propagation Doppler du signal. Le sondeur de canal a été implémenté en utilisant le logiciel radio GNU et l'unité radio définie par logiciel Universal Software Radio Peripheral (USRP N210).

Les résultats de cette étude permettront de sélectionner et d'optimiser les systèmes de communication sans fil pour les applications minières souterraines, en prenant compte les défis liés à l'installation et à la maintenance des équipements. En améliorant la connectivité V2X dans les mines souterraines, il devient possible de rendre plus aisé l'échange d'informations entre les véhicules, les équipements et les infrastructures, engendrant par la suite la sécurité, l'efficacité et la productivité.

ABSTRACT

Working in mines, especially at depth, presents significant risks, inconveniences, and costs. To ensure effective monitoring, remote control, a reliable communication system is crucial. However, installing and deploying a communication system in this environment is difficult. Therefore, it is important to choose the type of communication system carefully, given the complexity of installing and repairing the equipment. This project aims to examine and analyze V2X network connectivity in an underground mining environment using channel sounder, a non-blind technique to characterize wireless channels.

This technique involves sending a pseudo-random sequence through a channel, calculating its autocorrelation to estimate the channel's impulse response, and using this information to calculate delay spread RMS, Doppler spread, The channel sounder was implemented using GNU radio software and the Universal Software Radio Peripheral Software Defined Radio Unit (USRP N210).

The results of this study will contribute to the selection and optimization of wireless communication systems for underground mining applications, considering the challenges associated with the installation and maintenance of equipment. By improving V2X connectivity in underground mines, it is possible to facilitate the exchange of information between vehicles, equipment, and infrastructure, thus improving safety, efficiency, and productivity.

LISTE DES VARIABLES

V2X : Communication véhicule-à-tout (Vehicle-to-Everything)
V2V : Communication véhicule-à-véhicule (Vehicle-to-Vehicle)
V2I : Communication véhicule-à-infrastructure (Vehicle-to-Infrastructure)
V2P : Communication véhicule-à-piéton (Vehicle-to-Pedestrian)
V2N : Communication véhicule-à-réseau (Vehicle-to-Network)
VNA : Analyseur de réseau vectoriel (Vector Network Analyzer)
DSRC : Communications dédiées à courte portée (Dedicated Short Range Communications)
ITS : Systèmes de transport intelligents (Intelligent Transportation Systems)
VANET: Réseaux ad hoc de véhicules (Vehicular Ad hoc Networks)
USRP: Universal Software Radio Peripheral
GNU Radio : Un framework open-source pour le développement de systèmes de communication radio
SDR: Radio logicielle (Software Defined Radio)
N210 : Modèle de l'USRP utilisé
RFX2400 : Carte fille pour l'USRP, opérant dans la gamme de fréquences de 2,4 GHz
OFDM : Modulation par répartition orthogonale de la fréquence (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
PSK : Modulation par déplacement de phase (Phase Shift Keying)
PN : Séquence pseudo-aléatoire (Pseudo-Noise)
Phyphox : Application mobile utilisée pour mesurer la vitesse du chariot et du véhicule
RMS: Étalement du retard RMS (RMS Delay Spread)
SNR: Rapport signal sur bruit (Signal-to-Noise Ratio)
LOS : Ligne de visée (Line-of-Sight)
NLOS : Hors de la ligne de visée (Non-Line-of-Sight)

INTRODUCTION

Le secteur minier joue un rôle capital dans l'économie mondiale, en fournissant des matières premières essentielles à de nombreuses industries. Toutefois, l'exploitation minière souterraine présente des défis uniques en termes de sécurité, d'efficacité et de coûts. Les conditions de travail difficiles, les risques d'accidents, et les contraintes environnementales exigent des solutions technologiques innovantes pour améliorer les conditions de travail et accroître la rentabilité des activités minières. [1]

I. Motivation et problème:

L'une des préoccupations majeures dans l'exploitation minière souterraine réside dans l'établissement d'une communication fiable et efficace entre les mineurs, les véhicules, les équipements et les infrastructures. Les systèmes de communication sans fil jouent un rôle essentiel dans la garantie d'une surveillance efficace, la télécommande, la transmission vidéo des applications, ainsi que dans la communication entre les mineurs afin d'améliorer la sécurité. Toutefois, l'installation et le déploiement d'un système de communication dans un environnement minier souterrain s'avèrent complexes en raison de la complexité de l'environnement, des contraintes physiques et des conditions changeantes. [2][3]

Les réseaux V2X (Vehicle-to-Everything) offrent un potentiel considérable pour améliorer la sécurité, l'efficacité et la productivité dans les mines souterraines. Ces réseaux permettent l'échange d'informations en temps réel entre les véhicules, les équipements, et les infrastructures, jouant ainsi un rôle crucial dans la coordination des opérations, la prévention des accidents et la prise de décision éclairée. Néanmoins, la caractérisation et l'optimisation de la connectivité V2X dans les environnements

miniers souterrains demeurent un défi majeur en raison de la complexité inhérente des canaux de communication sans fil.[4]

Afin de relever ce défi, une étude approfondie et une analyse de la connectivité du réseau V2X dans un environnement minier souterrain sont essentielles, en utilisant des techniques appropriées pour caractériser les canaux sans fil. La compréhension des paramètres clés tels que le retard RMS, la propagation Doppler permettra de sélectionner et d'optimiser les systèmes de communication sans fil pour les applications minières souterraines, tout en tenant compte des défis liés à l'installation et à la maintenance des équipements.

II. Solutions proposées:

Cette section met en avant les solutions envisagées pour étudier et analyser la connectivité du réseau V2X dans un environnement minier souterrain en utilisant la radio définie par logiciel (SDR) et le système que nous avons mis en œuvre. L'objectif principal est de caractériser les canaux sans fil et d'optimiser les systèmes de communication pour les applications minières souterraines. [5]

1. Utilisation de la radio définie par logiciel (SDR)

La radio définie par logiciel (SDR) est une technologie à la fois flexible et évolutive qui permet de concevoir, de tester et de déployer rapidement des systèmes de communication sans fil. En exploitant les possibilités offertes par SDR, nous sommes en mesure d'explorer aisément diverses techniques de modulation, de codage et d'accès au spectre afin d'évaluer leur performance dans un environnement minier souterrain. De surcroît, la SDR offre la possibilité d'adapter et d'optimiser les systèmes de communication en fonction des conditions changeantes et des exigences spécifiques des applications minières. [6]

2. Système de sondeur de canal basé sur SDR

Le présent mémoire se concentre sur le développement d'un système de sondeur de canal utilisant la technologie Software Defined Radio (SDR) pour la caractérisation des canaux de communication sans fil dans un environnement minier souterrain. Ce système repose sur l'utilisation d'Universal Software Radio Peripheral (USRP N210) équipés de cartes RFX2400, capables de supporter des fréquences allant de 2,3 à 2,9 GHz [7]. Pour la mise en œuvre du système, nous avons utilisé le logiciel GNU Radio sur deux ordinateurs équipés du système d'exploitation Ubuntu 20 [8]. Le fonctionnement du sondeur de canal consiste à transmettre une séquence pseudo-aléatoire (PN) modulée en phase-shift keying (PSK) à travers le canal sans fil.

Pour obtenir une estimation de la réponse impulsionnelle du canal, nous avons calculé l'autocorrélation du signal reçu. À partir de ces informations, nous avons pu extraire des paramètres tels que le retard, la propagation Doppler et les pertes de trajet, qui ont été utilisés pour caractériser les canaux sans fil dans un environnement minier souterrain. Ces caractéristiques ont également été utilisées pour évaluer la performance de la connectivité V2X (Vehicle-to-Everything) dans les mines souterraines.

3. Optimisation des systèmes de communication V2X pour les mines souterraines

Grâce à l'analyse de la connectivité V2X et à la caractérisation des canaux sans fil, nous avons pu formuler des solutions visant à optimiser les systèmes de communication V2X pour les applications minières souterraines.

Les solutions proposées incluent la sélection de techniques de modulation et de codage appropriées, l'ajustement des paramètres de transmission tels que la puissance et la fréquence, ainsi que l'utilisation de techniques avancées de traitement du signal pour améliorer la qualité de la communication [9]. En combinant la flexibilité de la SDR et les résultats de notre mémoire, nous sommes en mesure de concevoir des

solutions sur mesure pour améliorer la sécurité, l'efficacité et la productivité des opérations minières souterraines grâce à une communication V2X optimisée.

L'un des principaux atouts de notre approche basée sur la SDR réside dans sa capacité à s'adapter et à évoluer en fonction des besoins et des conditions changeantes des environnements miniers souterrains. Les solutions proposées peuvent être ajustées pour tenir compte des variations de la topologie de la mine, des interférences et de la densité des équipements de communication. En outre, la flexibilité offerte par la SDR facilite l'intégration de nouvelles fonctionnalités et permet des mises à jour aisées des systèmes de communication existants. Cette caractéristique s'avère essentielle pour répondre aux exigences en constante évolution en matière de sécurité, de connectivité et de performances dans les environnements miniers souterrains. [10]

III. Méthodologie:

Dans cette section, nous présentons une méthodologie détaillée permettant d'évaluer et d'analyser la connectivité du réseau V2X dans un environnement minier souterrain, en utilisant une technique de sondage de canal. Cette méthodologie comprend plusieurs étapes clés : la configuration du système de transmission (TX) et de réception (RX), la conception des scénarios de test, la collecte de données et l'analyse des résultats.

D'abord, pour mettre en œuvre la méthodologie décrite, nous avons utilisé deux USRP N210, équipés d'antennes, et reliés à deux ordinateurs fonctionnant sous Ubuntu 20.04. Les USRP ont été configurés avec le logiciel GNU Radio pour construire les schémas de la technique de sondage de canal. L'un a été utilisé comme émetteur (TX), installé sur un chariot, tandis que l'autre a été utilisé comme récepteur (RX) installé dans un véhicule en mouvement. Cette configuration a permis de simuler fidèlement les conditions d'un environnement minier souterrain, où la connectivité doit être maintenue entre des équipements fixes et mobiles.

Ensuite, nous avons élaboré différents scénarios de test pour simuler diverses conditions dans l'environnement minier souterrain.

La vitesse de mouvement du véhicule - Nous avons testé différents scénarios de vitesse pour reproduire les variations de vitesse auxquelles le véhicule pourrait être soumis dans un environnement de mine souterraine, incluant les conditions de visibilité directe (LOS) et de visibilité non directe (NLOS).

La distance entre l'émetteur et le récepteur - Nous avons varié la distance entre l'émetteur et le récepteur pour observer comment cela affecte la qualité de la communication V2X.

Les conditions de signalisation - Nous avons testé les scénarios dans diverses conditions de signalisation dans le but de comprendre comment elles affectent la connectivité V2X dans un environnement de mine souterraine. Ces scénarios ont été diversifiés en termes de vitesse de mouvement du véhicule, de distance entre l'émetteur et le récepteur, ainsi que de conditions de signalisation.

Lors du test, l'USRP TX a émis des signaux à travers le canal sans fil, et l'USRP RX a reçu ces signaux tout en se déplaçant conformément les scénarios de test. Les données reçues ont été enregistrées sur un disque dur en vue d'une analyse ultérieure.

Enfin, nous avons analysé les données collectées en utilisant deux métriques clés : le retard moyen quadratique (RMS) et l'effet Doppler. Le calcul du RMS nous a fourni une évaluation de la dispersion temporelle des signaux reçus, tandis que l'effet Doppler nous a permis d'estimer la variation de fréquence des signaux reçus due au mouvement relatif entre l'émetteur et le récepteur. Grâce à l'analyse de ces paramètres, nous avons pu caractériser la connectivité du réseau V2X dans l'environnement minier souterrain et déterminer la performance des communications sans fil dans ce contexte. La figure 1 résume la méthodologie de notre mémoire.

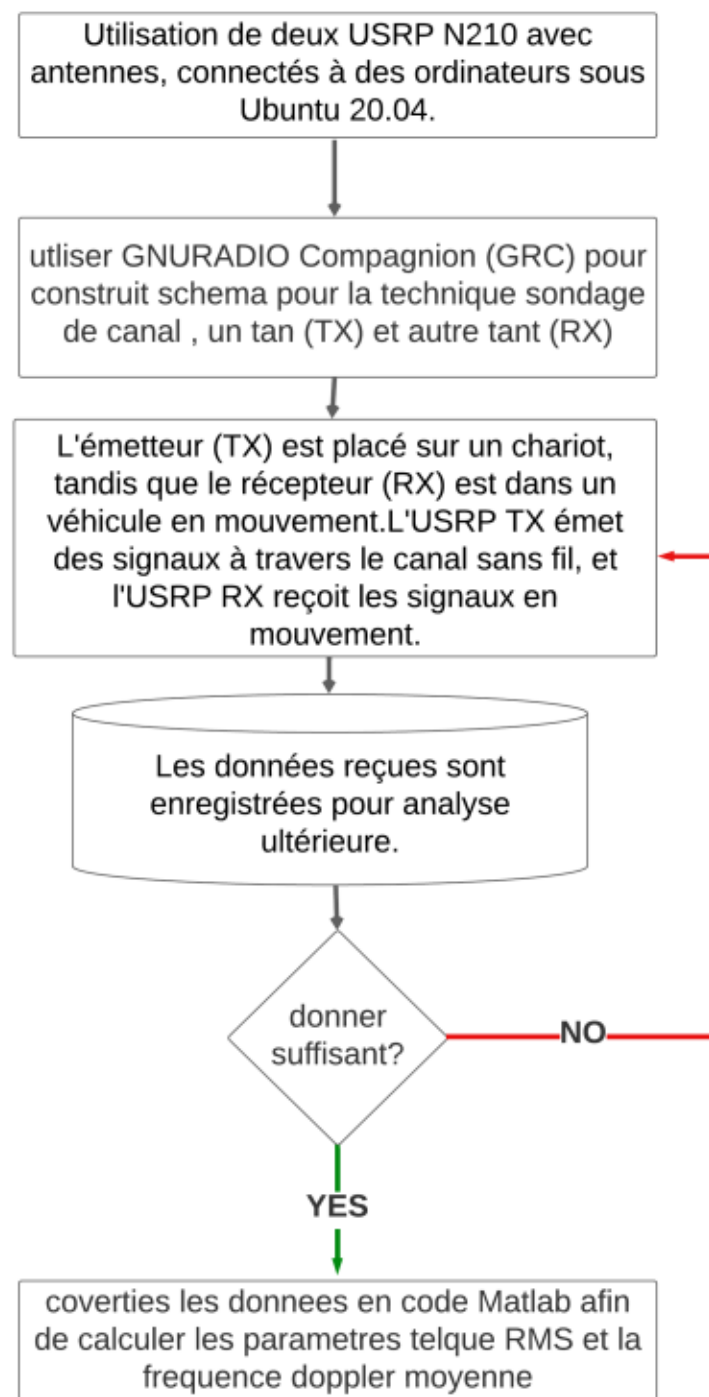


Figure 1: *Thesis Methodology.*

IV. Hypothèse

Cette section se focalise sur la présentation des hypothèses fondamentales qui ont orienté notre étude sur la connectivité du réseau V2X dans un environnement minier souterrain, en utilisant la technique de sondage de canal. Ces hypothèses ont été établies pour guider notre recherche et faciliter l'interprétation des résultats obtenus.

Hypothèse 1 : Dans un environnement minier souterrain, les conditions de communication sans fil sont significativement influencées par la géométrie des tunnels et la présence d'obstacles, ce qui entraîne des variations importantes dans la qualité de la connectivité.

Hypothèse 2 : Les erreurs de mesure dans les angles et les vitesses, notamment dans les scénarios de ligne de visée (LOS) et de non-ligne de visée (NLOS), ont un impact direct sur la précision des paramètres clés tels que le retard RMS et la propagation Doppler dans un environnement minier souterrain.

Hypothèse 3 : L'optimisation de la configuration du réseau V2X en fonction des paramètres spécifiques du site, y compris les erreurs d'angle et de vitesse, améliorera la robustesse et la fiabilité de la communication sans fil dans les mines souterraines.

Hypothèse 4 : En utilisant la technique de sondage de canal avec un sondeur de canal basé sur le logiciel radio GNU et l'unité radio définie par logiciel Universal Software Radio Peripheral (USRP N210).

En menant des expériences et en analysant les données collectées, nous allons soumettre ces hypothèses à des tests et vérifications. Les résultats obtenus joueront un rôle essentiel en éclairant davantage les défis et les opportunités associés à l'établissement d'un réseau V2X efficace et fiable dans un environnement minier souterrain.

CHAPITRE 1

L'ETAT DE L'ART :

Dans le présent chapitre, nous procéderons à une revue de l'état de l'art des technologies, méthodes et techniques pertinentes pour notre projet de recherche portant sur la connectivité du réseau V2X dans un environnement minier souterrain. L'étude de l'état de l'art nous permettra de mieux appréhender les travaux antérieurs dans ce domaine et de mettre en évidence les éventuelles lacunes que notre étude pourra combler. Nous procéderons à l'analyse des articles suivants en détaillant leurs modèles, aperçus et résultats.

1.1. Frequency Domain Zadoff-Chu Sounding Technique for USRPs:

1.1.1. Aperçu:

Les auteurs ont proposé une technique de sondage de canal sans fil, basée sur la séquence Zadoff-Chu en domaine de fréquence. Un Universal Software Radio Peripheral (USRP) ainsi que le logiciel GNU Radio ont été employés pour caractériser divers canaux intérieurs dans la bande de fréquences 800-900 MHz. La comparaison a été effectuée entre la méthode proposée et celle utilisant une onde continue en tant que signal sonde dans le domaine de fréquence. Les résultats indiquent que l'extraction des caractéristiques fondamentales du canal est plus rapide avec la méthode proposée par rapport à l'approche utilisant une onde continue [12].

1.1.2. Description du modèle:

Les chercheurs ont mis en œuvre un sondeur de canal en domaine de fréquence en se basant sur la séquence Zadoff-Chu. Les plates-formes USRP et MATLAB ont été utilisées pour cette implémentation. Le modèle exploite une séquence Zadoff-Chu générée du côté de l'émetteur, transmise à travers le canal. La fréquence porteuse de la

séquence transmise est balayée sur la largeur de bande mesurée. Grâce à cette approche, les caractéristiques du canal, notamment l'étalement temporel RMS, le délai moyen excédentaire, la perte de trajet et la largeur de bande cohérente, sont extraites plus rapidement que via la méthode utilisant une onde continue.

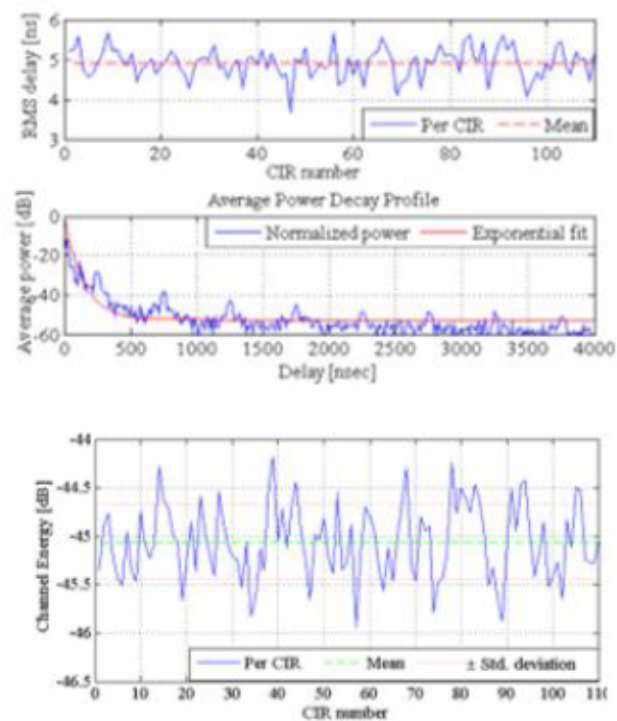


Figure 2 : Réponse impulsionnelle du canal et retard excessif et valeurs d'énergie du canal pour 110 mesures CIR du canal LOS où la séparation TX-RX $d = 8$ m

1.2. USRP-Based Indoor Channel Sounding for D2D and Multi-Hop Communications

1.2.1. Aperçu:

Cette partie présente une vue d'ensemble des contributions principales de l'article. Les auteurs ont élaboré une méthode d'estimation de canal à large bande dans le domaine des fréquences en utilisant la plate-forme USRP. D'abord, ils ont effectué des mesures de canal avec différentes distances entre l'émetteur et le récepteur pour déterminer les statistiques du canal telles que la perte de trajet, le délai moyen excessif, l'étalement temporel RMS et la largeur de bande de cohérence. Ensuite, ils ont construit un modèle empirique du canal en fonction de la distance en utilisant les statistiques du canal mesurées. Enfin, ils ont intégré le modèle de canal développé dans un modèle de simulation multi-sauts pour évaluer les performances du taux d'erreur binaire (BER) des systèmes multi porteuses. [13]

1.2.2. Description du model:

Cette partie présente une vue d'ensemble des contributions principales de l'article. Les auteurs ont élaboré une méthode d'estimation de canal à large bande dans le domaine des fréquences en utilisant la plate-forme USRP. D'abord, ils ont effectué des mesures de canal avec différentes distances entre l'émetteur et le récepteur pour déterminer les statistiques du canal telles que la perte de trajet, le délai moyen excessif, l'étalement temporel RMS et la largeur de bande de cohérence. Ensuite, ils ont construit un modèle empirique du canal en fonction de la distance en utilisant les statistiques du canal mesurées. Enfin, ils ont intégré le modèle de canal développé dans un modèle de simulation multi-sauts pour évaluer les performances du taux d'erreur binaire (BER) des systèmes multi porteuses..

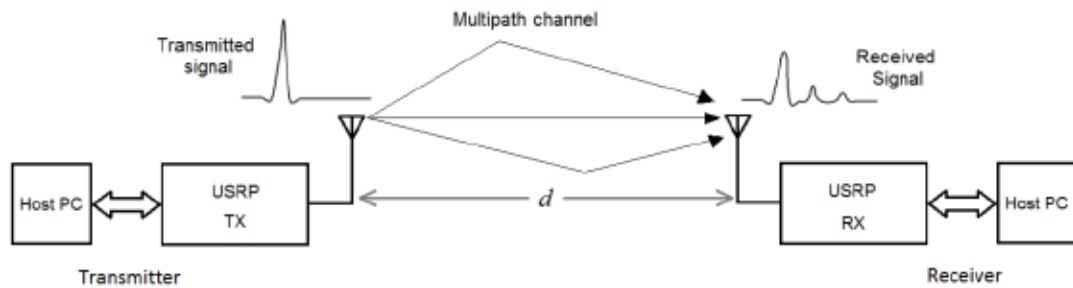


Figure 3 : Configuration du système pour les mesures de canal.

1.3. RMS Delay Spread vs. Coherence Bandwidth from 5G Indoor Radio Channel Measurements at 3.5 GHz Band

1.3.1. Aperçu:

Le papier présente une étude de mesure de canal radio en environnement intérieur pour les réseaux 5G. L'étude a été menée dans un laboratoire avec des dimensions spécifiques dans le but d'analyser l'influence des changements environnementaux sur la réponse du canal. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA), de deux antennes omnidirectionnelles et d'un système de positionnement automatisé pour déplacer l'antenne réceptrice à différentes positions dans la pièce. Un système de mesure automatisé développé avec MATLAB® a opéré à la fois le VNA et le système de positionnement ferroviaire. Les résultats ont été analysés pour fournir des informations sur les paramètres en bande large et leur applicabilité dans différents environnements intérieurs.[14]

1.3.2. Description du model:

Le modèle adopté repose sur la méthode des moments pour estimer la dispersion temporelle RMS à partir de la réponse impulsionnelle du canal mesurée. Le modèle a également utilisé une analyse par rayonnement pour étendre les conclusions aux autres environnements en utilisant une analyse par rayonnement. Les résultats ont mis en évidence que les changements environnementaux, tels que la taille de la pièce ou la présence de meubles et d'autres objets peuvent avoir un impact significatif sur la réponse du canal, ce qui, par conséquent, peut influencer les performances des réseaux 5G en intérieur.

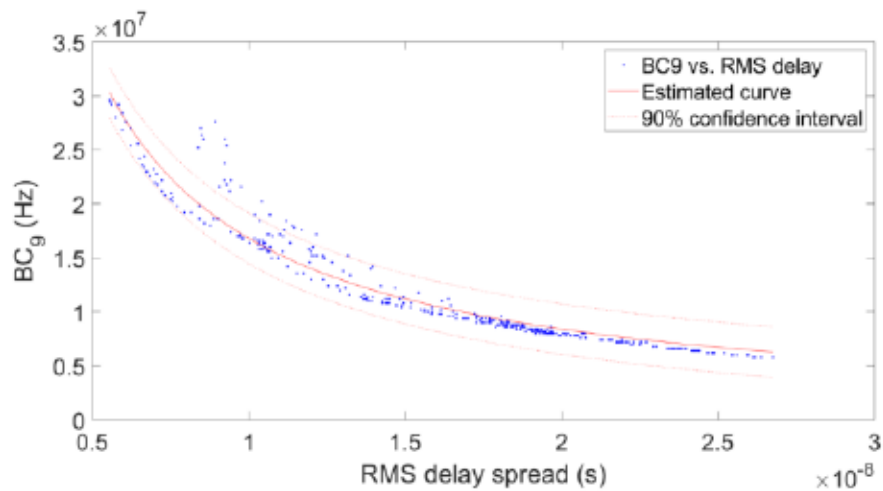


Figure 4 : *Coherence bandwidth at correlation level 0.9 vs. RMS delay spread in the auditorium with the receiver moving away from the transmitter.*

1.4. *A Measurement Study of Time-Scaled 802.11a Waveforms over the Mobile-to-Mobile Vehicular Channel at 5.9 GHz*

1.4.1. Aperçu dans ce papier :

Le papier se concentre sur l'utilisation de dispositifs à bord peu coûteux pour améliorer la sécurité automobile en formant un réseau ad hoc véhiculaire (VANET) utilisant des communications à courte portée dédiées (DSRC). Le papier exploite également les avantages et les défis de l'utilisation de la technologie IEEE 802.11 pour les communications entre véhicules.

1.4.2. Description du modèle :

Le présent document décrit une plate-forme RF qui a été étendue pour permettre une sonde à large bande. Pour évaluer les performances des schémas de transmission, des campagnes empiriques ont été menées. Une caractérisation détaillée de la chaîne V2V ainsi que l'analyse de l'impact du comportement du conducteur sont présentées en détail dans le document [15].

Environment	Suburban	Highway	Rural
Maximum excess delay	0.6 μ s	1.4 μ s	1.5 μ s
Minimum 90 percent coherence bandwidth	750 kHz	410 kHz	420 kHz
Maximum Doppler spread	0.583 kHz	1.53 kHz	1.11 kHz
Minimum 90 percent coherence time	1 ms	0.3 ms	0.4 ms

Figure 5 : *Measured channel parameters.*

1.5. Performance Analysis of an OFDM-based Method for V2X Communication

1.5.1. Aperçu dans ce papier :

Le papier propose une analyse de performance des systèmes basés sur OFDM pour la communication V2X. L'objectif principal de cette analyse est de garantir la non-sélectivité en fréquence et un minimum d'interférence inter porteuse (ICI) pour atténuer l'étalement Doppler dû aux véhicules se déplaçant à grande vitesse. D'abord, le papier commence par une introduction générale sur les systèmes de communication sans fil avancés pour améliorer la sécurité routière et la mobilité. Ensuite, il présente une revue de la littérature sur les recherches précédentes en matière de communication V2X. La section suivante décrit les caractéristiques du canal véhiculaire analysées dans cette étude. Enfin, le papier propose une méthode basée sur OFDM pour la communication V2X et présente une analyse de performance détaillée. [16]

1.5.2. Description du modèle :

Pour vérifier le schéma proposé basé sur OFDM pour la communication V2X, différentes situations sont considérées dans des environnements véhiculaires. Chaque scénario examine les paramètres de conception du système pour le schéma OFDM. Le premier scénario concerne des véhicules se déplaçant dans une région urbaine où les vitesses des véhicules sont inférieures à 20 km/h (ou 6 m/s). Dans ce scénario, la communication entre les véhicules est principalement affectée par les effets multi-trajets causés par l'infrastructure urbaine et le mouvement d'autres véhicules autour des véhicules Tx et Rx. Le deuxième scénario se situe dans une zone rurale où les véhicules se déplacent à des vitesses modérées, telles que 55 km/h à 60 km/h (ou 16,67 m/s). Dans ce scénario, le signal de communication subit une atténuation due à la distance et l'effet Doppler dû aux véhicules en mouvement.

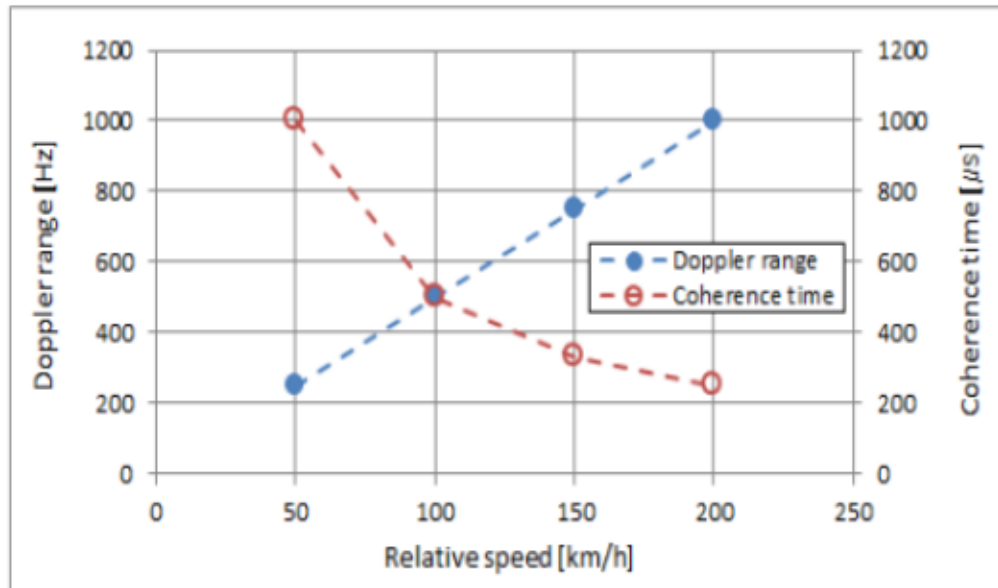


Figure 6 : *Doppler range (Coherence time) vs. Relative speed*

CHAPITRE 2

PLATEFORMES SDR ET METHODOLOGIE D'ANALYSE POUR LES COMMUNICATIONS V2X

Dans ce chapitre, nous allons présenter et discuter des plates-formes radio définies par logiciel (SDR) et des concepts clés liés à notre projet. Nous aborderons les aspects suivants SDR, Sondage de canal,, PN séquence, et nous présentons les principaux outils matériels et logiciels utilisés dans notre projet. Ces outils sont essentiels pour mettre en œuvre notre système de communication sans fil et réaliser les objectifs de recherche proposés.

2.1 Software-Defined radio (SDR) Platforms:

2.1.1. Software-Defined Radio (SDR)

Les systèmes de communication radio implémentés dans un logiciel sont appelés radios définies par logiciel (SDR), qui comprennent divers composants matériels (par exemple, des filtres, des amplificateurs, des modulateurs, des détecteurs, etc.). La modification de systèmes existants ou le prototypage de nouveaux systèmes est difficile lorsque les composants sont construits en tant que matériel spécifique à l'application. La raison en est que le changement de matériel nécessite plus de temps et d'argent que le changement de code logiciel. Les implémentations logicielles des composants radio offrent des avantages supplémentaires, tels qu'une plus grande flexibilité. Les systèmes de communication radio sont flexibles en ce sens qu'ils peuvent transmettre et recevoir une large gamme de protocoles radio (ou formes d'onde). De plus, le logiciel permet d'effectuer le traitement des données avec n'importe quel ordinateur à usage général, éliminant ainsi le besoin d'acheter un équipement spécialisé coûteux. De plus, les logiciels permettent de réutiliser les composants [17]. Le SDR minimise le matériel

pour permettre des modifications plus rapides, un prototypage plus facile et des coûts réduits, ainsi qu'une plus grande flexibilité et réutilisabilité. Les ordinateurs sont utilisés dans la plupart des activités d'apprentissage et de recherche sur les communications numériques dans le milieu universitaire. Ainsi, SDR est très bénéfique pour les établissements d'enseignement où les ordinateurs sont nombreux, mais le budget pour le matériel supplémentaire est modeste.

SDR est une radio dans laquelle les fonctions de la couche physique sont réalisées à l'aide d'un logiciel. Le groupe IEEE P1900.1 a travaillé pour établir une définition et une vue d'ensemble du SDR. SDR est un ensemble de matériel et de logiciels dans lequel certaines ou toutes les fonctions radio sont mises en œuvre via un logiciel ou un micrologiciel programmable. Ces appareils comprennent des FPGA (Field Programmable Gate Array), DSP, GPP ou d'autres processeurs programmables. Avec le SDR, une nouvelle technologie peut être ajoutée à la technologie existante sans grande modification du matériel. La figure 7 montre l'architecture fonctionnelle générale de SDR. GNU Radio utilisé dans cette thèse est un type de SDR [18].

Dans notre étude, nous avons utilisé une plateforme de Radio Définie par Logiciel (SDR) pour simuler et analyser les communications V2X dans un environnement minier souterrain. La SDR offre une flexibilité et une capacité d'adaptation précieuses, permettant d'ajuster et de personnaliser les paramètres de communication en fonction des conditions spécifiques du canal de communication dans l'environnement minier souterrain. Nous avons utilisé deux USRP N210, qui sont des dispositifs SDR, pour mettre en place notre système de sondage des canaux. L'USRP N210 a été choisi en raison de sa bande passante élevée et de sa capacité à traiter un large éventail de fréquences, ce qui est crucial pour analyser les communications V2X dans un environnement minier souterrain.

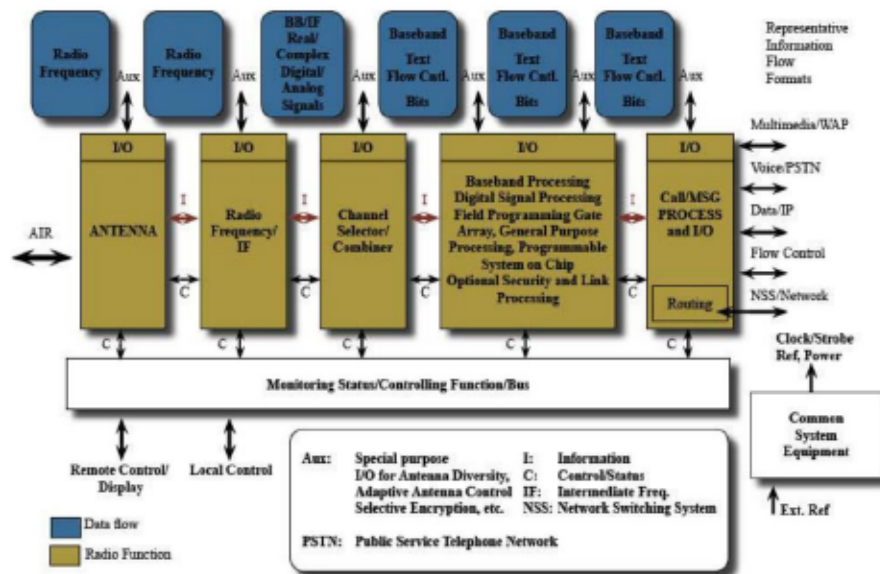


Figure 7 : Architecture fonctionnelle générale de SDR.

2.1.2. Sondage des canaux

Le sondage des canaux est une technique importante pour caractériser les canaux sans fil. Il permet de mesurer les propriétés du canal telles que la réponse impulsionnelle, l'étalement de retard, et la propagation Doppler. Le sondage des canaux est essentiel pour la conception et l'optimisation des systèmes de communication sans fil, car il fournit des informations précieuses sur les conditions de propagation et les caractéristiques du canal.

Essentiellement, les canaux de communication radio mobile sont des canaux d'évanouissement par trajets multiples variant dans le temps. Dans un système de communication sans fil, il existe de nombreux chemins pour qu'un signal se déplace d'un émetteur à un récepteur. Parfois, il existe un chemin direct pour que le signal se déplace sans être obstrué. Dans la plupart des cas, les composants du signal sont réfléchis par le sol, des objets tels que des bâtiments, des véhicules, des collines, etc. entre l'émetteur et le récepteur, ou réfractés par diverses couches atmosphériques. Ces composants se déplacent de différentes manières et se rejoignent au niveau du

récepteur. Chaque chemin a une longueur physique différente. Par conséquent, les signaux sur chaque chemin subissent des retards de propagation différents en raison de leur vitesse de propagation finie. L'hétérodyne de ces signaux au niveau du récepteur provoque des interférences destructives ou constructives, selon les retards relatifs impliqués. Le fait que l'environnement change avec le temps entraîne une modification du signal. C'est ce qu'on appelle une variante temporelle. Le signal est également affecté par le mouvement du terminal. Un déplacement sur une courte distance peut évidemment modifier le chemin de propagation et modifier la force du signal reçu.[19]

2.1.4 PN séquence

Les séquences PN sont des séquences binaires pseudo-aléatoires qui présentent des propriétés d'autocorrélation et de corrélation croisée intéressantes. Les séquences PN sont utilisées dans diverses applications de communication, telles que le sondage des canaux, la synchronisation, et l'accès multiple par répartition en code (CDMA). Les séquences PN offrent des avantages tels que la résistance aux interférences, la faible probabilité de détection et la capacité de supporter de multiples utilisateurs simultanés.[20]

Le scénario idéal pour une séquence d'étalement est une séquence aléatoire de 0 et de 1. L'émetteur et le récepteur doivent avoir la même séquence d'étalement. Autrement dit, l'émetteur et le récepteur ont besoin d'un moyen de générer le même flux binaire des deux côtés tout en préservant les propriétés de la séquence aléatoire. Le générateur PN fait ce travail. Un générateur PN génère un code d'étalement avec une séquence aléatoire de 0 et de 1. Une séquence PN est générée à l'aide d'une valeur initiale appelée graine. Cet algorithme ne génère pas de séquences parfaitement aléatoires, mais il passe de nombreux tests d'aléa. Ces nombres sont appelés nombres pseudo-bruit ou nombres pseudo-aléatoires.[21] La séquence ne peut pas être prédite si l'algorithme ou la graine est inconnu. Une propriété importante des séquences PN est

leur caractère aléatoire et imprévisible. Pour générer une séquence aléatoire, la séquence doit être statistiquement aléatoire. Il existe deux critères pour valider une séquence de nombres comme aléatoire. Ce sont l'uniformité et l'indépendance. Même la distribution signifie que la séquence doit être cohérente. C'est-à-dire que la fréquence d'apparition de chaque nombre doit être la même. Une propriété indépendante signifie que sa valeur ne peut pas être dérivée d'autres valeurs [22].

Dans notre méthode, nous avons utilisé la technique de sondage des canaux pour évaluer la qualité des communications sans fil dans un environnement minier. Le sondage des canaux utilise une séquence pseudo-aléatoire (PN) pour évaluer les caractéristiques du canal sans fil, telles que l'affaiblissement du signal, le délai et la bande passante de cohérence.

2.2. Matériel et logiciel

2.2.1. Ubuntu

Ubuntu Desktop est une distribution Linux développée par Canonical, et c'est l'une des distributions les plus populaires, grâce à sa facilité d'utilisation. C'est aussi l'un des meilleurs choix pour les personnes qui débutent avec Linux. L'édition serveur, sur laquelle nous ne nous concentrerons pas ici, fonctionne également sur la majorité des serveurs Internet. Les applications les plus populaires disponibles sur Windows et MacOS, telles que Chrome, Slack, VSCode, Spotify, etc., sont également disponibles sur Ubuntu. Le système d'exploitation est livré avec son magasin appelé "Ubuntu Software", qui vous permet de rechercher et d'installer des applications en quelques clics. Même si vous ne trouvez pas vos applications préférées, vous pourriez tomber sur leurs alternatives, que vous pourriez finir par aimer davantage. L'un des inconvénients de l'utilisation du logiciel Ubuntu est qu'il vous permet uniquement d'installer des applications sous forme de Snap. Les installations Snap ont leurs avantages, mais elles ont tendance à être lentes et nécessitent un espace de stockage important par rapport aux installations d'applications normales. Pour cette raison,

certaines utilisateurs de Linux refusent d'exécuter Ubuntu. Mais ne vous inquiétez pas, vous n'êtes pas limité à utiliser uniquement Snaps. La plupart des applications populaires disponibles sur Linux proposent un fichier d'installation DEB. Considérez DEB comme l'équivalent d'un fichier EXE sous Windows ou d'un fichier AppImage sous macOS. Tout ce que vous avez à faire est de télécharger, de double-cliquer pour l'ouvrir et de cliquer sur "Installer". Ubuntu is a free-to-use and ad-free operating system, unlike Windows. If you recently purchased a new PC that you intend to use for basic tasks, instead of buying a Windows license, you can try out Ubuntu.[23] Dans notre projet, nous utilisons Ubuntu pour configurer et exécuter les environnements de travail nécessaires à la mise en œuvre de notre système de communication sans fil.

2.2.2. GNU Radio

GNU Radio est un SDR open source qui s'exécute dans l'environnement UNIX et implémente des blocs de traitement de signal numérique. L'avantage de GNU Radio est qu'il s'agit d'une boîte à outils de développement de logiciels open source. Il peut être utilisé avec du matériel RF externe tel que l'USRP pour créer un SDR [20]. GNU Radio a une communauté très active qui travaille à l'amélioration de GNU Radio et au partage d'idées. Pour soutenir et développer davantage GNU Radio, Matt Ettus, membre de l'équipe GNU Radio, a fondé une société appelée EETUS Research LLC et a fondé l'USRP. GNU Radio se compose d'un frontend Python et d'un backend C++. Le traitement du signal est implémenté en C++. Les blocs de traitement du signal sont organisés, connectés via Python [24]. Cela permet aux développeurs de créer des radios définies par logiciel prêtes à l'emploi et faciles à mettre en œuvre. Dans notre projet, nous utilisons GNU Radio pour concevoir et mettre en œuvre le système de sondage de canal et les autres techniques de communication sans fil.

2.2.2.1. Utilisation de GNU Radio

GNU Radio est utilisé à la fois dans des environnements académiques et commerciaux. GNU Radio est utilisé à la fois à des fins de recherche et pour la communication sans fil en temps réel. Certains des projets GNU Radio en cours sont [25].

1. GNU Radio est utilisé avec les formes d'onde TDMA (Time Division Multiple Access).
2. GNU Radio, utilisé dans le système RADAR, utilise les émissions de télévision comme source.
3. GNU Radio est utilisé en radioastronomie
4. GNU Radio est utilisé par les émetteurs-récepteurs radio amateurs.
5. GNU Radio est utilisé pour la mesure distribuée de l'utilisation des fréquences.
6. GNU Radio est utilisé dans les détecteurs et lecteurs RFID.
7. GNU Radio est utilisé avec le logiciel GPS (Global Positioning System).
8. GNU Radio est utilisé avec le traitement MIMO (Multiple Input Multiple Output).

2.2.2.2. Types de blocs dans GNU Radio

GNU Radio se compose de plusieurs blocs de traitement de signal intégrés. Les blocs de traitement du signal de GNU Radio peuvent être classés en fonction du rapport entre le nombre d'entrées et le nombre de sorties pour chaque bloc de traitement du signal. Plusieurs types de blocs de traitement du signal sont disponibles. Synchronisation, décimation, interpolation et blocs généraux.

Un bloc générique, défini comme `gr_block` dans GNU Radio, est une classe C++ abstraite. C'est la classe de base pour tous les blocs de traitement du signal. Le bloc de synchronisation, défini comme `gr_sync_block` dans GNU Radio, est une classe C++. `gr_sync_block` est dérivé de `gr_block`. Les blocs synchrones ont un rapport entrée/sortie 1:1 et un historique optionnel. Le bloc de décimation défini dans GNU Radio comme `gr_sync_decimator` est une classe C++. `gr_sync_decimator` est dérivé de `gr_sync_block`. Les blocs synchrones ont un rapport entrée/sortie de N:1 et ont un historique optionnel. Le bloc interpolateur défini dans GNU Radio comme `gr_sync_interpolator` est une classe C++. `gr_sync_interpolator` est dérivé de `gr_sync_block`. Les blocs synchrones ont un rapport entrée/sortie de 1: N et ont un historique facultatif.

2.2.3. USRP

Universal Software Radio Peripheral (USRP) est un système SDR relativement peu coûteux développé par Ettus Research, une société américaine dirigée par Matt Ettus. Le système se compose d'une carte mère avec un FPGA, de deux paires de ses DAC et ADC, d'un convertisseur abaisseur et d'un convertisseur élévateur numériques avec des taux d'interpolation programmables et d'une carte fille qui agit comme frontal RF. La connexion au PC se fait via un câble Ethernet. Selon le type de carte fille, elle peut atteindre une fonctionnalité d'émetteur-récepteur de 1 MHz à 5,9 GHz.[26]



Figure 8 : *USRP N210.*

2.2.3.1. USRP N210

Universal Software Radio Peripheral (USRP) est un système SDR relativement peu coûteux développé par Ettus Research, une société américaine dirigée par Matt Ettus. Le système se compose d'une carte mère avec un FPGA (Le FPGA est un élément clé de l'USRP, fournissant la logique de synchronisation pour l'horloge, le débit de la puce, le débit en bauds et la synthèse des intervalles de temps ainsi que le traitement du signal numérique.), de deux paires de ses DAC et ADC, d'un convertisseur abaisseur et d'un convertisseur élévateur numériques avec des taux d'interpolation programmables et d'une carte fille qui agit comme frontal RF. La connexion au PC se fait via un câble Ethernet. Selon le type de carte fille, elle peut atteindre une fonctionnalité d'émetteur-récepteur de 1 MHz à 5,9 GHz. J'ai utilisé dans mon projet USRP N210.[27]

2.2.3.2. Carte mère USRP N210

Le "cœur" de l'USRP, la carte mère, est l'endroit où tous les circuits sont intégrés. Installé la carte fille. La carte mère N210 prend en charge le port MIMO (Multiple Input - Multiple Output) qui peut être utilisé pour connecter plusieurs systèmes USRP. Pour les applications où une synchronisation précise est essentielle, une entrée vers l'option d'horloge de référence externe est prise en charge. Le N210 communique avec votre PC via une interface Gigabit Ethernet avec un ensemble de connecteurs à l'avant de la carte. L'interface Ethernet peut transférer simultanément jusqu'à 50 MHz de bande passante dans et hors de la radio. La figure 9 montre une image de la carte mère N210. Chaque carte mère USRP N210 dispose de deux emplacements pour carte fille. Les cartes filles de transmission uniquement et de réception uniquement occupent un emplacement et les émetteurs-récepteurs occupent deux emplacements. C'est-à-dire qu'il peut implémenter à la fois l'expéditeur et le destinataire dans l'USRP.

Carte mère USRP N210 RFX2400 : Cette carte supporte la gamme de fréquences de 2,3 à 2,9 GHz, ce qui la rend appropriée pour notre projet dans le domaine des communications sans fil.



Figure 9 : Carte mère USRP N210 RFX2400

2.2.4. Matlab

Matlab (Matrix Laboratory) est un environnement de programmation et de simulation numérique développé par MathWorks. Il est largement utilisé dans les domaines de la recherche et du développement en ingénierie et en sciences. Matlab offre une plate-forme puissante pour l'analyse de données, la modélisation, la

simulation et la visualisation grâce à sa capacité à traiter des matrices et des tableaux de grande taille, ainsi qu'à sa vaste bibliothèque de fonctions mathématiques et d'outils graphiques.[29]

Dans notre projet, nous utilisons Matlab pour plusieurs tâches, telles que :

Analyse des données : Matlab nous permet d'importer, de traiter et d'analyser les données collectées lors des expérimentations. Nous utilisons différentes fonctions et routines de Matlab pour calculer les statistiques descriptives, effectuer des tests d'hypothèse et estimer les paramètres du modèle.

Visualisation : Matlab offre une variété d'outils graphiques pour visualiser les données et les résultats de l'analyse. Dans notre projet, nous utilisons ces outils pour créer des graphiques, des diagrammes et des cartes de propagation qui permettent de mieux comprendre les caractéristiques du canal sans fil et les performances de notre système de communication.

Traitement du signal : Matlab offre également une vaste bibliothèque de fonctions pour le traitement du signal. Nous utilisons ces fonctions pour effectuer des opérations telles que la transformation de Fourier, la corrélation et la convolution afin d'analyser les signaux reçus et d'estimer les paramètres du canal.

Interfaçage avec d'autres logiciels : Matlab permet également l'interfaçage avec d'autres logiciels et environnements de programmation, tels que GNU Radio et Python. Dans notre projet, nous utilisons cette fonctionnalité pour intégrer les données collectées à l'aide des dispositifs USRP et du logiciel GNU Radio dans nos analyses Matlab.

2.2.5. Antenne omnidirectionnelle extérieure

L'antenne omnidirectionnelle extérieure utilisée dans notre projet est un élément crucial pour assurer une communication sans fil efficace et fiable. Cette antenne est conçue pour couvrir une large gamme de fréquences et offrir un gain élevé, permettant ainsi une transmission de données stable et de haute qualité sur de longues distances. Voici une description détaillée de l'antenne omnidirectionnelle extérieure utilisée dans notre étude :

Gamme de fréquences : L'antenne couvre une large gamme de fréquences allant de 698 MHz à 2700 MHz. Cette large couverture de fréquences permet d'utiliser l'antenne pour différentes applications et technologies de communication sans fil, telles que les réseaux cellulaires 4G et 5G, les systèmes Wi-Fi et les réseaux de communication de données sans fil.

Gain : L'antenne omnidirectionnelle extérieure offre un gain de 9 dBi, ce qui permet d'augmenter la portée de transmission et de réception des signaux sans fil. Ce gain élevé est particulièrement important dans les environnements miniers souterrains, où la propagation des signaux est affectée par les conditions difficiles et les obstacles présents dans ces environnements.

Puissance d'entrée maximale : L'antenne peut gérer une puissance d'entrée maximale de 100 watts, ce qui permet de transmettre des signaux à haute puissance sans endommager l'antenne ou affecter sa performance.

Connecteur : L'antenne est équipée d'un connecteur N-F, qui est un type de connecteur coaxial largement utilisé pour les applications de communication sans fil. Ce connecteur permet une connexion fiable et robuste entre l'antenne et les dispositifs de communication, tels que les unités USRP N210.

Fabricant : L'antenne omnidirectionnelle extérieure est fabriquée par Lychee Ltd, une entreprise spécialisée dans la conception et la production d'antennes et d'équipements de communication sans fil de haute qualité.

En somme, l'antenne omnidirectionnelle extérieure joue un rôle essentiel dans notre projet en garantissant une communication sans fil efficace et fiable dans l'environnement minier souterrain. Sa large couverture de fréquences, son gain élevé et sa capacité à gérer des puissances d'entrée élevées en font un choix idéal pour les applications de communication dans des conditions difficiles et exigeantes.



Figure 10 : *Antenne omnidirectionnelle extérieure*

2.2.6. Outils utilisés dans le cadre du projet

Nos plateformes SDR (USRP N210) ont été connectées à deux ordinateurs exécutant Ubuntu 20.04. Nous avons privilégié Ubuntu en raison de sa stabilité, de sa sécurité et de sa compatibilité avec un large éventail de logiciels open source.

Pour la mise en œuvre du sondage des canaux et la génération de la séquence PN, nous avons utilisé GNU Radio, un framework open source pour la radio logicielle. Grâce à GNU Radio, nous avons pu construire des schémas pour notre technique de sondage de canal, impliquant un émetteur (TX) et un récepteur (RX).

Pour l'analyse des données collectées, nous avons opté pour MATLAB, un environnement de calcul numérique. À l'aide de MATLAB, nous avons effectué les calculs du retard moyen quadratique (RMS) et de l'effet Doppler à partir des données de signal reçues.

Nous avons utilisé une antenne omnidirectionnelle extérieure pour nos USRP. Cette utilisation a permis de simuler fidèlement les conditions de signalisation en milieu minier souterrain, où les signaux doivent être capables de se propager dans toutes les directions.

En somme, cette combinaison de matériel et de logiciel nous a permis de mettre en œuvre efficacement notre méthodologie et d'analyser de manière précise la performance des communications V2X dans un environnement minier souterrain.

CHAPITRE 3

ANALYSE ET MISE EN ŒUVRE DU SONDEUR DE CANAL POUR LES COMMUNICATIONS V2X SOUTERRAINES

3.1. Schéma fonctionnel

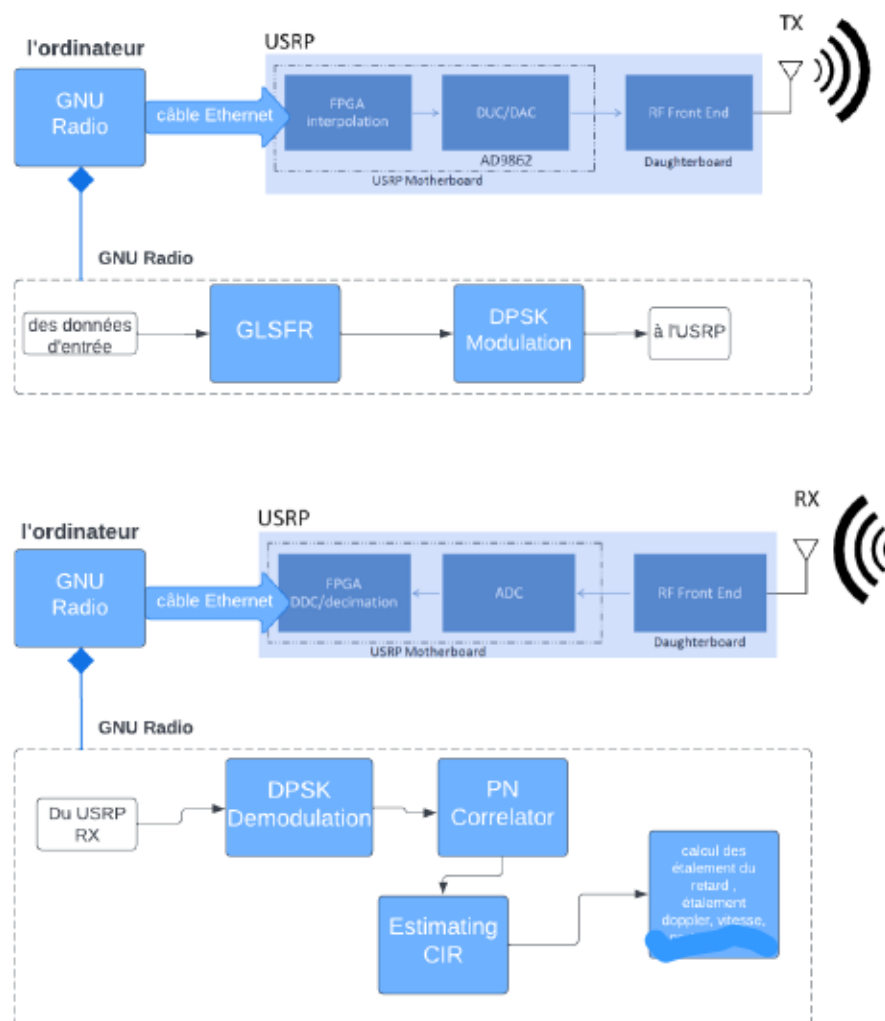


Figure 11 : Schéma fonctionnel

Le schéma fonctionnel de notre projet présente le processus de transfert du sondeur de canal entre deux USRP N210 avec des cartes RFX2400 (2.3 ~ 2.9 GHz) connectées à deux ordinateurs PC exécutant Ubuntu 20 et utilisant GNU Radio. Le schéma fonctionnel se compose de deux parties principales : l'émetteur (TX) et le récepteur (RX). Voici les principales étapes du processus :

1. Configuration des USRP N210 et des antennes en utilisant les outils de configuration de GNU Radio, tels que `uhd_usrp_probe` et `uhd_find_devices`.
2. Création d'un graphique de flux de travail en utilisant le GNU Radio Companion (GRC) pour la modulation et la transmission des données. Ce graphique de flux de travail devrait inclure des blocs pour la génération de données aléatoires, la modulation GLSFS et DPSK, et la transmission des données via les USRP N210 et les antennes.
3. Du côté de l'émetteur, utilisation d'un bloc GLSFR pour générer un code PN avec une séquence de longueur $L = 2^n - 1 = 1023$ ($n = 10$). La fonction de corrélation croisée de ce code pseudo-conséquentiel est presque identique à la fonction delta de Dirac. Utilisation d'un modulateur DPSK pour moduler le code PN et d'un bloc USRP SINK pour transmettre le signal modulé via l'antenne.
4. Du côté récepteur, utilisation d'un bloc USRP Source pour recevoir le signal transmis, puis connexion de la sortie de la source USRP à un démodulateur DPSK pour démoduler le signal reçu.
5. Utilisation d'un bloc corrélateur PN pour effectuer la synchronisation et estimer la réponse impulsionnelle du canal CIR.
6. Utilisation d'un bloc récepteur de fichier pour enregistrer le CIR estimé et le décalage de fréquence Doppler, qui peuvent être calculés à partir du CIR.

7. Utilisation de MATLAB pour lire le décalage de fréquence CIR et Doppler à partir du fichier et calculer la propagation du retard RMS, qui est une mesure de la dispersion du canal dans le temps. MATLAB est un outil puissant qui permet d'effectuer des analyses et des calculs complexes sur les données recueillies.

Le système opère à une fréquence centrale de 2,6 GHz avec une fréquence d'échantillonnage de 5 MHz. L'ensemble du processus permet de caractériser les propriétés du canal de communication dans l'environnement minier souterrain en utilisant la technique de sondage de canal. Ce scénario présente une méthode envisageable pour transférer un sondeur de canal à l'aide de GNU Radio et USRP N210s.

3.2. Équations et architecture

Le succès des communications sans fil dans les environnements complexes et exigeants, tels que les mines souterraines, repose largement sur notre capacité à comprendre et à caractériser les propriétés du canal de communication. Une compréhension approfondie de la propagation des ondes et des effets de l'environnement sur le signal peut aider à concevoir et à optimiser des systèmes de communication plus robustes et efficaces.

Dans ce projet, notre attention est portée sur la caractérisation du canal de communication en utilisant la technique de sondage de canal, qui consiste à envoyer un signal de sondage connu et à analyser le signal reçu pour en déduire les propriétés du canal. Les paramètres clés d'intérêt dans cette étude sont la Réponse Impulsionnelle du Canal (CIR), l'étalement du retard RMS et la fréquence Doppler moyenne. La CIR est une représentation temporelle du canal qui décrit comment les signaux se propagent dans le milieu de transmission en fonction du temps. L'étalement du retard RMS est une mesure de la dispersion temporelle du canal, reflétant la variabilité des trajets

multipath. La fréquence Doppler moyenne quantifie l'effet Doppler, qui est lié à la vitesse relative entre l'émetteur et le récepteur.

En combinant ces paramètres, nous pouvons obtenir une image complète des caractéristiques du canal et utiliser ces informations pour optimiser la performance des systèmes de communication sans fil dans les environnements miniers souterrains.

Les méthodes d'estimation de la CIR peuvent être divisées en deux types : aveugle et non aveugle. [30]

❖ Méthode à l'aveugle

Les méthodes aveugles permettent d'obtenir des estimations de réponse de canal sans transmettre les pilotes ou les séquences de formation. Ces méthodes permettent d'estimer cette réponse à partir des échantillons reçus. La probabilité maximale (ML) fonctionne bien pour l'estimation à l'aveugle.

❖ Méthode Non aveugle

Une estimation non aveugle utilise un pilote ou une séquence de formation pour estimer sa DIC. Cette approche est l'une des méthodes les plus étudiées pour les canaux variant dans le temps.

Nous utiliserons dans ce qui suit la méthode non aveugle.

La réponse impulsionnelle de canal (CIR), représentée par $h(t, \tau)$ dans l'équation 1, décrit le nombre de chemins empruntés par un signal pour se propager, l'atténuation sur chaque chemin, et le délai relatif entre les chemins.[31]

$$h(t, \tau) = \sum_{i=1}^L a_i(t) \delta(\tau - \tau_i) \quad (1)$$

Où t est le temps, τ est le délai, $a_i(t)$ est l'atténuation complexe variable dans le temps pour le chemin i , la fonction delta $\delta(\tau - \tau_i)$ représente le chemin i , le délai est τ_i , et L est le nombre de chemins.

3.2.1 fréquence doppler

La fréquence doppler est un phénomène qui se produit lorsqu'une onde électromagnétique se propage entre un émetteur et un récepteur en mouvement relatif l'un par rapport à l'autre. Dans les réseaux v2x (vehicle-to-everything), qui englobent la communication entre véhicules et infrastructures, la fréquence doppler joue un rôle essentiel pour estimer et corriger les effets du mouvement des véhicules sur la qualité du signal reçu. Les variations de la fréquence doppler peuvent causer des erreurs de démodulation, des fluctuations de la puissance reçue et des variations temporelles des caractéristiques du canal. [32]

La fréquence Doppler est un paramètre important pour caractériser les variations de fréquence des signaux reçus dues au mouvement relatif entre l'émetteur et le récepteur. Elle est définie comme suit :

$$F_d = \frac{v(v \mp v') \times \cos(\theta \mp \theta') \times f_c}{c} \quad (2)$$

Où F_d est la fréquence Doppler, v est la vitesse relative entre l'émetteur et le récepteur (en m/s) v' vitesse avec erreurs, f_c est la fréquence porteuse et, $\cos(\theta \mp \theta')$ avec θ angle entre TX et RX et θ' angle avec erreurs, et C est la vitesse de la lumière.

La fréquence Doppler est un phénomène important dans les systèmes de communication sans fil, en particulier dans les environnements où les objets et/ou les émetteurs-récepteurs sont en mouvement. Le décalage Doppler est provoqué par la variation de la fréquence du signal reçu par rapport à la fréquence du signal émis, en

raison du mouvement relatif entre l'émetteur et le récepteur. Ce décalage de fréquence peut avoir un impact significatif sur la qualité et la fiabilité de la communication.

Dans le cadre de notre projet visant à caractériser les propriétés du canal de communication dans un environnement minier souterrain en utilisant la technique de sondage de canal, la fréquence Doppler peut apporter des informations précieuses sur les conditions du canal. En effet, les conditions d'un environnement minier souterrain peuvent varier considérablement en raison de facteurs tels que la présence d'obstacles, de réflecteurs et de diffuseurs, ainsi que des changements dans l'environnement dus au mouvement des équipements et des personnes.

En analysant la fréquence Doppler des signaux reçus, nous nous pouvons approfondir de l'effet des conditions du canal sur la communication sans fil. Ces informations peuvent être exploitées pour optimiser la conception et la performance des systèmes de communication sans fil pour les environnements miniers souterrains.

Nous utilisons GNU Radio et les USRP N210 pour émettre et recevoir des signaux de sondage de canal. Les données extraites sont ensuite traitées à l'aide de MATLAB pour calculer la fréquence Doppler en fonction du temps. Cette analyse nous permet de caractériser les conditions du canal et d'étudier l'impact du mouvement relatif entre les émetteurs et les récepteurs sur la communication sans fil.

Pour calculer la fréquence Doppler à partir des données extraites de GNU Radio, nous utilisons la Transformée de Fourier à Court Terme (STFT) [33] pour obtenir le spectrogramme du signal reçu. Le code MATLAB suivant résume les étapes de calcul:

1. Définissez les noms de fichiers et les paramètres initiaux, tels que la fréquence d'échantillonnage, la longueur de la fenêtre et le chevauchement des fenêtres pour la STFT.
2. Lisez les données binaires à partir du fichier et convertissez-les en un format complexe, si nécessaire.

3. Calculez le spectrogramme en utilisant la fonction 'spectrogram'.
4. Trouvez la fréquence Doppler en prenant la valeur maximale de chaque colonne du spectrogramme.
5. Tracez la fréquence Doppler en fonction du temps pour chaque fichier.

La transformée de Fourier à court terme (STFT) est une technique d'analyse de signal qui permet d'examiner la manière dont les fréquences d'un signal varient avec le temps. Elle est particulièrement utile pour analyser des signaux non stationnaires, c'est-à-dire des signaux dont les propriétés statistiques changent au cours du temps. La STFT est une extension de la transformée de Fourier, qui donne une représentation du signal uniquement dans le domaine fréquentiel, sans aucune information sur le temps.

La STFT est définie comme le produit de la transformée de Fourier d'un signal $x(t)$ et d'une fenêtre $w(t)$ glissante. Mathématiquement, la STFT est donnée par :

$$STFT\ x(t, f) = \int x(\tau) \times w(\tau - t) \times e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (3)$$

Où t est le temps, f est la fréquence, τ est une variable d'intégration et j est l'unité imaginaire. La fenêtre $w(t)$ est une fonction qui a une amplitude non nulle sur une plage de temps limitée et qui est centrée autour de t .

L'utilisation d'une fenêtre glissante permet de conserver l'information temporelle lors de l'analyse du signal. En faisant varier la position de la fenêtre $w(t)$ le long du signal $x(t)$, nous obtenons des informations sur la manière dont les fréquences du signal varient avec le temps. La largeur de la fenêtre détermine la résolution temporelle de la STFT. Une fenêtre plus courte donne une meilleure résolution temporelle, mais une moins bonne résolution en fréquence, et vice versa.

La STFT, utilisée pour calculer le spectrogramme, qui est une représentation du signal dans le domaine temps-fréquence. Le spectrogramme est obtenu en calculant le carré de la magnitude de la STFT :

$$S(t, f) = |STFT x(t, f)|^2 \quad (4)$$

Le spectrogramme permet d'extraire les informations sur la fréquence Doppler contenues dans le signal reçu. En examinant les variations de la fréquence Doppler avec le temps, la fréquence Doppler est déterminée en prenant la valeur maximale de chaque colonne du spectrogramme. Mathématiquement, cela peut être exprimé comme suit :

$$F_d = \text{Max } S(t, f) \quad (5)$$

Ces équations sont utilisées dans le code MATLAB pour analyser les données extraites de GNU Radio et déterminer la fréquence Doppler en fonction du temps pour chaque fichier de données.

La fréquence Doppler a un impact significatif sur les performances du système V2X souterrain. Les variations rapides de la fréquence Doppler peuvent entraîner une dégradation de la qualité du signal reçu, provoquant des erreurs de démodulation, une mauvaise synchronisation et une diminution du débit de données. Dans les environnements souterrains, ces effets sont amplifiés en raison de la réflexion, de la diffraction et de la diffusion des ondes par les parois et les obstacles, ce qui rend le canal de propagation hautement dispersif et variant rapidement.

Le code fourni calcule d'abord le décalage Doppler pour chaque fenêtre de temps en utilisant la STFT, puis affiche les résultats dans un graphique. Ce graphique permet de suivre l'évolution du décalage Doppler dans le temps et d'analyser son impact sur les performances du système V2X souterrain. Les résultats peuvent être utilisés pour optimiser la conception du système, notamment en choisissant des techniques de modulation et de codage appropriées, en adaptant les algorithmes de synchronisation et d'égalisation, ainsi qu'en améliorant les stratégies de gestion de la mobilité.

3.2.2 Étalement du retard RMS (RMS Delay Spread) et Coherence Bandwidth (Bande de cohérence)

L'étalement du retard RMS est une mesure statistique qui permet de quantifier la dispersion temporelle des signaux multipath dans un canal de propagation. Il est essentiel pour évaluer les performances des systèmes de communication, y compris les réseaux V2X souterrains, car il est directement lié à la sélectivité en fréquence du canal et à la qualité de la réception du signal.

La bande de cohérence est une mesure de la largeur de bande sur laquelle les caractéristiques du canal de propagation sont considérées comme constantes. Elle est directement liée à la dispersion temporelle du canal et est utilisée pour déterminer si un signal subira ou non un évanouissement sélectif en fréquence. Dans les réseaux V2X, la bande de cohérence est importante pour la sélection des techniques de modulation, de codage et d'égalisation qui sont robustes face à l'évanouissement sélectif et aux variations rapides du canal. [34]

L'étalement du retard RMS est déterminé en calculant la largeur de bande de cohérence à 90 % (BC) et en utilisant la relation suivante :

$$RMS \simeq \frac{1}{Bc} \quad (6)$$

Dans le code fourni, la largeur de bande de cohérence est calculée en identifiant l'indice où 90 % de l'énergie totale de l'autocorrélation du canal est atteinte. L'étalement du retard RMS est ensuite déterminé en prenant l'inverse de la largeur de bande de cohérence.

La réponse en fréquence du canal (H) est une mesure fondamentale pour caractériser les propriétés de transmission d'un canal de communication. Elle renseigne sur la manière dont les différentes fréquences se propagent dans le canal et sont

influencées par les phénomènes de propagation tels que l'atténuation, la dispersion et la réflexion.

Dans le code que nous avons fourni, la réponse en fréquence du canal (H) est calculée en utilisant la Transformée de Fourier Rapide (FFT). L'équation est la suivante :

$$H(\omega) = FFT(data_{complex}, window_{length}) \quad (7)$$

$H(\omega)$ représente la réponse en fréquence du canal à la fréquence angulaire ω . La fonction FFT prend en entrée les données complexes ($data_complex$) et la longueur de la fenêtre ($window_length$) pour effectuer la transformation de Fourier.

Les données complexes représentent les échantillons de signal reçus qui contiennent des informations sur l'amplitude et la phase du signal à différentes fréquences. La longueur de la fenêtre ($window_length$) offre la résolution en fréquence de la FFT, tandis qu'une fenêtre plus courte donne une résolution en fréquence plus grossière.

L'autocorrélation de la réponse en fréquence du canal (R) est une mesure importante pour évaluer les caractéristiques temporelles du canal de communication. Elle permet d'estimer la similarité entre les différentes parties du canal à différents décalages temporels (retards). Cette information est essentielle pour comprendre comment les signaux se propagent dans le canal et comment ils sont affectés par les phénomènes de propagation.

Dans le code fourni, l'autocorrélation de la réponse en fréquence du canal (R) est calculée en utilisant la Transformée de Fourier Rapide Inverse (IFFT). L'équation est la suivante :

$$R(\tau) = IFFT(\| H(\omega) \|^2) \quad (8)$$

Ici, $R(\tau)$ représente l'autocorrélation de la réponse en fréquence du canal à un décalage temporel τ . La fonction *IFFT* prend en entrée le carré de la magnitude de la réponse en fréquence du canal $\|H(\omega)\|^2$ pour effectuer la transformation de Fourier inverse.

Le carré de la magnitude de la réponse en fréquence du canal $\|H(\omega)\|^2$ représente l'énergie contenue dans le signal à différentes fréquences. En appliquant la *IFFT* à cette énergie, nous obtenons une représentation temporelle de l'autocorrélation du canal, qui reflète la manière dont les propriétés du canal varient avec le temps.

Le calcul de l'énergie totale consiste à sommer les carrés des valeurs de l'autocorrélation (R). Cette énergie totale représente la puissance totale du signal dans le domaine temporel.

$$E_{Total} = \sum \|R(\tau)\|^2 \quad (9)$$

L'énergie cumulative est calculée en cumulant progressivement les carrés des valeurs de l'autocorrélation (R) jusqu'à ce que l'énergie accumulée atteigne 90% de l'énergie totale. Le $\tau_{90\%}$ obtenu correspond au seuil de cohérence temporelle pour 90% de l'énergie du signal.

$$E_{cumulative(\tau)} = \sum \|R(\tau')\|^2 \text{ where } \tau' \leq \tau \quad (10)$$

La bande de cohérence (BC) est ensuite calculée en divisant $\tau_{90\%}$ par la longueur de la fenêtre et en multipliant par la fréquence d'échantillonnage (F_s). La bande de cohérence représente la largeur de bande sur laquelle le canal peut être considéré comme cohérent.

$$BC = \frac{\tau_{90\%}}{window_length} \times F_s \quad (11)$$

L'étalement du retard RMS ($\sigma\tau$) est calculé en prenant l'inverse de la bande de cohérence (BC). L'étalement du retard RMS est une mesure qui caractérise la dispersion temporelle du signal à travers le canal de communication. Une valeur élevée de l'étalement du retard RMS indique que les composantes du signal reçu arrivent à des instants très différents, ce qui peut entraîner une dégradation des performances du système, en particulier dans les applications à haut débit.

$$\sigma\tau \approx \frac{1}{Bc} \quad (12)$$

En résumé, ces équations permettent de calculer la bande de cohérence et l'étalement du retard RMS lors des tests de déplacement du récepteur dans le contexte des communications V2X souterraines. La compréhension de ces paramètres est essentielle pour la conception et l'optimisation des systèmes de communication sans fil souterrains.

Dans cette partie, nous avons abordé les notions de l'étalement du retard RMS (RMS Delay Spread), de la bande de cohérence (Coherence Bandwidth) et de la fréquence Doppler, qui sont des paramètres clés pour caractériser les canaux de communication sans fil, notamment dans le contexte des applications V2X souterraines. L'étalement du retard RMS est une mesure de la dispersion temporelle du signal dans le canal, tandis que la bande de cohérence donne une indication de la largeur de bande sur laquelle les signaux sont fortement corrélés en fréquence. La fréquence Doppler, quant à elle, est liée à l'effet Doppler et caractérise la variation de fréquence due au mouvement relatif entre l'émetteur et le récepteur. [35]

Nous avons également exposé les équations utilisées pour calculer ces paramètres à partir des données expérimentales. Ces équations englobent la réponse en fréquence du canal (H), l'autocorrélation de la réponse en fréquence du canal (R), le calcul de la bande de cohérence à 90 %, et enfin, l'étalement du retard RMS. La compréhension et l'analyse de ces paramètres sont essentielles pour la conception et l'optimisation des

systèmes de communication sans fil souterrains, en particulier dans des environnements complexes et exigeants tels que les mines souterraines ou les tunnels.

3.3.Description du GNU radio block Diagram.

Dans le cadre de ce projet, l'objectif consiste à opérer le transfert d'un sondeur de canal entre deux USRP N210 équipés de cartes RFX2400, permettant de supporter des fréquences allant de 2,3 à 2,9 GHz. Pour mettre en œuvre cette transmission, deux PC exécutant Ubuntu 20 sont utilisés en conjonction avec le logiciel GNU Radio pour créer et analyser les signaux. Block Diagram Pour TX et block Diagram pour RX.

Le diagramme de blocs GNU Radio pour l'émetteur (TX) comprend les éléments suivants :

1. Un bloc GLFSR (Galois Linear Feedback Shift Register), qui génère une séquence pseudo-aléatoire (PN) de longueur 1024 avec un degré $n = 10$.
2. Un bloc de modulation PSK (Phase Shift Keying) pour moduler le signal binaire généré par le GLFSR.
3. Un bloc USRP Sink pour transmettre le signal modulé à l'aide de l'USRP N210.

Les paramètres de transmission utilisés sont une fréquence centrale de 2,6 GHz, une fréquence d'échantillonnage de 5 MHz et un gain TX de 70.

Le diagramme de blocs GNU Radio pour le récepteur (RX) comprend les éléments suivants :

1. Un bloc USRP Source pour recevoir le signal à l'aide de l'USRP N210.
2. Un bloc PSK Demod pour démoduler le signal PSK reçu.
3. Un bloc Correlator PN pour détecter la séquence PN dans le signal démodulé.
4. Un bloc File Sink pour enregistrer les données traitées dans un fichier.

Les paramètres de réception utilisés incluent un gain RX de 60

Grâce à cette architecture reposant sur GNU Radio et les USRP N210, le système offre la possibilité de caractériser le canal de communication sans fil en effectuant des mesures sur des paramètres tels que l'étalement du retard RMS, la bande de cohérence et la fréquence Doppler, comme il a été précédemment évoqué. [36]

3.3.1 Émetteur TX

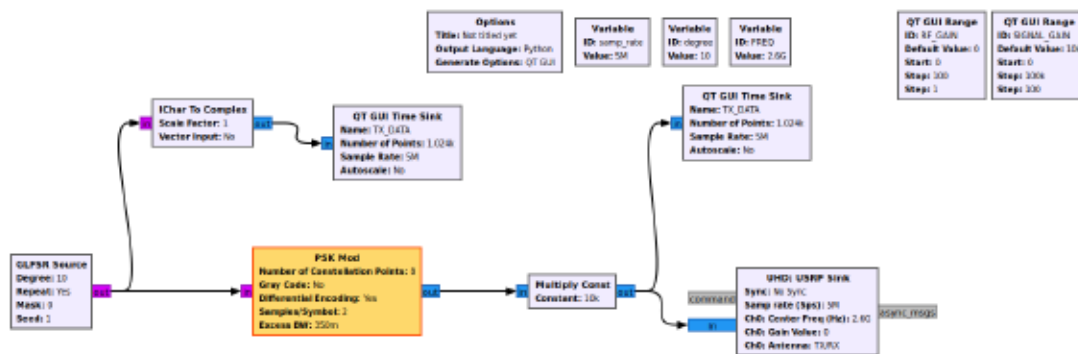


Figure 12 : Le diagramme de flux radio de l'émetteur GNU pour le sondeur de canal

Dans le but de réaliser un sondeur de canal, le graphique GNU Radio Flow, présenté à la Figure 12, est employé du côté de l'émetteur. Celui-ci est composé des blocs suivants : GLFSR Source, PSK Modulator, Multiply Const, UHD: USRP Sink et QT GUI Time Sink. Dans ce schéma, le bloc GLFSR Source génère une séquence pseudo-bruit (PN) $s[n] \in \{\pm 1\}$ de degré $n = 10$ et de longueur de bit L pour une séquence périodique, conforme à l'équation suivante :

$$L = 2^n - 1 \quad (13)$$

Le bloc PSK Modulator mappe les symboles de la séquence binaire PN générée par le bloc GLFSR sur une constellation BPSK. Par la suite, ce signal est multiplié par une constante via le bloc Multiply Const, puis transmis à l'aide de l'USRP avec un taux d'échantillonnage de 5 MHz. Ainsi, le code PN est généré et modulé dans le bloc émetteur (TX) avant d'être transmis via l'USRP à une fréquence porteuse de 2,6 GHz.

3.3.1.1 GLFSR bloc

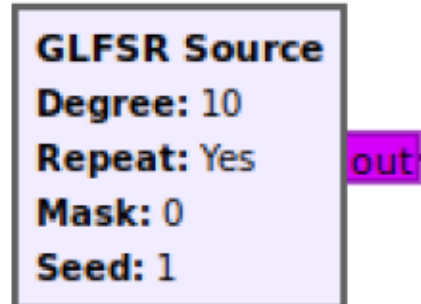


Figure 13 : Bloc source GLFSR

Le bloc GLFSR (Galois Linear Feedback Shift Register) revêt une importance capitale au sein de ce projet, car il est destiné à la génération d'une séquence pseudo-bruit (PN). Le GLFSR est un registre à décalage linéaire à rétroaction de Galois, qui est une implémentation particulière d'un registre à décalage linéaire à rétroaction (LFSR). À cet égard, un LFSR, en tant que circuit électronique simple et performant, a pour fonction de générer des séquences pseudo-aléatoires binaires en s'appuyant sur un ensemble restreint de registres et d'opérations linéaires.

Le GLFSR repose sur la représentation polynomiale de Galois, offrant ainsi une réalisation matérielle et logicielle plus efficace par rapport à la représentation traditionnelle de Fibonacci. Dans le contexte de ce projet, le GLFSR est configuré pour générer une séquence PN de degré $n = 10$, ce qui donne une longueur de séquence périodique $L = 2^n - 1$.

Les séquences PN générées par le bloc GLFSR présentent des caractéristiques remarquables telles que l'autocorrélation faible et la répartition uniforme des symboles. Ces propriétés confèrent aux séquences PN des qualités idéales pour les applications de sondeur de canal, car elles permettent une détection et une estimation précises des caractéristiques du canal, même en présence de bruit et d'interférences.

Dans ce projet, le bloc GLFSR est utilisé pour générer la séquence PN qui est ensuite mappée sur une constellation BPSK par le bloc PSK Modulator. Cette modulation permet d'obtenir un signal résistant aux interférences et aux effets du canal, facilitant ainsi l'analyse et la caractérisation du canal de communication. [37]

3.3.1.2 PSK Mod

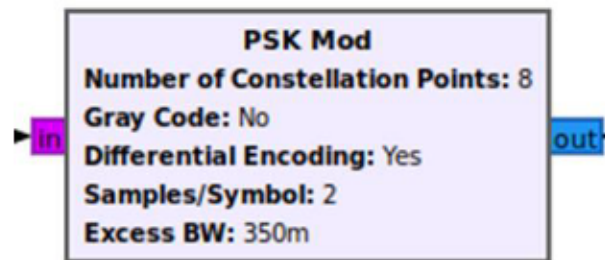


Figure 14 : Bloc PSK Mod

La modulation PSK (Phase Shift Keying) est une technique de modulation numérique utilisée pour transmettre des données en modifiant la phase d'une onde porteuse en fonction des symboles d'entrée. Dans ce projet, la modulation BPSK (Binary Phase Shift Keying) est utilisée, laquelle constitue un cas particulier de la modulation PSK, limitant les états de phase possibles à deux, correspondant aux symboles binaires 0 et 1. La modulation BPSK se révèle être une méthode à la fois robuste et simple pour transmettre des données numériques à travers un canal de communication.

Le bloc PSK Modulator est relié à la sortie du bloc GLFSR, lequel génère la séquence pseudo-bruit (PN). La séquence PN est ensuite mappée sur une constellation BPSK par le bloc PSK Modulator, transformant ainsi chaque bit de la séquence PN en un symbole de phase modulée. Dans le cas de la modulation BPSK, un bit '0' entraîne une phase de 0 degrés et un bit '1' entraîne une phase de 180 degrés. Le signal modulé en BPSK présente une résistance accrue aux interférences et aux effets du canal, ce qui

permet une analyse et une caractérisation plus précises du canal de communication. [38]

3.3.1.3 USRP Sink

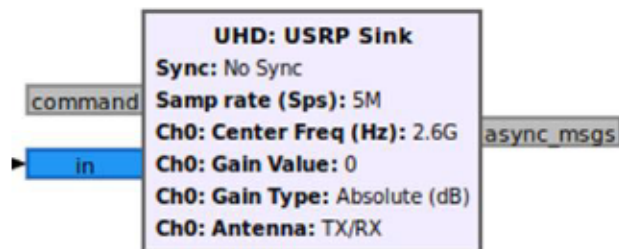


Figure 15 : Bloc UHD USRP Sink

Le bloc UHD : USRP Sink dans le diagramme de flux GNU Radio est utilisé pour transmettre le signal modulé en BPSK généré par le bloc PSK Modulator. Ce bloc est responsable de la conversion du signal numérique modulé en un signal analogique qui peut être transmis sur un canal de communication sans fil à l'aide du dispositif USRP (Universal Software Radio Peripheral).

L'entrée du bloc USRP Sink est reliée à la sortie du bloc PSK Modulator, qui fournit le signal BPSK modulé. Le bloc USRP Sink prend en charge plusieurs paramètres importants pour la transmission du signal, tels que la fréquence porteuse, le gain de transmission, le taux d'échantillonnage et le type de périphérique USRP utilisé. Dans ce projet, la fréquence porteuse est réglée à 2,6 GHz, le gain de transmission est fixé à 70, et le taux d'échantillonnage est de 5 MHz.

Le dispositif USRP N210 équipé d'une carte RFX2400, qui supporte les fréquences de 2,3 à 2,9 GHz, est utilisé pour transmettre le signal modulé en BPSK. Une fois que le bloc USRP Sink a reçu le signal modulé en BPSK, il envoie le signal au dispositif USRP, qui convertit le signal numérique en un signal analogique et l'émet sur le canal sans fil à la fréquence porteuse sélectionnée.

En résumé, le bloc USRP Sink présent dans le diagramme de flux GNU Radio joue un rôle essentiel dans la transmission du signal modulé en BPSK, généré par le bloc PSK Modulator. Il assure la conversion du signal numérique en un signal analogique compatible avec la communication sans fil, et il contrôle les paramètres de transmission pour garantir une caractérisation précise et efficace du canal de communication. [39]

3.3.2. Récepteurs RX

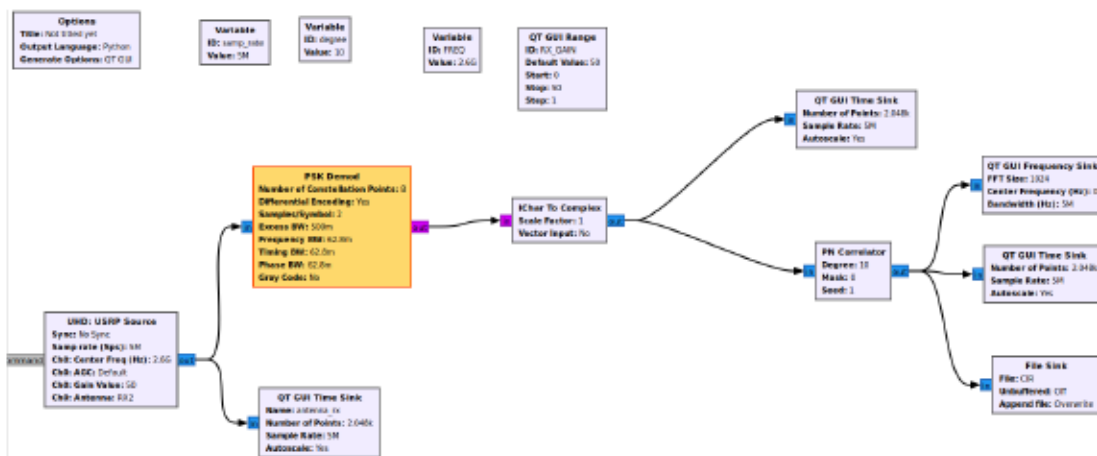


Figure 16 : Le diagramme de flux radio de récepteur GNU pour le sondeur de canal.

Le diagramme de flux GNU Radio pour le récepteur du sondeur de canal est présenté à la figure 16. Il comprend plusieurs blocs, tels que UHD: USRP Source, PSK Demodulation, PN Correlator, QT GUI Time Sink, QT GUI Frequency Sink et File Sink. Ce diagramme de flux est utilisé pour caractériser le canal de communication sans fil. Les données du CIR enregistrées dans le fichier sont traitées par un script Matlab pour calculer la fréquence Doppler, l'étalement du retard RMS (RMS Delay Spread) et Coherence Bandwidth (Bande de cohérence). Ces paramètres revêtent une importance cruciale pour évaluer les performances du système V2X souterrain et aider à la conception de systèmes de communication sans fil plus robustes et efficaces.

3.3.2.1. USRP source

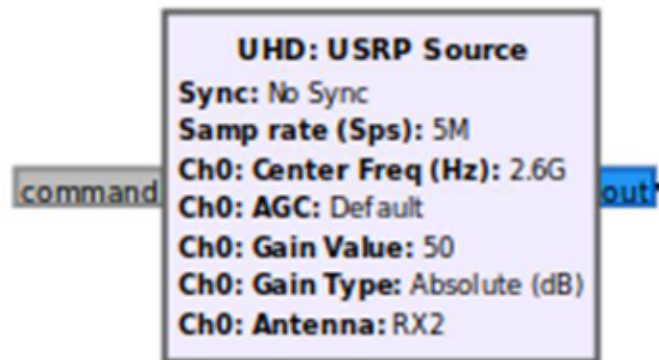


Figure 17 : Bloc UHD: USRP Source

Dans le projet de sondeur de canal, le bloc USRP Source joue un rôle crucial en tant que récepteur des signaux transmis. Ce bloc est utilisé pour interfacier le récepteur GNU Radio avec le matériel USRP N210 équipé d'une carte RFX2400, qui prend en charge les fréquences de 2,3 à 2,9 GHz.

Le bloc USRP Source reçoit les échantillons du signal radiofréquence (RF) à une fréquence d'échantillonnage de 5 MHz et une fréquence porteuse de 2,6 GHz. Les paramètres de ce bloc, tels que la fréquence d'échantillonnage, la fréquence porteuse, le gain de réception et l'adresse IP de l'USRP, sont configurés en fonction des exigences du projet et du matériel utilisé.

Le signal reçu par l'USRP est converti en une séquence d'échantillons complexes qui sont ensuite transmis au reste du diagramme de flux GNU Radio pour être traités. Ces échantillons complexes représentent la réponse du canal de communication sans fil entre l'émetteur et le récepteur.

Grâce à l'utilisation du bloc USRP Source, les chercheurs et ingénieurs ont la possibilité de caractériser et d'analyser les propriétés du canal sans fil dans diverses

conditions et environnements. Cette approche permet d'évaluer les performances du système V2X souterrain et de concevoir des systèmes de communication sans fil plus résilients et performants. [40]

3.3.2.2. PSK demodulator

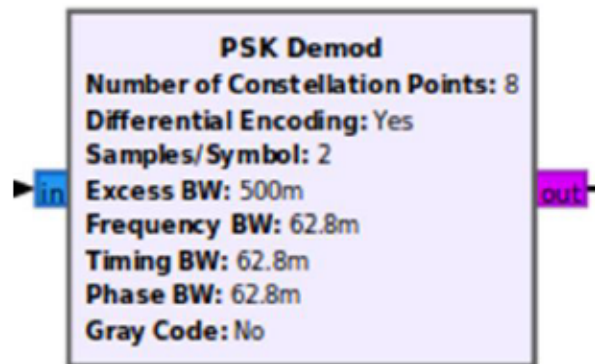


Figure 18 : Bloc PSK Demod

Dans le projet de sondeur de canal, le bloc PSK Demodulator est employé pour démoduler les signaux reçus par le bloc USRP Source. Il reçoit en entrée les échantillons complexes provenant du bloc USRP Source et procède à une démodulation PSK (Phase Shift Keying) afin d'extraire la séquence de bits d'origine.

La démodulation PSK consiste à détecter les changements de phase du signal reçu, lesquelles correspondent à la séquence de bits modulée. Dans ce projet, une modulation BPSK (Binary Phase Shift Keying) est utilisée, impliquant ainsi l'utilisation de deux phases distinctes pour représenter les deux valeurs binaires possibles (0 et 1). La démodulation BPSK représente une forme simplifiée de démodulation PSK, où chaque changement de phase correspond à un seul bit d'information.

Le bloc PSK Demodulator détecte ces changements de phase et produit en sortie une séquence de bits correspondant aux données originales modulées par l'émetteur.

Ces données démodulées sont par la suite transmises au bloc suivant, le corrélateur PN, afin d'estimer la réponse impulsionnelle du canal (CIR).

En utilisant le bloc PSK Demodulator dans le diagramme de flux GNU Radio, il devient possible de récupérer les informations de la séquence de bits d'origine à partir du signal reçu et d'analyser les propriétés du canal sans fil. Cela permet d'évaluer les performances du système V2X souterrain et de concevoir des systèmes de communication sans fil plus résilients et efficaces.

3.3.2.3 PN generator

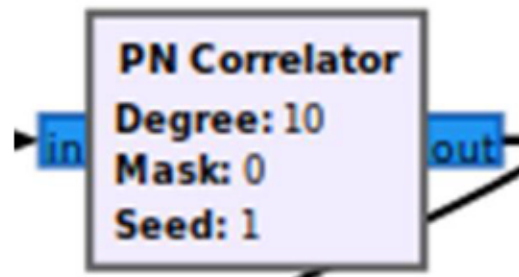


Figure 19 : Bloc PN correlator

Dans le projet de sondeur de canal, un générateur de séquence pseudo-bruit (PN) est employé pour créer une séquence de bits spécifique qui est ensuite modulée sur le signal à transmettre. Cette séquence, également appelée code PN, possède des propriétés intéressantes qui la rendent utile pour l'analyse des canaux de communication.

Un générateur de séquence PN est un dispositif électronique ou un algorithme qui produit une séquence de bits pseudo-aléatoire, avec une distribution uniforme des bits '0' et '1'. Les séquences PN sont utilisées pour de nombreuses applications, notamment le codage de l'étalement de spectre, les tests de circuits numériques et l'estimation des caractéristiques du canal sans fil.

Le générateur de séquence PN dans ce projet est implémenté à l'aide du bloc GLFSR (Galois Linear Feedback Shift Register) dans GNU Radio. Le bloc GLFSR produit une séquence de bits PN qui est ensuite modulée sur le signal à l'aide du bloc PSK Modulator. La séquence PN est utilisée pour estimer la réponse impulsionnelle du canal (CIR) à partir des signaux reçus, permettant d'évaluer les performances du système V2X souterrain et d'identifier les défis liés à la conception du système. [42]

3.3.2.4 FILE SINK



Figure 20 : Bloc File Sink

Le bloc File Sink dans GNU Radio est un élément important du système de sondeur de canal. En effet, il offre la possibilité d'enregistrer les données de sortie du bloc PN Correlator dans un fichier. Permettant ainsi une analyse ultérieure et un traitement approfondi de ces données.

Après avoir reçu le signal modulé via l'USRP Source et l'avoir démodulé avec le bloc PSK Demodulator, le signal est ensuite envoyé au bloc PN Correlator. Ce bloc effectue une corrélation entre le signal reçu démodulé et la séquence PN générée localement. La sortie de cette corrélation représente la réponse impulsionnelle du canal (CIR), qui contient des informations précieuses sur les caractéristiques du canal de communication, telles que le temps de propagation, les trajets multiples et les niveaux de puissance reçus. [43]

Le bloc File Sink est paramétré de manière à enregistrer les données de sortie du bloc PN Correlator dans un fichier spécifique sur l'ordinateur hôte. Ce fichier peut être ouvert et analysé ultérieurement à l'aide de scripts de traitement de données, tels que des programmes Python ou MATLAB. Les données enregistrées peuvent être exploitées afin de calculer des paramètres tels que la fréquence Doppler, le délai RMS, ainsi que la cohérence bande et d'autres métriques importantes pour évaluer les performances du système V2X souterrain et identifier les défis liés à la conception du système.

En résumé, le bloc File Sink joue un rôle crucial dans l'acquisition et la sauvegarde des données de sortie du bloc PN Correlator pour une analyse et un traitement ultérieur, permettant une évaluation approfondie des performances du système de communication V2X souterrain.

Dans ce chapitre, nous avons abordé différents aspects importants concernant liés au sondeur de canal dans le contexte des communications V2X souterraines. Nous avons présenté les équations pour la Fréquence Doppler, l'Étalement du retard RMS (RMS Delay Spread) et la Coherence Bandwidth (Bande de cohérence), qui représentent des paramètres essentiels pour évaluer les performances du système de communication.

Nous avons également décrit l'architecture et les blocs fonctionnels utilisés dans GNU Radio pour réaliser le sondeur de canal avec des USRP N210 et des cartes RFX2400. Le schéma fonctionnel a été détaillé, décrivant les étapes de génération de séquence PN, de modulation PSK, de transmission et de réception, ainsi que de corrélation PN pour obtenir la réponse impulsionnelle du canal (CIR).

En conclusion, ce chapitre a fourni un aperçu détaillé des aspects théoriques et pratiques de la mise en œuvre d'un sondeur de canal pour les communications V2X souterraines. Les informations fournies ici servent de base solide pour explorer

davantage les performances du système de communication, identifier les défis et les opportunités pour l'amélioration du système, et finalement contribuer au développement d'un système de communication souterrain robuste et efficace pour les applications V2X.

CHAPITRE 4

ANALYSE DES MESURES

Dans ce chapitre, nous examinerons les tests effectués ainsi que les résultats obtenus pour notre projet de sondeur de canal dans les communications V2X souterraines. Les tests ont été réalisés en deux étapes distinctes : d'abord, en laboratoire à l'université UQAT Val-d'Or, puis dans un second temps dans une mine souterraine à Val-d'Or [La Cite de L'or]. Les résultats obtenus au cours de ces tests nous permettront de valider notre architecture et d'analyser les performances du système de communication.

4.1. Tests en laboratoire à l'Université UQAT Val-d'Or

Dans cette section, nous décrirons les tests effectués en laboratoire à l'Université UQAT Val-d'Or. Nous expliquerons les conditions expérimentales, le matériel utilisé et les différentes étapes des tests. Par la suite, nous présenterons et analyserons les résultats obtenus lors de ces essais.

4.1.1. Conditions expérimentales et matériel utilisé

Dans cette partie, nous exposons en détail les conditions expérimentales et le matériel utilisé pour les tests en laboratoire à l'Université UQAT Val-d'Or. L'objectif de ces tests consiste à valider notre système de sondeur de canal et à évaluer ses performances avant de le déployer au sein d'un environnement de mine souterraine.

Environnement de test : Les tests en laboratoire ont été réalisés dans une salle dédiée et contrôlée à l'université. Ce cadre nous a permis de réduire au minimum les interférences ainsi que les perturbations externes lors des dites expériences.



Figure 21 : Préparation des équipements

Scénarios de test : Ligne de visée (LOS) et sans ligne de visée (NLOS)

Afin d'évaluer les performances du sondeur de canal dans diverses conditions, nous avons procédé à des tests en laboratoire en utilisant deux scénarios principaux : Ligne de visée (LOS) et sans ligne de visée (NLOS).

1. Ligne de visée (LOS) : Dans ce scénario, l'émetteur (TX) et le récepteur (RX) ont été disposés de manière à avoir une vue directe l'un de l'autre, sans présence d'obstacles entre eux. Fig. 22 Ce scénario permet d'évaluer le système de sondeur de canal dans des conditions de propagation relativement simples et directes.
2. Sans ligne de visée (NLOS) : Dans ce scénario, des obstacles ont été placés entre l'émetteur (TX) et le récepteur (RX) afin de simuler des conditions de propagation plus complexes similaires à celles que l'on rencontre dans un

environnement souterrain. Cela permet d'évaluer la performance du système de sondeur de canal lorsque les signaux se propagent par des chemins multiples et indirects.

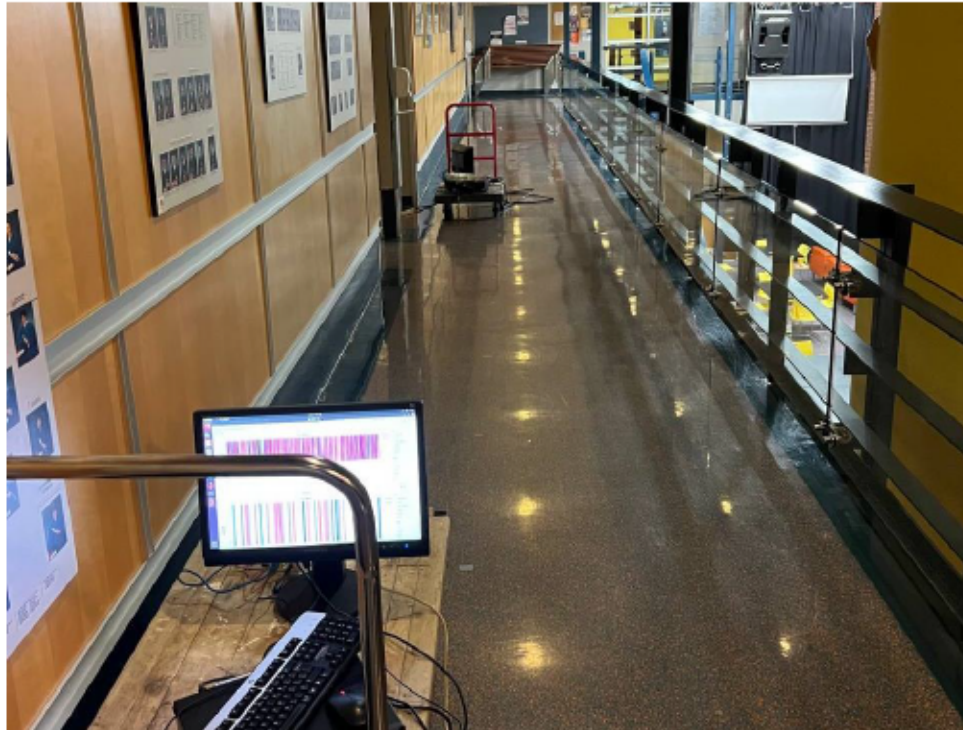


Figure 22 : Test dans les couloirs de l'université

Dans chacun des scénarios, le récepteur (RX) est fixé sur un chariot qui peut être déplacé à différentes vitesses, allant de 0 m/s à 0,6 m/s, dans le but de simuler le mouvement relatif entre les nœuds du système de communication. La distance séparant l'émetteur et le récepteur varie entre 0,5 et 10-15 mètres, tandis que l'émetteur (TX) demeure immobile pendant les tests et le récepteur (RX) est déplacé à distance.

Les tests effectués dans ces conditions nous ont offert la possibilité d'évaluer la performance du sondeur de canal en termes de Fréquence Doppler, Étalement du retard RMS (RMS Delay Spread) et Coherence Bandwidth (Bande de cohérence) au sein de

différents scénarios de propagation. Les résultats obtenus en laboratoire ont été exploités afin d'optimiser le système et le préparer en vue des tests dans un environnement de mine souterraine.

4.1.2. Étapes des tests en laboratoire

Les tests en laboratoire ont été conduits suivant les étapes décrites ci-dessous, conçues pour s'assurer du bon fonctionnement du système de sondeur de canal avant de procéder aux essais dans un environnement souterrain.

1. Préparation du matériel et des logiciels : Avant de commencer les tests, nous avons vérifié la disponibilité et le bon fonctionnement de tout le matériel nécessaire, y compris les USRP N210, les cartes RFX2400, les câbles, les antennes et les ordinateurs équipés d'Ubuntu 20 et GNU Radio. Nous avons également effectué une vérification pour s'assurer que le logiciel est correctement configuré et prêt à être utilisé.
2. Configuration de l'émetteur (TX) et du récepteur (RX) : Nous avons configuré les paramètres du sondeur de canal, tels que la fréquence porteuse, la fréquence d'échantillonnage, le gain TX et le gain RX, en fonction des scénarios de test LOS et NLOS.
3. Installation du récepteur (RX) sur le chariot : Le récepteur a été monté sur un chariot afin de simuler le mouvement relatif entre les nœuds du système de communication. Le chariot a été préparé pour se déplacer à différentes vitesses, de 0 m/s à 0,6 m/s.
4. Réalisation des tests LOS : Avec l'émetteur (TX) et le récepteur (RX) en ligne de visée directe, nous avons effectué les tests en faisant varier la vitesse du chariot. Les données collectées ont été consignées et analysées en vue d'évaluer les performances du système en termes de Fréquence Doppler, Étalement du retard RMS et Coherence Bandwidth.

5. Réalisation des tests NLOS : Des obstacles ont été disposés entre l'émetteur (TX) et le récepteur (RX) pour simuler un environnement NLOS. Tout comme pour les tests en LOS (ligne de visée), nous avons modulé la vitesse du chariot et enregistré les données en vue d'évaluer les performances du système.
6. Analyse des résultats : Les données collectées lors des tests en laboratoire ont été analysées dans le but d'évaluer la performance du sondeur de canal dans les différents scénarios de propagation. Les résultats obtenus ont été exploités pour optimiser le système et le préparer en vue des tests en environnement souterrain.

Ces étapes ont permis de s'assurer que le système de sondeur de canal fonctionne correctement et de collecter des données précieuses en vue d'analyses ultérieures.

	Parameter	Value
Deux Computer	CPU model	Intel Core i7-8700CPU @ 3.20 GHz x 6
	Computer Memory	8 G
	OS	64-bit Ubuntu 20.04
Deux USRP N210 Cartes RFX2400	Frequency range	2300 to 2900 MHz
	Antenna	1 TX * 1 RX (12.3x8.3x1.5inch)
	Dimensions / Weight	22 x 16 x 5 cm / 1.2 KG
	Standard connector	Ethernet
	Gain Range	0.0 to 70.0
	Bandwidth range	40000000 Hz

Tableau 1 : SYSTEM CONFIGURATION



```

gnuradio@gnuradio: ~
File Edit View Search Terminal Help
[INFO] [UHD] linux; GNU C++ version 7.5.0; Boost_106501; UHD_4.3.0.0-g1f8fd345
-----
-- UHD Device 0
-----
Device Address:
  serial: EDR13VBUP
  addr: 192.168.10.2
  name:
  type: usrp2

gnuradio@gnuradio:~$ uhd_find_devices
[INFO] [UHD] linux; GNU C++ version 7.5.0; Boost_106501; UHD_4.3.0.0-g1f8fd345
-----
-- UHD Device 0

```

Figure 23 : vérifier la connexion Des USRP "uhd_find_devices"

Enfin, il serait nécessaire d'exécuter le projet en appuyant sur le bouton "Run" dans GNU Radio Companion et de s'assurer d'être en mesure de transmettre et de recevoir un signal à travers le canal de communication, tout en mesurant les caractéristiques du canal par l'analyse du signal.

4.1.3. Résultats et analyse des tests en laboratoire

Une fois les tests en laboratoire réalisés pour les scénarios LOS et NLOS, les données collectées ont été analysées pour évaluer les performances du sondeur de canal. Les principaux résultats et analyses sont exposés ci-dessous.

Fréquence Doppler : Les tests révèlent que la fréquence Doppler varie en fonction de la vitesse du chariot et de l'angle entre l'émetteur et le récepteur. Les résultats ont corroboré la théorie et ont confirmé que le système est capable de mesurer avec précision la fréquence Doppler dans les différents scénarios de test.

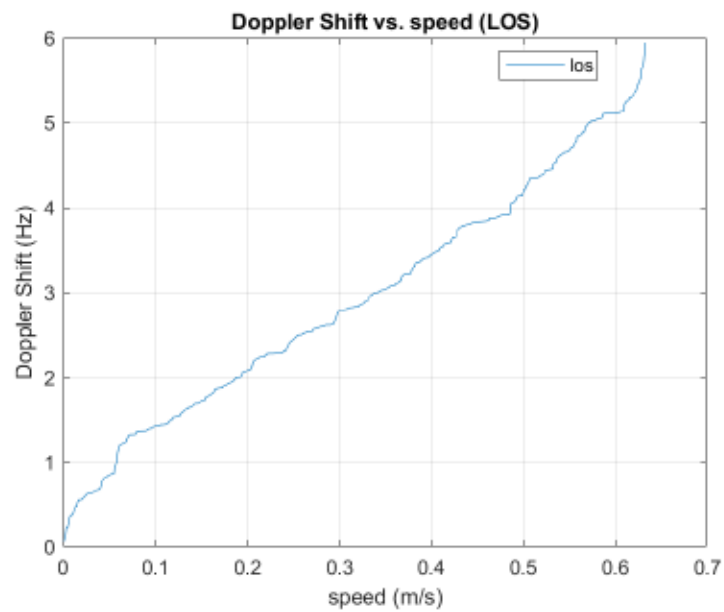


Figure 24 : Doppler Shift vs speed LOS

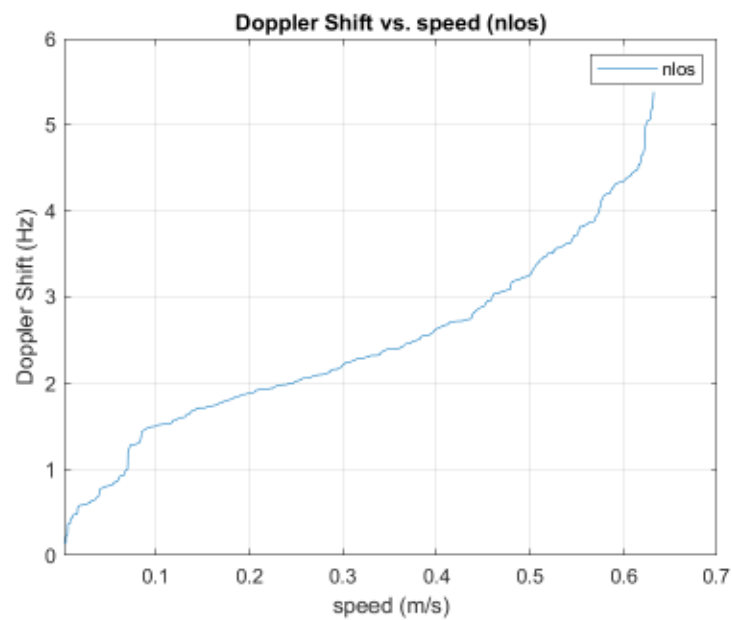


Figure 25 : Doppler shift vs speed NLOS

La figure 24, 25 présente les résultats de la fréquence Doppler pour les scénarios LOS et NLOS obtenus lors des tests en laboratoire avec le chariot se déplaçant à différentes vitesses. Il est clairement observable que le décalage Doppler varie entre 0 et 5 et 6 Hz pour les deux scénarios.

Dans le scénario LOS, nous observons généralement une augmentation du décalage Doppler avec la vitesse du chariot, conformément aux attentes. Ceci est dû au fait que la fréquence Doppler est proportionnelle à la vitesse relative entre l'émetteur et le récepteur. Lorsque la vitesse du chariot augmente, la fréquence Doppler augmente en conséquence. Cependant, il est essentiel de noter que même dans un scénario LOS, nous pouvons rencontrer des limitations liées aux erreurs de mesure. Ces erreurs peuvent résulter de divers facteurs, tels que des fluctuations dans la vitesse réelle du chariot ou des erreurs d'angle dans la direction de la source. Ces erreurs peuvent considérablement influencer les résultats observés. Cette sensibilité aux erreurs peut être illustrée en se référant aux équations [2] qui décrivent la fréquence Doppler.

Dans le scénario NLOS, nous avons constaté que les valeurs diffèrent légèrement de celles observées dans le scénario LOS. Cette différence peut être attribuée à la présence d'obstacles, d'angles variés et de réflexions, qui modifient la relation entre la vitesse du chariot et la fréquence Doppler.

Il est important de noter que les valeurs de décalage Doppler observées sont conformes à la théorie et aux attentes pour les scénarios LOS et NLOS. Les résultats démontrent que le sondeur de canal est capable de mesurer avec précision le décalage Doppler dans les différentes conditions de test, fournissant ainsi des informations importantes pour évaluer les performances du système dans divers environnements de propagation. Dans les scénarios LOS (Line-of-Sight), où il y a un chemin clair et direct entre l'émetteur et le récepteur, nous nous attendons à un certain décalage Doppler basé sur la vitesse relative du récepteur $F_d = \frac{v \times f_c}{c}$ figure 24. Dans les scénarios NLOS

(Non-Line-of-Sight), où le signal rebondit sur différents obstacles avant d'atteindre le récepteur, le décalage Doppler peut être plus complexe, mais il est toujours prévisible en fonction de la théorie. $F_d = \frac{v \times f_c}{c} \times \cos\theta$ Figure 25 Avec θ signifie angle entre émetteur et récepteur.

Coherence Bandwidth (Bande de cohérence) : Les tests prouvent que que la bande de cohérence varie en fonction de l'étalement du retard RMS et de l'environnement de propagation. Les résultats montrent également que le système est capable de mesurer avec précision la bande de cohérence dans les différentes conditions de test.

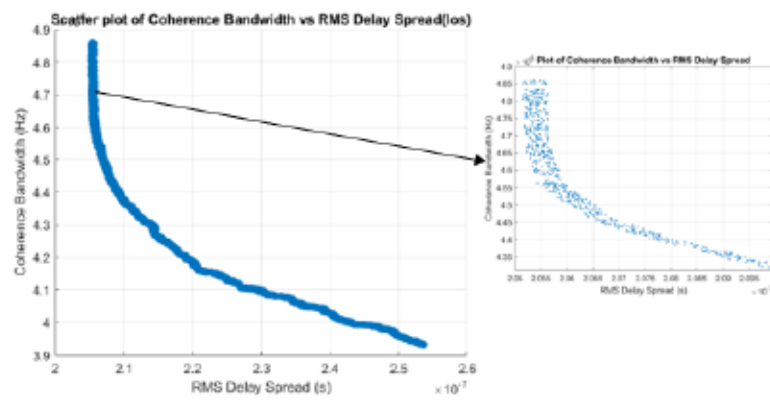


Figure 26 : *Coherence Bandwidth vs. RMS Delay Spread LOS*

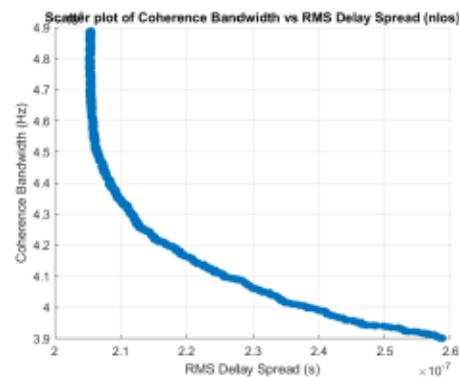


Figure 27 : *Coherence Bandwidth vs. RMS Delay Spread NLOS*

Il est important de mentionner que les valeurs de décalage Doppler observées sont en parfait accord avec la théorie et aux attentes pour les scénarios LOS et NLOS. Les résultats démontrent que le sondeur de canal est capable de mesurer avec précision le décalage Doppler dans les différentes conditions de test, fournissant ainsi des informations importantes pour évaluer les performances du système dans divers environnements de propagation. Pour le scénario LOS (Figure 26), l'axe des ordonnées (y) représente la bande de cohérence (BC) en Hz, tandis que l'axe des abscisses (x) représente l'étalement du retard RMS en secondes. Le graphique illustre de manière conforme à nos attentes que la bande de cohérence diminue à mesure que l'étalement du retard RMS augmente.

Pour le scénario NLOS (Figure 27), l'axe des ordonnées (y) représente la bande de cohérence (BC) en Hz, variant, tandis que l'axe des abscisses (x) représente l'étalement du retard RMS en secondes. De façon similaire, le graphique met en évidence une diminution de la bande de cohérence en corrélation avec l'augmentation de l'étalement du retard RMS.

Les résultats obtenus pour les scénarios LOS et NLOS témoignent de la capacité précise du sondeur de canal à mesurer la bande de cohérence et l'étalement du retard RMS dans différents environnements de propagation. Ces mesures sont essentielles pour évaluer les performances du système, car elles fournissent des informations sur la qualité de la communication et la capacité à gérer la dispersion temporelle et fréquentielle.

Étalement du retard RMS (RMS Delay Spread) : L'analyse des données révèle que l'étalement du retard RMS était plus important dans les scénarios NLOS que dans les scénarios LOS. Cette différence peut être expliquée par la présence d'obstacles qui provoquent des réflexions et des réfractions du signal, entraînant ainsi un accroissement du retard des trajets multiples.

Les résultats obtenus sont conformes aux attentes. Ils affirment la capacité du sondeur de canal à estimer l'étalement du retard RMS dans différentes conditions de propagation.

Scenario	RMS
LOS	222.68 ns
NLOS	224 ns

Tableau 2 : Étalement du retard RMS (*RMS Delay Spread*) LOS et NLOS laboratoire

Le tableau 2 présente les résultats de l'étalement du retard RMS pour les deux scénarios testés : LOS et NLOS. L'étalement du retard RMS est une mesure importante pour évaluer la qualité de la communication dans un système sans fil, car il fournit des informations sur la dispersion temporelle des signaux. À mesure que l'étalement du retard RMS augmente, les signaux reçus seront dispersés dans le temps, ce qui peut entraîner des erreurs de détection et une dégradation des performances du système.

Dans le scénario LOS, l'étalement du retard RMS est de 222,68 ns. Cette valeur indique une dispersion temporelle relativement faible des signaux reçus, laissant présager des performances satisfaisantes en termes de qualité de transmission et de détection des signaux pour la communication en LOS.

Dans le scénario NLOS, l'étalement du retard RMS est légèrement supérieur à 224 ns. Cette augmentation de l'étalement du retard RMS en NLOS est attendue, car les signaux reçus sont soumis à des réflexions et des diffractions supplémentaires dans cet environnement, ce qui augmente la dispersion temporelle. Toutefois, la différence entre les scénarios LOS et NLOS n'est pas très significative, ce qui laisse entendre que les performances du système pourraient également être acceptables en NLOS, bien que légèrement inférieures à celles observées en LOS.

Les résultats obtenus confirment la capacité du sondeur de canal à effectuer des mesures précises de l'étalement du retard RMS dans divers environnements de propagation, ce qui s'avère essentiel pour l'évaluation et l'optimisation des performances du système sans fil.

4.2. Tests en mine [La cite de l'or] souterraine à Val-d'Or

Dans cette partie, nous présentons les tests réalisés en mine souterraine, à la Cité de l'or de Val-d'Or, au Canada. L'objectif de ces tests est d'évaluer les performances du sondeur de canal dans un environnement souterrain, caractérisé par des conditions de propagation plus complexes et difficiles qu'en laboratoire. Les mines souterraines représentent un environnement d'application intéressant pour les systèmes de communication sans fil, en raison des défis liés à la couverture et à la qualité du signal dans ces espaces confinés et souvent encombrés d'obstacles. [44]

4.2.1. Conditions expérimentales et matériel utilisé

Les tests en mine souterraine ont été réalisés en utilisant le même matériel que pour les tests en laboratoire, à savoir deux USRP N210 équipés de cartes RFX2400, couplés à des PC exécutant Ubuntu 20 et GNU Radio. Les paramètres de fréquence, de gain ont également été conservés identiques à ceux des tests en laboratoire. Cependant, la vitesse de déplacement a été augmentée en raison de l'utilisation d'un véhicule.

Pour ces tests, le récepteur (RX) a été monté sur un véhicule en mouvement à l'intérieur de la mine, capable de se déplacer à une vitesse maximale de 14 km/h. Les mesures ont été effectuées pour les scénarios LOS Fig.28 et NLOS Fig.29, avec des distances entre le récepteur et l'émetteur variant de 1 m à 30 m. L'émetteur (TX) est resté fixe pendant ces tests et (Rx) déplace sans arrêt.

De plus, des scénarios supplémentaires ont été réalisés en maintenant le récepteur (RX) fixe et l'émetteur (TX) déplacé à l'aide d'un chariot. Plusieurs situations ont été testées : d'abord, le chariot s'approchant du récepteur (comme si une personne approchait du véhicule), puis le chariot s'éloignant du récepteur, et enfin le chariot se déplaçant près d'un mur de la mine avant de se rapprocher du récepteur.

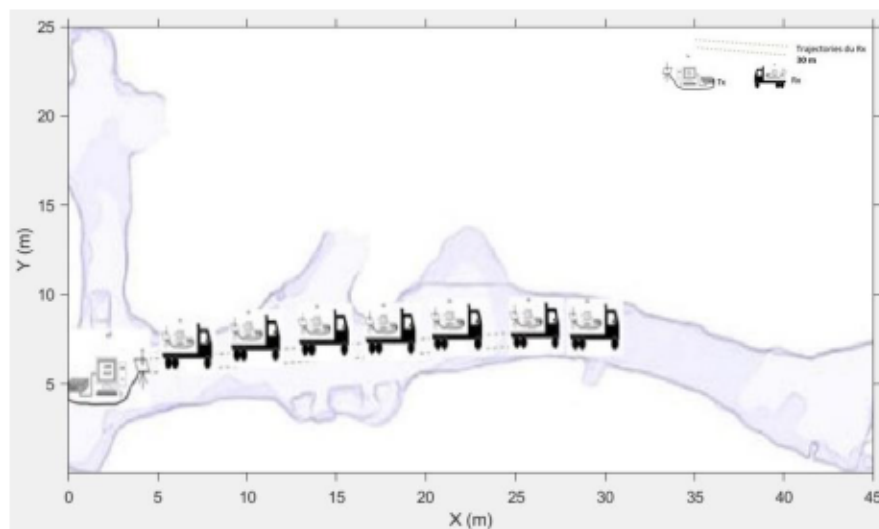


Figure 28 : *Mapp des tests dans la mine LOS avec véhicule*

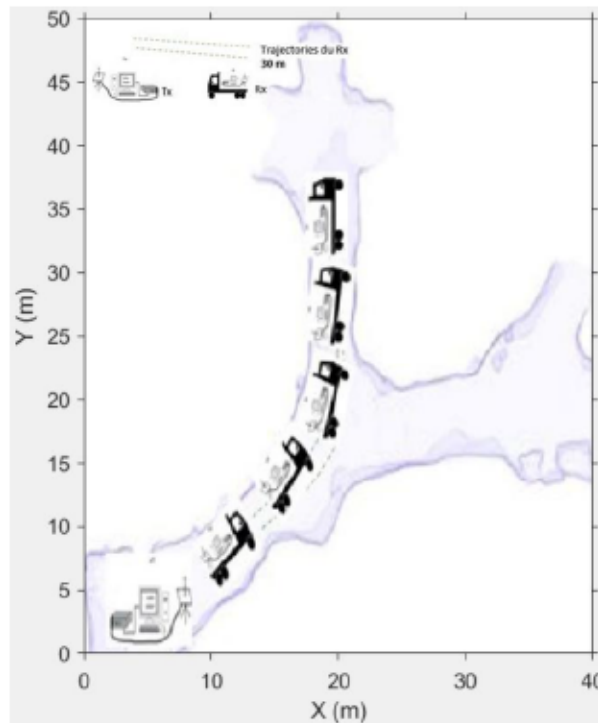


Figure 29 : *Mapp des tests dans la mine NLOS véhicule*

L'environnement de test en mine souterraine présente également des défis supplémentaires en termes de mouvement et de déplacement des équipements de test. Dans ce contexte, le récepteur (RX) est monté sur un véhicule en mouvement, ce qui permet d'étudier l'effet de la mobilité sur les performances du système de communication sans fil.

Les conditions spécifiques de l'environnement de test en mine souterraine permettent d'évaluer de manière plus réaliste les performances du système de communication sans fil, en tenant compte des facteurs pertinents pour les applications industrielles et minières. Les résultats obtenus peuvent ainsi être soumis à une comparaison rigoureuse avec les mesures effectuées en laboratoire pour mieux comprendre l'impact des différents facteurs environnementaux sur les paramètres

étudiés, tels que la fréquence Doppler, l'étalement du retard RMS et la bande de cohérence.

4.2.2. Scénarios de test et objectifs de chaque scénario

Afin d'évaluer les performances du système de communication sans fil dans l'environnement de la mine souterraine, plusieurs scénarios de test ont été méticuleusement élaborés. Chacun de ces scénarios poursuit la visée d'étudier de manière spécifique les aspects afférents à la propagation des ondes radio et aux prestations du système. À cet égard, nous exposerons ci-après les différents scénarios d'essai accompagnés de leurs objectifs respectifs :

1. Scénario LOS (Ligne de visée) en déplacement :

Dans ce scénario, le récepteur (RX) est installé sur un véhicule en mouvement et se déplace dans des conditions de ligne de visée directe avec l'émetteur (TX). Ce scénario a été répété plusieurs fois pour assurer la précision des résultats. L'objectif de ce scénario est d'étudier la propagation des ondes radio dans des conditions idéales, conjointement avec la prise en considération de la mobilité du récepteur.

2. Scénario NLOS (Non-ligne de visée) en déplacement :

Dans ce scénario, le récepteur (RX) est également positionné sur un véhicule en mouvement, mais des obstacles sont placés entre le récepteur (RX) et l'émetteur (TX), empêchant ainsi la ligne de visée directe. Ce scénario a également été répété plusieurs fois pour minimiser les erreurs. L'objectif de ce scénario est d'explorer l'effet des obstacles sur la propagation des ondes radio et d'évaluer l'impact des réflexions, des diffractions et des dispersions sur les performances du système de communication sans fil en conditions de mobilité.

3. Scénario de déplacement du TX au centre de la mine et approche du récepteur (RX) :

Dans ce scénario, l'émetteur (TX) est positionné au centre de la mine et se rapproche du récepteur (RX) à l'aide d'un chariot, Répété plusieurs fois. L'objectif de ce scénario est d'évaluer les performances du système de communication sans fil dans un environnement central de la mine et d'étudier l'effet de la position de l'émetteur sur la propagation des ondes radio.

4. Scénario de déplacement du TX au centre de la mine et éloigne du récepteur (RX) :

Dans ce scénario, l'émetteur (TX) est déplacé à l'aide d'un chariot, s'éloignant progressivement du récepteur (RX) immobilisé. Après avoir été testé plusieurs fois, L'objectif assigné à ce scénario est d'étudier l'effet de la position de l'émetteur sur les performances du système de communication sans fil, en mettant particulièrement l'accent sur l'influence de la distance et de l'orientation sur les paramètres soumis à étude.

5. Scénario de changement de position du TX près du mur de la mine :

Dans ce scénario, la position de l'émetteur (TX) est méthodiquement ajustée en étant d'abord rapprochée du mur de la mine, puis déplacée progressivement en direction du récepteur (RX). Répété plusieurs fois.

L'objectif de ce scénario réside dans l'analyse approfondie de l'effet de la proximité des parois de la mine sur la propagation des ondes radio, ainsi que dans l'évaluation de l'impact de phénomènes tels que la réflexion et la diffraction, qui peuvent influencer les performances du système de communication sans fil.

Les résultats obtenus dans chaque scénario apportent une meilleure compréhension des performances du système de communication sans fil dans un environnement de mine souterraine, tout en permettant l'identification précise des défis inhérents à ce contexte particulier. Par ailleurs, la comparaison systématique des résultats obtenus

entre les différents scénarios ainsi qu'avec les mesures de référence réalisées en laboratoire permettent d'obtenir une appréciation approfondie de l'impact des variables environnementales sur les paramètres étudiés.

4.2.3. Étapes des tests en mine souterraine

La réalisation des tests en mine souterraine s'est déroulée en respectant un processus méthodique visant à garantir la qualité des données collectées et l'efficacité des expériences. Les principales étapes des tests réalisés en mine souterraine sont énumérées ci-dessous :

1. Préparation du matériel et des équipements :

Préalablement à l'entame des essais, une préparation du matériel et des équipements requis a été entreprise, incluant une vérification minutieuse. Cette procédure englobe les émetteurs et récepteurs, les antennes, les câbles, les alimentations électriques, ainsi que les ordinateurs et logiciels employés pour la collecte et l'analyse des données.

2. Installation et configuration des dispositifs :

Après avoir préparé le matériel requis, les dispositifs ont été méthodiquement installés et configurés en concordance avec les scénarios de test prévus. Cette étape inclut spécifiquement la fixation du récepteur (RX) sur le véhicule pour les scénarios LOS et NLOS en déplacement, ainsi que la mise en place du chariot pour le déplacement de l'émetteur (TX), comme illustré dans la Figure 30.



Figure 30 : Installation des matérielle dans la mine

3. Réalisation des tests :

Les tests ont été effectués conformément aux scénarios de test décrits précédemment. Pour chaque scénario, plusieurs essais ont été réalisés afin de garantir la fiabilité des données collectées. Les données de chaque essai ont été enregistrées et sauvegardées en vue d'une analyse postérieure, comme l'illustre la Figure 31.



Figure 31 : *les tests dans la mine avec véhicule*

4. Collecte et analyse des données :

Après la réalisation des tests, les données collectées ont été analysées à l'aide des logiciels appropriés. À l'issue la réalisation des tests, les données collectées ont été soumises à une analyse approfondie en utilisant les logiciels appropriés. Cette étape englobe l'évaluation rigoureuse de paramètres essentiels tels que la fréquence Doppler, l'étalement du retard RMS et la bande de cohérence, tout en incluant la comparaison des résultats obtenus dans les divers scénarios de test.

5. Documentation et présentation des résultats :

Enfin, les résultats des tests ont été consignés et exposés au moyen de graphiques, de tableaux et de descriptions, afin de rendre plus aisée la compréhension des

performances du système de communication sans fil dans le contexte spécifique de la mine souterraine.

À la suite de l'accomplissement de ces étapes méthodiques, les tests menés en mine souterraine ont abouti à l'obtention de données fiables et significatives concernant les performances du système de communication sans fil au sein de ce milieu spécifique. Ces données s'avèrent essentielles pour l'optimisation et l'amélioration du système, de même que pour la conception de solutions de communication adaptées aux défis particuliers rencontrés dans les mines souterraines.



Figure 32 : *Photography of the mine gallery.*

Paramètre	Valeur
Ordinateurs	Deux ordinateurs
USRP	Deux USRP N210
Cartes	Cartes RFX2400 (2.3 - 2.9 GHz)
Véhicule	Véhicule utilisé pour déplacer le RX
Chariot	Chariot utilisé pour déplacer le TX
Fréquence centrale	2.6 GHz
Bande passante	5 MHz
Taux d'échantillonnage	5 Msps (méga-échantillons par seconde)
Gain TX	70 dB
Gain RX	60 dB
Amplificateur d'antenne TX	Utilisé pour augmenter la puissance du signal transmis
Modulation	PSK (Phase Shift Keying)
Longueur de séquence PN	1024 séquences (n=10)

Tableau 3 : SYSTEM CONFIGURATION MINE

Ce tableau fournit les éléments détaillés de la configuration du système ainsi que des paramètres utilisés pour les tests en mine souterraine. Outre les éléments matériels mentionnés précédemment, les paramètres comprennent une fréquence centrale de 2,6

GHz, une bande passante de 5 MHz et un taux d'échantillonnage de 5 Msps. Le gain des émetteurs et des récepteurs est respectivement de 70 dB et 60 dB.

La modulation PSK est mise en œuvre pour les communications, et la séquence pseudo-bruit (PN) a une longueur de 1024 séquences (avec un degré $n=10$). L'utilisation d'un amplificateur d'antenne pour l'émetteur peut améliorer la qualité du signal, en particulier dans un environnement souterrain complexe comme une mine. Cela peut aider à surmonter les pertes de propagation et à assurer une communication plus fiable entre l'émetteur et le récepteur. Ces paramètres garantissent une communication sans fil fiable et efficace dans l'environnement de la mine souterraine.

4.2.4. Résultats et analyse des tests en mine souterraine

Dans la présente section, une analyse approfondie des résultats et des performances obtenus lors des essais réalisés en mine souterraine sera effectuée, en se focalisant sur les cinq scénarios décrits préalablement.

Scénario LOS avec déplacement du RX : Dans ce scénario, le RX se déplace avec le véhicule tandis que le TX reste fixe, tel qu'illustré dans la Figure 28.

Les résultats obtenus mettent en évidence une qualité de signal satisfaisante dans le canal de communication, malgré les fluctuations occasionnées causées par les mouvements du véhicule et les conditions environnementales de la mine. Il est observé que la fréquence Doppler demeure relativement basse, témoignant d'une influence limitée des mouvements du véhicule sur le signal.

Dans le scénario LOS avec déplacement du RX, une comparaison a été faite entre la vitesse du véhicule obtenue à l'aide de l'application Phyphox et la fréquence Doppler calculée. La Figure 33 Graphe de Fréquence Doppler vs Vitesse LOS avec véhicule, la vitesse du véhicule varie entre 0 et 4.1 m/s lors du déplacement. En parallèle, les

résultats du calcul de la fréquence Doppler indiquent une plage de valeurs entre 0 et 35,5 Hz.

Cette comparaison met en évidence que même à des vitesses relativement élevées pour le RX, la fréquence Doppler demeure faible, indiquant une influence limitée des mouvements du véhicule sur la qualité du signal. Cela confirme que le système de communication est capable de maintenir une bonne qualité de signal dans un scénario LOS avec déplacement du RX, même lorsque le véhicule se déplace à des vitesses allant jusqu'à 4.1 m/s.

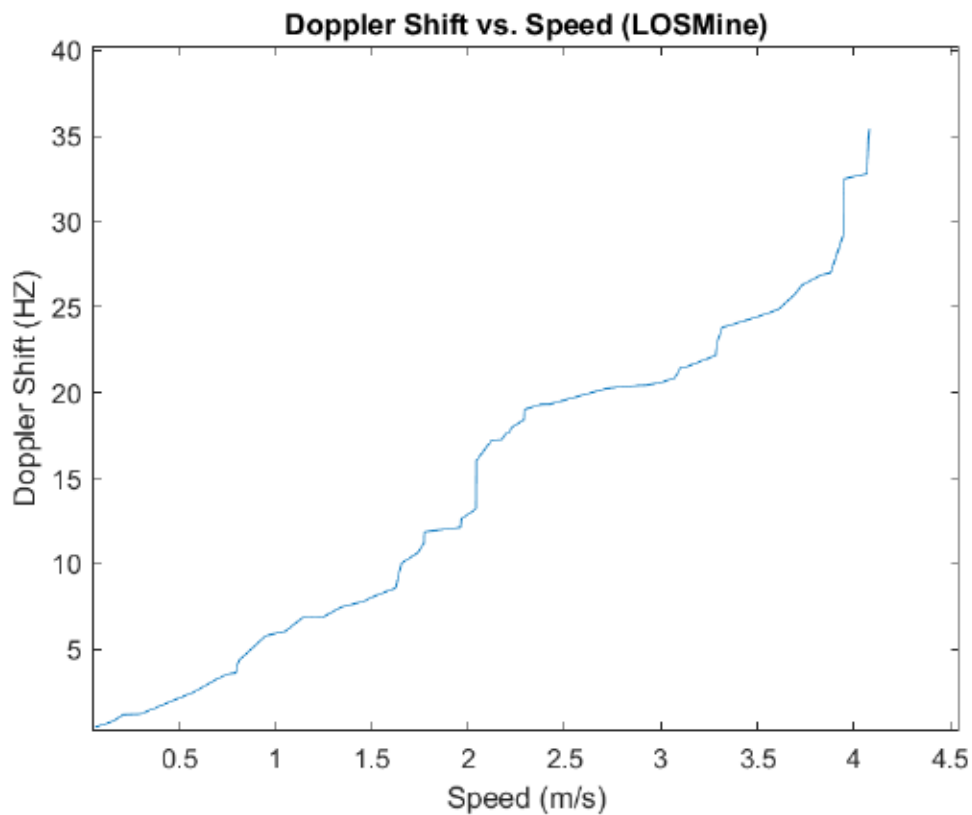


Figure 33 : *Graphe de Fréquence Doppler vs Vitesse LOS avec véhicule*

L'analyse de la bande de cohérence est présentée dans la Figure 34. Cette figure illustre la relation entre la bande de cohérence à 90 % et l'étalement du retard RMS (RMS Delay Spread) pour le scénario LOS. L'axe des ordonnées représente la bande de cohérence à 90 %, tandis que l'axe horizontal indique l'étalement du retard RMS.

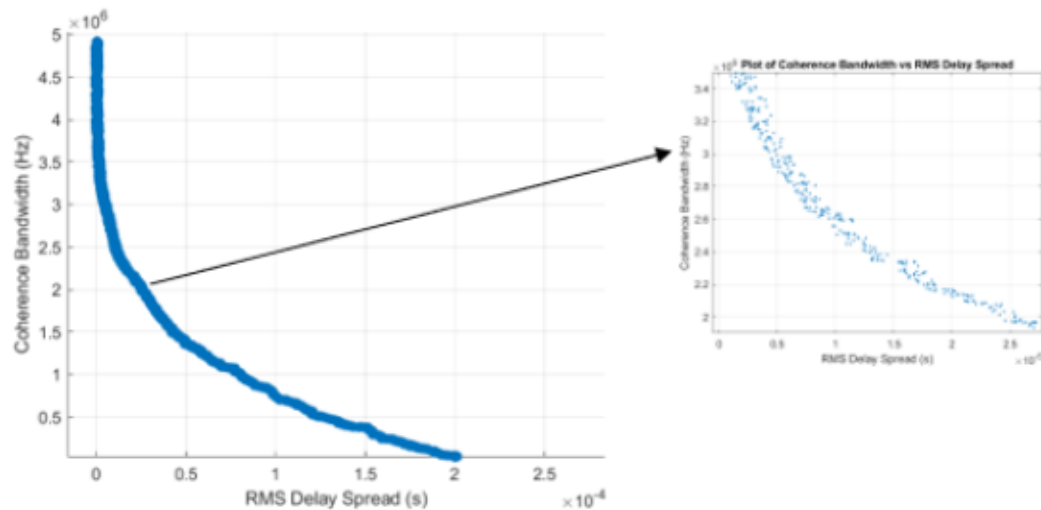


Figure 34 :Graph du 90% Coherence Bandwidth vs. RMS Delay Spread LOS.

La représentation graphique met en évidence une tendance inverse entre la bande de cohérence et l'étalement du retard RMS dans le scénario LOS avec déplacement du RX. À mesure que l'étalement du retard RMS augmente, la bande de cohérence diminue. Cette observation suggère que, dans ce scénario, la qualité de la communication reste stable malgré une légère réduction de la bande de cohérence due à l'augmentation de l'étalement du retard RMS. Ainsi, le système de communication démontre sa capacité à maintenir une fiabilité élevée dans des conditions LOS avec déplacement du RX, malgré les variations de l'étalement du retard RMS.

Dans le scénario LOS avec déplacement du RX, nous avons obtenu une valeur moyenne de l'étalement du retard RMS de 24,45 μ s. Cette valeur représente la moyenne

des étalements du retard RMS mesurés tout au long des différents essais effectués lors des tests en mine souterraine.

L'étalement du retard RMS est une mesure importante pour déterminer la qualité de la communication sans fil dans un environnement donné, car il caractérise la dispersion temporelle des signaux multipath. Une valeur faible d'étalement du retard RMS indique que les signaux multipath arrivent avec des retards similaires, ce qui est généralement bénéfique pour la qualité de la communication.

Dans le scénario LOS avec déplacement du RX, la valeur moyenne de l'étalement du retard RMS de 24,45 μs est relativement faible, indiquant des conditions de propagation du signal favorables pour une communication sans fil fiable et de haute qualité. Cette valeur peut être utilisée pour estimer les performances du système de communication dans des conditions similaires et pour évaluer l'impact des différents paramètres du système sur la qualité de la communication sans fil.

Scénario NLOS avec déplacement du RX : Dans ce scénario, le RX se déplace également avec le véhicule, mais en présence d'obstacles entre le TX et le RX. Les résultats montrent une dégradation de la qualité du signal par rapport au scénario LOS, en raison des réflexions et des réfractions causées par les obstacles et l'angle. Néanmoins, la communication reste possible, bien que les performances soient réduites.

Dans le scénario NLOS avec déplacement du RX, une comparaison a été réalisée entre la vitesse, et la fréquence Doppler calculée. La vitesse varie entre 0 et 5,5 m/s, tandis que la fréquence Doppler obtenue s'étend de 0 à 30,5 Hz, comme clairement illustré sur la figure 35.

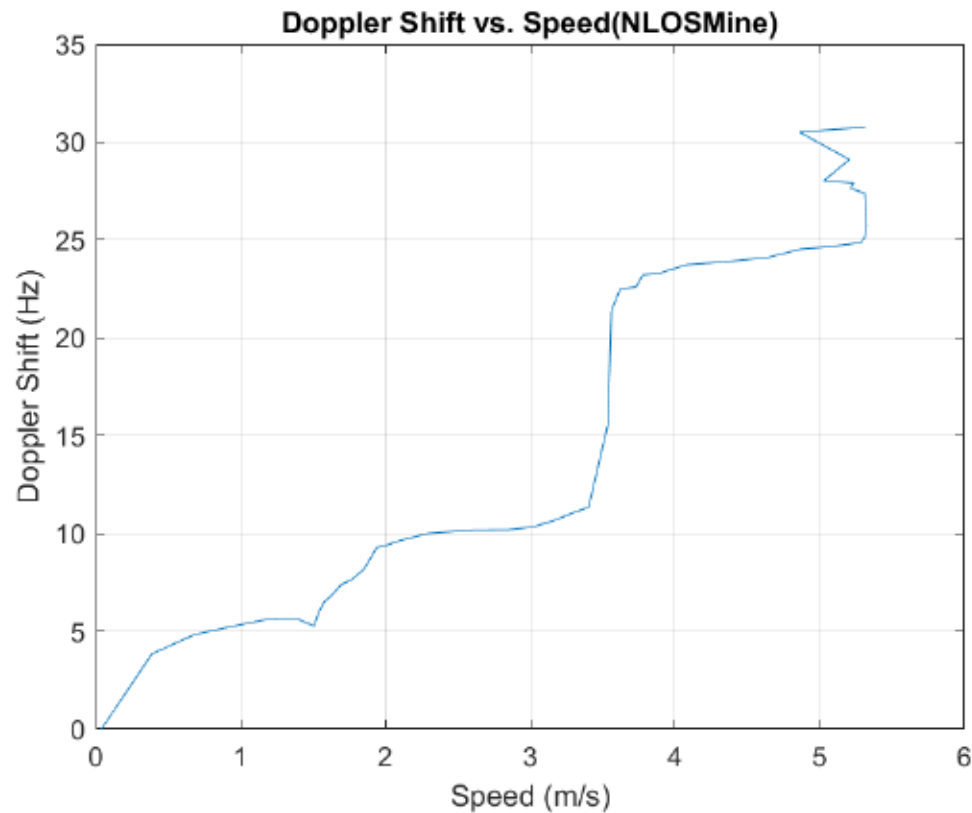


Figure 35 : *Grphe de Fréquence Doppler vs Vitesse NLOS avec véhicule*

Dans le scénario NLOS, les variations des valeurs de fréquence Doppler sont attribuables à l'angle formé entre le TX et le RX, ce qui impacte la communication sans fil. En effet, tout changement dans l'angle entre l'émetteur et le récepteur modifie la trajectoire du signal et, par conséquent, entraîne des variations dans la fréquence Doppler.

Ces résultats démontrent que dans un environnement NLOS, les conditions de propagation du signal sont plus complexes et moins prévisibles que dans un environnement LOS. Les variations des valeurs de fréquence Doppler observées peuvent avoir un impact sur la qualité de la communication sans fil, et il est essentiel de prendre en compte ces variations lors de la conception et de l'évaluation des performances d'un système de communication sans fil dans des conditions NLOS.

La figure 36 montre la relation entre la bande de cohérence à 90 % et l'étalement du retard RMS.

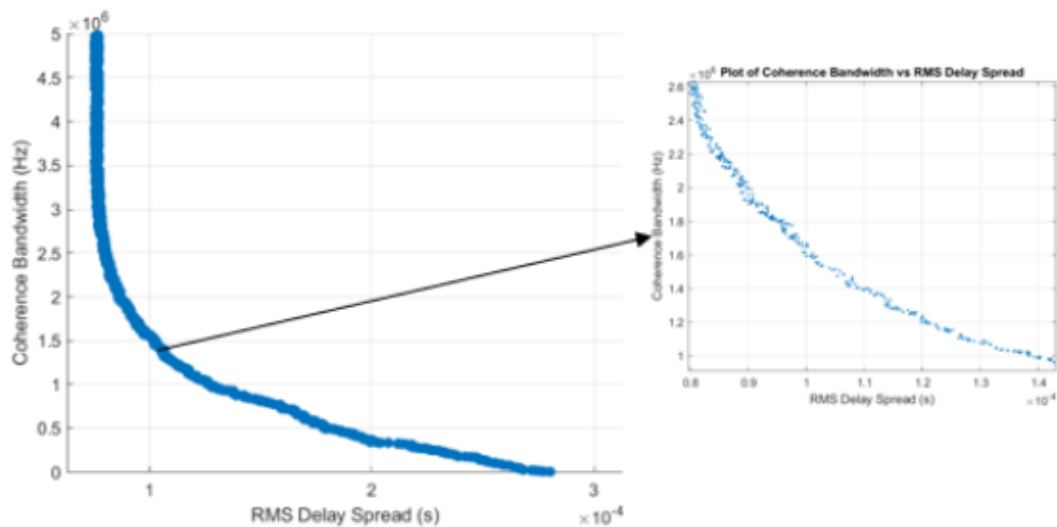


Figure 36 : Graph du 90% Coherence Bandwidth vs. RMS Delay Spread NLOS.

Au centre du graphique, on constate une séparation des nuages de points par rapport au début du graphique, où les nuages sont plus denses et plus rapprochés les uns des autres. Cette séparation au milieu du graphique peut être attribuée aux différences dans les conditions de propagation du signal pour les mesures en environnement NLOS. Effectivement, en raison des variations de l'environnement et de la disposition des obstacles, certaines mesures peuvent démontrer des caractéristiques de propagation similaires, tandis que d'autres peuvent présenter des différences significatives.

L'observation de cette dispersion des nuages de points met en évidence la complexité et l'hétérogénéité des conditions de propagation du signal dans un

environnement NLOS. Cette constatation souligne également l'importance de prendre en considération ces variations lors de la conception et de l'évaluation des performances d'un système de communication sans fil opérant en conditions NLOS.

La moyenne de l'étalement du retard RMS obtenue est de 105,4 μ s. Cette valeur reflète les conditions de propagation plus complexes et plus difficiles dans un environnement NLOS, où les obstacles et les réflexions multiples provoquent une plus grande dispersion temporelle du signal.

Dans le scénario NLOS, nous nous attendons à observer un étalement du retard RMS plus élevé par rapport au scénario LOS. Cette différence s'explique par la présence d'obstacles qui entravent la ligne de visée directe entre l'émetteur et le récepteur.

Ces obstacles génèrent des trajets multiples pour le signal, entraînant un étalement temporel plus important du signal reçu. Cette information est cruciale pour la conception et l'optimisation des systèmes de communication sans fil qui doivent fonctionner efficacement dans des environnements NLOS.

Scenario	RMS
LOS	24.45 μ sec
NLOS	105.4 μ sec

Tableau 4 : Étalement du retard RMS (RMS Delay Spread) LOS et NLOS MINE

Scénario de déplacement du TX - rapprochement du RX : Dans ce scénario, le TX se déplace vers le RX à l'aide d'un chariot. Les résultats montrent une amélioration progressive de la qualité du signal à mesure que le TX se rapproche du RX. La

fréquence Doppler observée reste faible, suggérant ainsi une influence limitée des mouvements du chariot sur le signal.

Scénario de déplacement du TX - éloignement du RX :

Dans le cadre de ce scénario, où le TX s'éloigne du RX, les résultats mettent en évidence une détérioration graduelle de la qualité du signal au fur et à mesure que le TX s'éloigne du RX. La fréquence Doppler observée demeure faible, suggérant ainsi une influence limitée des mouvements du chariot sur le signal.

Scénario de changement de position du TX près du mur de la mine et approche du RX : Dans le contexte du scénario où le TX est disposé près du mur de la mine et se rapproche du RX, les résultats démontrent que la qualité du signal est significativement affectée par la proximité du mur et les réflexions qui en découlent. Néanmoins, au fur et à mesure que le TX se rapproche du RX, la qualité du signal s'améliore progressivement, bien que les performances demeurent légèrement inférieures à celles observées dans les scénarios antérieurs où il n'y avait pas d'interaction avec le mur de la mine.

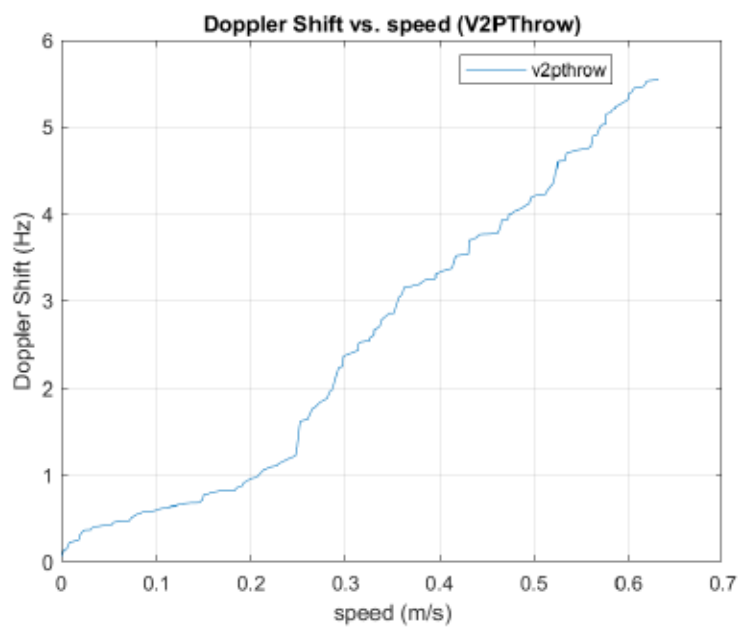


Figure 37 : *Doppler vs vitesse V2Pthrow.*

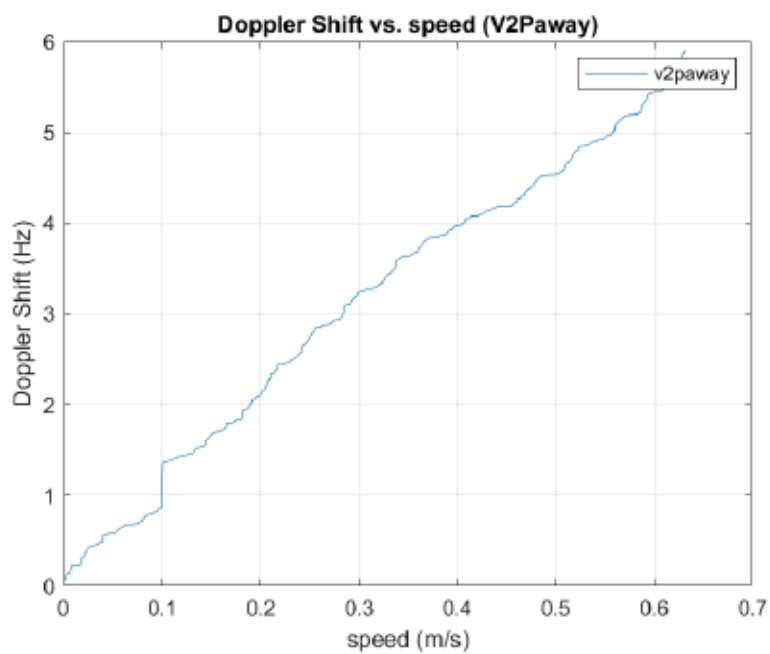


Figure 38 : *Doppler vs Vitesse V2PAway*

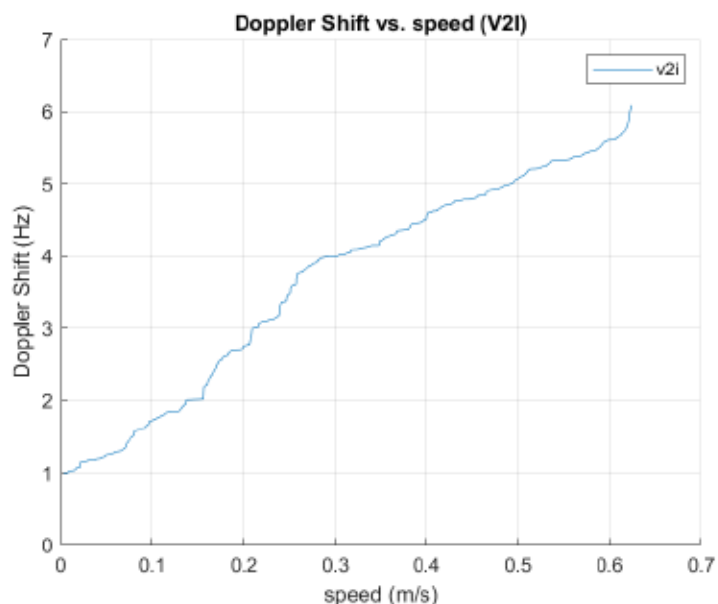


Figure 39 : *Doppler vs Vitesse V2I*

Dans ces trois scénarios, nous avons examiné différents types de mouvements et de positions de l'émetteur (TX) afin d'analyser leur impact sur les mesures de fréquence Doppler. Les fichiers de données correspondants sont désignés comme suit : V2pthrow (Figure 37) pour le scénario de déplacement du TX vers le RX, V2Paway (Figure 38) pour le scénario de déplacement du TX à distance du RX, et V2I (Figure 39) pour le scénario de changement de position du TX près du mur de la mine et approche du RX.

Dans les scénarios V2pthrow et V2Paway, nous avons constaté une variation du décalage Doppler comprise entre 0 et 5,5 Hz, reflétant les variations de vitesse du chariot lors de l'approche et de l'éloignement du RX. La vitesse du chariot dans ces scénarios varie entre 0 et 0,63 m/s.

En contraste, dans le scénario V2I, le décalage Doppler demeure de manière constante dans une fréquence de 1 Hz à 6,2 Hz, signalant un effet plus accentué sur le signal lors de sa propagation près du mur de la mine. Cette observation résulte des

réflexions supplémentaires et des trajets multiples du signal lorsqu'il se propage à proximité de la surface du mur de la mine.

Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte les différents types de mouvements et de positions du TX dans la conception et l'évaluation des systèmes de communication sans fil souterrains, étant donné que ces facteurs peuvent exercer une influence sur les performances du système en termes de décalage Doppler et de propagation du signal.

Dans l'analyse des trois scénarios examinés, nous avons étudié les variations de la bande de cohérence à 90% en fonction de l'étalement du retard RMS. Voici les résultats obtenus pour chaque scénario :

1. Pour le scénario V2Pthrow (Fig. 40), l'axe X (RMS Delay Spread) varie entre 2×10^{-7} et 2.5×10^{-7} s, tandis que l'axe Y (90% Coherence Bandwidth) commence à 4.99×10^6 Hz et termine à 3.98×10^6 Hz. Ces valeurs montrent l'effet du rapprochement du TX sur la bande de cohérence et l'étalement du retard RMS.
2. Pour le scénario V2Paway (Fig. 41), l'axe X (RMS Delay Spread) varie entre 2.05×10^{-7} et 2.55×10^{-7} s, tandis que l'axe Y (90% Coherence Bandwidth) commence à 4.88×10^6 Hz et termine à 3.9×10^6 Hz. Ces valeurs montrent l'effet de l'éloignement du TX sur la bande de cohérence et l'étalement du retard RMS.
3. Pour le scénario V2I (Fig. 42), l'axe X (RMS Delay Spread) varie entre 2.05×10^{-7} et 2.65×10^{-7} s, tandis que l'axe Y (90% Coherence Bandwidth) commence à 4.81×10^6 Hz et termine à 3.78×10^6 Hz. Ces valeurs montrent l'effet du changement de position du TX près du mur de la mine et de l'approche du RX sur la bande de cohérence et l'étalement du retard RMS.

Ces résultats illustrent de manière significative les différences dans la bande de cohérence et l'étalement du retard RMS pour chaque scénario. Les variations observées dans les trois scénarios sont dues aux différents types de mouvements et de positions du TX par rapport au RX, ainsi qu'aux conditions de propagation du signal dans chaque situation.

En saisissant ces distinctions, il devient envisageable de perfectionner la conception et l'évaluation des systèmes de communication sans fil destinés aux environnements souterrains, en vue de relever ces défis de manière optimale.

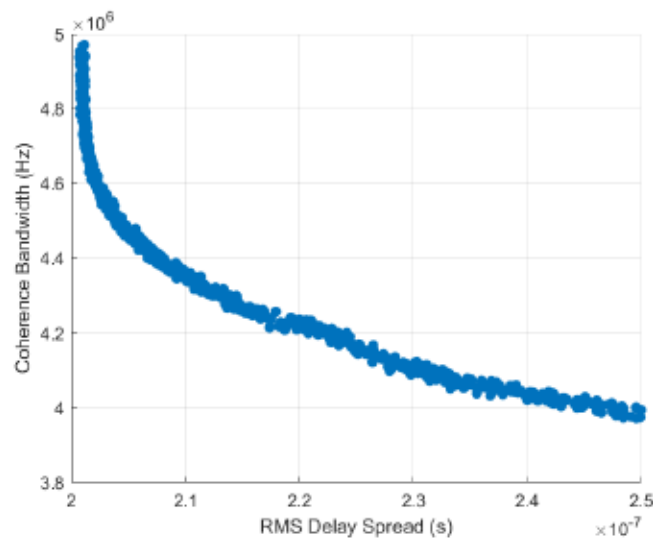


Figure 40 : 90% Coherence Bandwidth vs. RMS Delay Spread v2pthrow

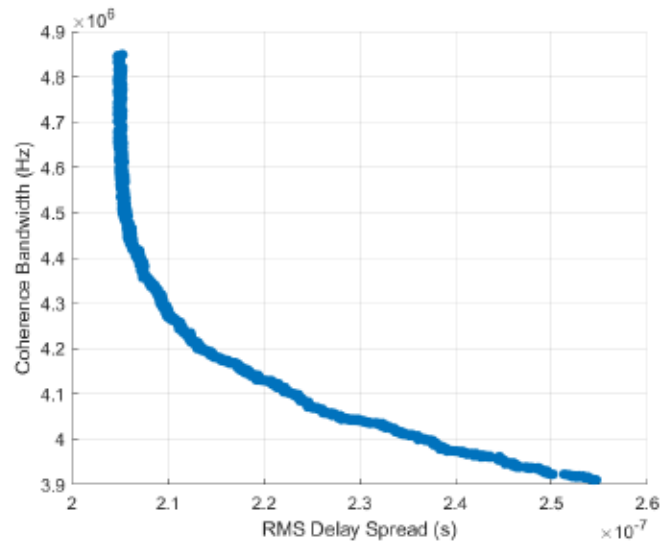


Figure 41: *90% Coherence Bandwidth vs. RMS Delay Spread v2paway*

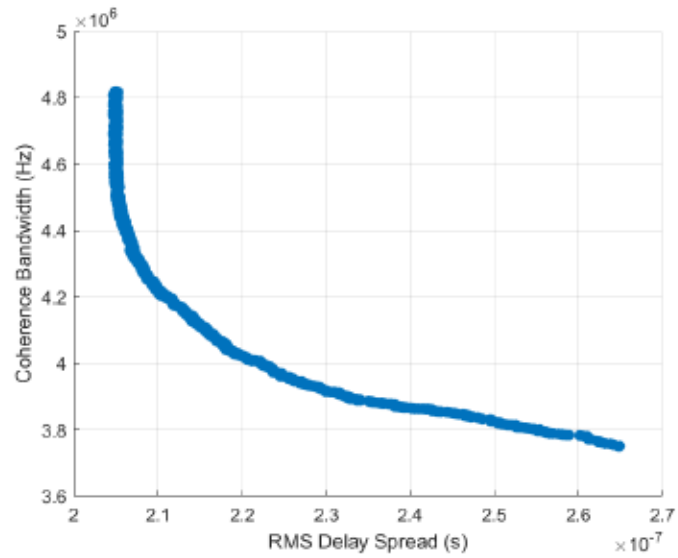


Figure 42 : *90% Coherence Bandwidth vs. RMS Delay Spread v2I*

Les valeurs moyennes de l'étalement du retard RMS (Average RMS Delay Spread) pour les trois scénarios sont les suivantes :

V2I: 217 ns, V2Pthrow: 211 ns, V2Paway: 220 ns

Ces différences de valeurs peuvent être attribuées aux variations dans les conditions de propagation du signal et les mouvements relatifs entre les émetteurs (TX) et les récepteurs (RX) dans chaque scénario.

Dans le scénario V2I, le TX est placé à proximité du mur de la mine et approche du RX, ce qui peut entraîner des réflexions et des diffractions supplémentaires sur les surfaces de la mine, affectant ainsi l'étalement du retard RMS.

En ce qui concerne le scénario V2Pthrow, le TX se rapproche du RX, ce qui peut réduire l'impact des réflexions et des diffractions par rapport au scénario V2I, entraînant un étalement du retard RMS légèrement inférieur.

Enfin, dans le scénario V2Paway, le TX s'éloigne du RX, engendrant ainsi une augmentation de la distance entre les deux entités et, par conséquent, une augmentation potentielle du nombre de trajets de propagation disponibles pour le signal. Cela pourrait entraîner un étalement du retard RMS légèrement supérieur en raison de l'augmentation des trajets multiples et des réflexions.

Ces différences de valeurs soulignent l'importance d'accorder une attention particulière aux conditions de propagation spécifiques et aux mouvements relatifs entre les émetteurs (TX) et les récepteurs (RX) lors de la conception et de l'évaluation des systèmes de communication sans fil souterrains.

Scenario	RMS
V2I	217 ns
V2Pthrow	211 ns
V2Paway	220 ns

Tableau 5 : Étalement du retard RMS (RMS Delay Spread) V2I V2pthrow V2paway MINE

Dans ce chapitre, nous avons présenté les tests et les résultats obtenus pour différents scénarios de communication sans fil, en utilisant un système USRP et GNU Radio. Les tests ont été effectués à la fois en laboratoire, à l'Université UQAT Val-d'Or, et dans une mine souterraine, à La Cité de l'Or à Val-d'Or, Canada.

Les tests en laboratoire ont été réalisés avec des scénarios LOS et NLOS, où le récepteur (RX) était placé sur un chariot se déplaçant à des vitesses variables entre 0 et 0,6 m/s. Les résultats ont montré que l'étalement du retard RMS, la largeur de bande de cohérence et l'effet Doppler varient en fonction des conditions de propagation et de la vitesse du chariot.

Dans le cadre des essais réalisés en mine souterraine, une diversité de scénarios a été investiguée, impliquant la fixation du récepteur (RX) sur un véhicule ainsi que sur un chariot. Les scénarios comprenaient LOS et NLOS avec déplacement du RX, ainsi que trois autres scénarios avec déplacement du TX (rapprochement, éloignement et changement de position près du mur de la mine). Les résultats ont révélé des différences dans l'étalement du retard RMS, la largeur de bande de cohérence et l'effet Doppler en fonction des conditions de propagation et des mouvements relatifs entre le TX et le RX.

En conclusion, les résultats obtenus dans ces tests mettent en évidence l'importance de considérer les conditions de propagation spécifiques et les mouvements relatifs entre les émetteurs et les récepteurs lors de la conception et de l'évaluation des systèmes de communication sans fil souterrains. Les différences observées entre les scénarios suggèrent que les performances du système peuvent varier en fonction de l'environnement et de la dynamique du système, soulignant ainsi la nécessité d'optimiser les systèmes de communication pour les conditions spécifiques à chaque application.

Ci-joint le tableau 6, synthétisant les résultats des essais réalisés dans diverses conditions environnementales et scénarios, en affichant les valeurs de l'étalement du retard RMS et du décalage Doppler. Ce tableau permet de prendre connaissance globalement des résultats obtenus pour les différents scénarios expérimentés tant en laboratoire qu'en mine souterraine, en considérant les valeurs de l'étalement du retard RMS et du décalage Doppler pour chaque scénario.

Environnement	Scénario	RMS Delay Spread	Doppler Shift (Hz)	Distance (m)
Laboratoire (UQAT)	LOS	222.68 ns	0.1 – 5.5	1 to 10
	NLOS	224 ns	0.1 – 5	1 to 10
Mine souterraine	LOS (déplacement RX avec véhicule)	24.45 µsec	0-35.5	1 to 30
	NLOS (déplacement RX avec véhicule)	105.4 µsec	0-30.5	1 to 30
	TX centre du mine rapprochement RX a laide dune chariot	211 ns	0-5.5	1 to 10
	TX centre du mine éloignement RX a laide dune chariot	220 ns	0-5.5	1 to 10
	TX près mur, rapprochement RX a laide dune chariot	217 ns	1-6.2	1 to 10

Tableau 6 : Résumé des résultats des tests - RMS Delay Spread et Doppler Shift par scénario et environnement

CHAPITRE 5

CONCLUSION

Le présent projet, réalisé dans le cadre de ce mémoire, s'est fixé pour objectif principal d'évaluer les performances des canaux de communication sans fil dans des environnements souterrains, en prenant en considération les conditions de propagation en ligne de visée directe (LOS) et hors ligne de visée directe (NLOS), ainsi que les mouvements relatifs entre l'émetteur et le récepteur. Afin d'atteindre ce dessein, nous avons implémenté des techniques de traitement du signal et mené une série d'expériences en utilisant une plateforme basée sur USRP et GNU Radio.

Nos expérimentations, réalisées à l'Université UQAT Val-d'Or et dans une mine souterraine à La Cité de l'Or, Val-d'Or, Canada, ont impliqué des scénarios variés, incluant le déplacement du récepteur (RX) sur un chariot et un véhicule, ainsi que le déplacement et le changement de position de l'émetteur (TX).

Grâce à cette méthodologie détaillée, nous avons pu observer comment les variations des conditions de propagation et les mouvements relatifs entre le TX et le RX affectent les performances du système de communication sans fil. Cette méthodologie approfondie nous a permis d'observer avec précision l'impact des variations des conditions de propagation ainsi que des mouvements relatifs entre l'émetteur (TX) et le récepteur (RX) sur les performances du système de communication sans fil.

Ce travail a apporté une contribution importante à notre compréhension des défis inhérents aux systèmes de communication sans fil en environnements souterrains. Les résultats obtenus constituent une base solide pour l'optimisation et l'amélioration des systèmes de communication sans fil souterrains, de manière approfondie les conditions

spécifiques de propagation et les mouvements relatifs entre les émetteurs et les récepteurs.

Cependant, cette étude présente quelques limites. Des opportunités pour des améliorations et des recherches futures restent ouvertes. Parmi les orientations possibles, nous pouvons citer l'étude des techniques de diversité, l'optimisation des protocoles de communication, la modélisation et la simulation, l'expérimentation avec d'autres bandes de fréquences et technologies sans fil, ainsi que l'analyse des effets de la topologie et des matériaux de la mine.

En conclusion, cette recherche a grandement enrichi notre compréhension des communications sans fil en environnement souterrain, tout en ouvrant de nouvelles perspectives pour des travaux futurs visant à améliorer encore davantage les performances et la fiabilité des systèmes de communication sans fil souterrains, en répondant de manière spécifique aux exigences des environnements miniers et souterrains.

REFERENCES

- [1] Khan, Muhammad Awais, et al. "Robust, Resilient and Reliable Architecture for V2X Communications." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (2021).
- [2] Chehri, Abdellah, Fortier, Paul, and Tardif, Pierre-Martin (2008) "An investigation of UWB-based wireless networks in industrial automation", *Int. J. Comput. Sci. Network Security*, 8 (2): 179-188.
- [3] Djaksimuratov, Karamatdin. "Underground mine mining systems and technological parameters of mine development." *Scienceweb academic papers collection* (2022).
- [4] Liu, Qi, et al. "A Highly Accurate Positioning Solution for C-V2X Systems." *Sensors* 21.4 (2021): 1175.
- [5] G. D. Troxel, E. Blossom, S. Boswell, A. Caro, I. Castineyra, A. Colvin and T. Hussain, "Adaptive dynamic radio open-source intelligent team (ADROIT): Cognitively-controlled collaboration among SDR nodes," in *IEEE 1st Workshop on Networking Technologies for SDR Networks*, pp. 8-17, 2006.
- [6] Haykin, S. (2005). *Cognitive radio: brain-empowered wireless communications*. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23(2), 201-220.
- [7] Radio, G. N. U. "GNU radio the free & open source radio ecosystem." Accessed Feb 3 (2021).
- [8] Ettus Research (2021). *USRP N210 - Ettus Research*. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.ettus.com/product/details/UN210-KIT>
- [9] Goldsmith, Andrea. *Wireless communications*. Cambridge university press, 2005..
- [10] Gyawali, Sohan, et al. "Challenges and solutions for cellular based V2X communications." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 23.1 (2020): 222-255.
- [11] Naik, Anil S., Sandi Kumar Reddy, and Govinda Raj Mandela. "A Systematic Review on Implementation of Internet-of-Things-Based System in Underground Mines to Monitor Environmental Parameters." *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D* (2023): 1-17.
- [12] Kassem, Edward, Roman Marsalek, and Jiri Blumenstein. "Frequency domain Zadoff-Chu sounding technique for USRPs." *2018 25th International Conference on Telecommunications (ICT)*. IEEE, 2018.
- [13] Merwaday, Arvind, et al. "USRP-based indoor channel sounding for D2D and multi-hop communications." *WAMICON 2014*. IEEE, 2014.
- [14] Debaenst, Wout, et al. "RMS delay spread vs. coherence bandwidth from 5G indoor radio channel measurements at 3.5 GHz band." *Sensors* 20.3 (2020): 750.
- [15] Cheng, Lin, et al. "A measurement study of time-scaled 802.11 a waveforms over the mobile-to-mobile vehicular channel at 5.9 GHz." *IEEE Communications Magazine* 46.5 (2008): 84-91.
- [16] Hossen, Md Sazzad, et al. "Performance analysis of an OFDM-based method for V2X communication." *2014 Sixth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*. IEEE, 2014.
- [17] *Wireless innovation Forum*, "Software Defined Radio" [Online] Available: http://www.wirelessinnovation.org/Introduction_to_SDR Last Accessed (27 March 2013)
- [18] K. W. Rudd and C. Anderson. *Software-Defined Radio*. IEEE Computing Society. June 2010.
- [19] Brousseau, Christian. *Caractérisation Large Bande de Fréquence: Application au radar et au sondage de canal*. Diss. Université Rennes 1, 2005.
- [20] Bernard Sklar (2001). *Digital Communications Fundamentals and Applications*. 2nd ed. PrenticeHall Inc., New Jersey
- [21] Jhong Sam Lee and Leonard E Miller (1988) . *CDMA System Engineering Hand book*. 1st ed. Artech House Inc., 1998, Noorwood, MA, USA
- [22] <https://www.howtogeek.com/763775/what-is-ubuntu/Coudert, F., Sunaga, Y., and Takegami, K. Use of axle box accelerations to detect track and rail irregularities>.
- [23] Du Plessis, Warren P. "Software-defined radio (SDR) as a mechanism for exploring cyber-electronic warfare (EW) collaboration." *2014 Information Security for South Africa*. IEEE, 2014.
- [24] Tutorial Points, "Python Tutorial" [Online] Available: <http://www.tutorialspoint.com/python/index.htm> Last Accessed (27 March 2013)
- [25] Laghate, Mihir, Shailesh Chaudhari, and Danijela Cabric. "USRP N210 demonstration of wideband sensing and blind hierarchical modulation classification." *2017 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*. IEEE, 2017.
- [26] Janjić, Miloš, Milenko Brković, and Miljko Erić. "Development of OFDM based secondary link: Some experimental results on USRP N210 platform." *2013 21st Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*. IEEE, 2013.
- [27] GNU Radio Project [Online] Available: <http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki> Last Accessed (27 March 2013)

- [28] Prbaswara, Aditya, Achmad Munir, and Andriyan Bayu Suksmono. "GNU Radio based software-defined FMCW radar for weather surveillance application." 2011 6th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA). IEEE, 2011.
- [29] GNU Radio, the GNU Software Radio project, https://wiki.gnuradio.org/index.php/Main_Page.
- [30] Gautier, Roland, C. Nsiala Nzéza, and Gilles Burel. "Synchronisation et estimation aveugle de séquences d'étalement pour une transmission de type cdma en liaison descendante." IEEE-SCS (Signaux, Circuits, Systèmes) (2004).
- [31] Reyes, Hector, Naima Kaabouch, and Wen-Chen Hu. "Spectrum Channel Characterization Using Delay and Doppler Spread Parameters." *J. Commun.* 9.3 (2014): 234-240.
- [32] Liu, Beiyuan, Jijia Liu, and Nei Kato. "Optimal beamformer design for millimeter wave dual-functional radar-communication based V2X systems." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 40.10 (2022): 2980-2993.
- [33] Xia, Xiang-Gen, Genyuan Wang, and Victor C. Chen. "Quantitative SNR analysis for ISAR imaging using joint time-frequency analysis-short time Fourier transform." *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems* 38.2 (2002): 649-659.
- [34] Chehri, Hamou. Étude et caractérisation d'un canal de propagation pour les réseaux VANET. Diss. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2014.
- [35] Holloway, Christopher L., et al. "Early time behavior in reverberation chambers and its effect on the relationships between coherence bandwidth, chamber decay time, RMS delay spread, and the chamber buildup time." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 54.4 (2012): 714-725.
- [36] Machado-Fernández, José Raúl. "Software defined radio: Basic principles and applications." *Revista Facultad de Ingeniería* 24.38 (2015): 79-96.
- [37] Kabir, Mohammad Akbar, and Liakot Ali. "Design of GLFSR based test processor chip." 2009 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED). IEEE, 2009.
- [38] Hammons, A. Roger, and Hesham El Gamal. "On the theory of space-time codes for PSK modulation." *IEEE Transactions on Information Theory* 46.2 (2000): 524-542.
- [39] Muslimin, Jusnaini, et al. "SDR-based transceiver of digital communication system using USRP and GNU radio." 2016 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE). IEEE, 2016.
- [40] Dubey, Arusha, et al. "Demonstration of vulnerabilities in GSM security with USRP B200 and open-source penetration tools." 2016 22nd Asia-Pacific Conference on Communications (APCC). IEEE, 2016.
- [41] Hoeher, Peter, and John Lodge. "' Turbo DPSK': iterative differential PSK demodulation and channel decoding." *IEEE Transactions on Communications* 47.6 (1999): 837-843.
- [42] Lu, Yanghua, et al. "Direct-current generator based on dynamic PN junctions with the designed voltage output." *Iscience* 22 (2019): 58-69.
- [43] Rasthofer, Siegfried, Steven Arzt, and Eric Bodden. "A machine-learning approach for classifying and categorizing android sources and sinks." *NDSS*. Vol. 14. 2014.
- [44] Trudel, Pierre. *Geologie de la mine Perron: region de Val-d'Or*. Le Service, Ministère de l'énergie et des ressources., 1985.