

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

**ÉTUDE ET DIMENSIONNEMENT D'UN RÉSEAU DE COMMUNICATIONS POUR LE  
SUPPORT DES SERVICES DE TÉLÉOPÉRATION DE VÉHICULES DANS UN  
ENVIRONNEMENT MINIER SOUTERRAIN**

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

MOHAMAD ELIA

DÉCEMBRE 2013



# BIBLIOTHÈQUE

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

## **Mise en garde**

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

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

## **Warning**

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

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



## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout d'abord mon directeur de recherche, le professeur Nadir Hakem, pour m'avoir proposé ce sujet de maîtrise, pour la confiance qu'il m'a témoignée et le temps qu'il m'a consacré pour diriger ce travail, pour ses encouragements, et pour sa méthodologie de travail.

Je tiens également à remercier mon codirecteur de recherche monsieur Mohamed Aïlas pour son aide, ses conseils et son soutien durant ces deux années.

Je voudrais remercier le professeur Nahi Kandil, pour m'avoir accueilli au sein du LRTCS et pour son soutien moral durant la période des études.

J'adresse mes remerciements à tous les étudiants et le personnel du LRTCS, du corps administratif de l'UQAT pour tout le soutien qu'ils m'ont accordé lors de mon séjour au laboratoire.

J'ai eu la chance d'effectuer mon projet de recherche dans l'entreprise minière IAMGold. De ce fait, je remercie mon superviseur en ce milieu pratique M. Pierre Simon, et M. Richard Tremblay pour leur aide, leur disponibilité et le temps qu'ils m'ont accordé, ainsi que tous les employés de l'entreprise qui m'ont aidé. Je tiens à remercier également le FQRNT, le CRSNG et IAMGold pour leur soutien financier.

Enfin, je tiens à exprimer mes chaleureux remerciements et ma gratitude à toutes les personnes qui m'ont aidé à accomplir ce travail et à tous les membres de ma famille pour leurs encouragements, leur compréhension et leur patience qu'ils m'ont accordés. Avec grande joie, je leur dédie ce travail.

## SOMMAIRE

REMERCIEMENTS .....	III
SOMMAIRE .....	IV
LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX.....	VIII
RÉSUMÉ.....	X
ABSTRACT .....	XI
GLOSSAIRE DES ABRÉVIATIONS.....	XII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Introduction.....	1
1.2 Téléopération .....	2
1.3 Problématique .....	5
1.4 Objectifs du projet de recherche .....	6
1.5 Méthodologie et plan du mémoire .....	6
1.6 Projet BMP.....	8
1.6.1 Type de projet .....	8
1.6.2 Objectif .....	8
1.6.3 Site Westwood .....	9
CHAPITRE 2 SYSTÈMES DE COMMUNICATIONS DANS LES ENVIRONNEMENTS MINIERES.....	10
2.1 Introduction.....	10
2.2. Contraintes de travail dans une mine souterraine .....	10
2.2.1 Conditions de travail.....	10
2.2.2 Structure du milieu.....	12
2.2.3 Extension des galeries minières .....	13
2.3 Inventaire des besoins en communications dans les mines.....	14

2.4 Les mediums de communications utilisés dans le milieu minier .....	15
2.4.1 Infrastructures filaires .....	16
2.4.1.1 Paire torsadée .....	16
2.4.1.2 Câble coaxial .....	17
2.4.1.3 Fibre optique.....	18
2.4.1.4 Câble coaxial rayonnant.....	20
2.4.2 Infrastructures sans fil.....	22
2.4.2.1 WiFi .....	22
2.4.2.2 WMN.....	24
2.4.2.3 WSN.....	28
2.4.3 Utilisation des données sur un câble coaxial.....	30
2.4.3.1 DOCSIS.....	31
2.5 Conclusion .....	37
CHAPITRE 3 CONTEXTE DE L'ÉTUDE.....	38
3.1 Introduction.....	38
3.2 Besoins de communications de Westwood.....	38
3.3 Architecture du réseau de communications de Westwood .....	39
3.4 Multiplexeur.....	41
3.5 Câble rayonnant installé dans la mine.....	41
3.6 Amplificateur .....	43
3.7 Terminaux.....	44
3.8 Applications .....	44
3.9 Conclusion .....	45
CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET ANALYSE DES MESURES.....	46
4.1 Introduction.....	46

4.2 Description détaillée du problème .....	47
4.3 Techniques de mesures .....	48
4.3.1 Domaine temporel.....	49
4.3.1.1 Les techniques temporelles .....	49
4.3.2 Domaine fréquentiel.....	51
4.3.2.1 Analyseur de réseau vectoriel.....	52
4.3.2.1.1 Paramètres $S$ .....	53
4.3.2.1.2 Adaptation d'impédance .....	54
4.3.2.4 Autres équipements de mesures .....	56
4.3.3 Comparaison des deux techniques de sondage du canal.....	57
4.4 Mesures sur le câble rayonnant à Westwood.....	58
4.4.1 Système de mesure.....	58
4.4.2 Analyse des mesures d'atténuation à la fréquence 150 MHz.....	61
4.4.3 Analyse des mesures d'atténuation à la fréquence 450 MHz.....	64
4.5 Mesures sur le câble rayonnant au laboratoire.....	66
4.5.1 Mesures de propagation .....	67
4.5.1.1 Système de mesure.....	67
4.5.1.2 Analyse des mesures de propagation à la fréquence 150 MHz.....	69
4.5.1.3 Analyse des mesures de propagation à la fréquence 450 MHz.....	70
4.5.2 Mesures des paramètres $S_{11}$ et $S_{21}$ .....	71
4.5.2.1 Système de mesure.....	71
4.5.2.2 Analyse des mesures du paramètre $S_{11}$ .....	73
4.5.2.3 Analyse des mesures du paramètre $S_{21}$ .....	75
4.6 Conclusion .....	77
CHAPITRE 5 SIMULATION ET MODÉLISATION .....	78

5.1 Introduction.....	78
5.2 Logiciel de simulation.....	78
5.3 Modélisation de la poussière.....	79
5.4 Modélisation du câble rayonnant.....	81
5.4.1 Analyse du paramètre $S_{11}$ du câble simulé.....	82
5.4.2 Analyse du paramètre $S_{21}$ du câble simulé.....	84
5.5 Propositions de solutions.....	86
5.6 Conclusion.....	89
CHAPITRE 6 CONCLUSION.....	90
ANNEXE A.....	92
ANNEXE B.....	93
BIBLIOGRAPHIE.....	97



## LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1: Architecture générale d'un système de téléopération [4].....	3
Figure 1.2: Exemple d'une application de téléopération .....	3
Figure 1.3: Classement de la TAO, TDO et TSA selon le degré d'autonomie du dispositif esclave [4].....	5
Figure 1.4: Vue générale de la mine Westwood et de la rampe d'entrée.....	9
Figure 2.1: Photo d'une galerie minière.....	11
Figure 2.2: Exemple d'un plan minier souterrain .....	13
Figure 2.3: Services offerts par les réseaux sans fil [10] .....	14
Figure 2.4: Exemple des infrastructures installées dans une mine souterraine.....	16
Figure 2.5: Exemple d'une fibre optique .....	19
Figure 2.6: Fibre à saut d'indice .....	20
Figure 2.7: Fibre à gradient d'indice.....	20
Figure 2.8: Câble rayonnant.....	21
Figure 2.9: Exemple des routeurs et des clients dans WMN [23].....	25
Figure 2.10: Structure d'un nœud capteur [27].....	28
Figure 2.11: Bandes de fréquences allouées pour DOCSIS.....	31
Figure 2.12: CMTS de type Motorola.....	35
Figure 2.13: Détails des canaux entre CMTS et CM.....	36
Figure 3.1: Architecture du réseau de communications dans la mine.....	39
Figure 3.2: Exemple des applications sur DOCSIS .....	40
Figure 3.3: Multiplexeur de type Varis .....	41
Figure 3.4: Exemple d'un câble coaxial rayonnant [16].....	43
Figure 3.5: Amplificateur de type Varis .....	43
Figure 3.6: Câble Modem [66].....	44
Figure 4.1: Un plan minier qui montre le câble installé avec poussière .....	47
Figure 4.2: Exemple d'un signal appliqué à l'entrée du canal.....	48
Figure 4.3: Technique de mesure dans le domaine temporel [57] .....	49
Figure 4.4: Technique de mesure par impulsion périodique [63].....	50
Figure 4.5: Technique de mesure dans le domaine fréquentiel [57].....	51

Figure 4.6: Simple matériel doté de deux ports caractérisé par des paramètres S [59].....	53
Figure 4.7: Ligne de transmission.....	55
Figure 4.8: Schéma détaillé des mesures à Westwood .....	59
Figure 4.9: Schéma du protocole de mesure expérimental à Westwood (à l'entrée de l'amplificateur) .....	59
Figure 4.10: Schéma du protocole de mesure expérimental à Westwood (à la sortie de l'amplificateur) .....	60
Figure 4.11: Exemple d'un affichage de l'analyseur de spectre .....	60
Figure 4.12: Atténuations à $f=150$ MHz - Mesures Westwood .....	62
Figure 4.13: Variation des atténuations à $f=150$ MHz - Mesures Westwood.....	63
Figure 4.14: Atténuations à $f=450$ MHz - Mesures Westwood .....	64
Figure 4.15: Variation des atténuations à $f=450$ MHz - Mesures Westwood.....	65
Figure 4.16: Mesures au dépôt du laboratoire.....	67
Figure 4.17: Schéma du protocole de mesure de propagation au laboratoire .....	68
Figure 4.18: Amplitude mesurée à $f=150$ MHz à une distance du câble de $Y=2$ m .....	69
Figure 4.19: Amplitude mesurée à $f=450$ MHz à une distance du câble de $Y=2$ m .....	70
Figure 4.20: Schéma du protocole de mesure des paramètres S au laboratoire .....	72
Figure 4.21: Mesures du paramètre $S_{11}$ au laboratoire.....	73
Figure 4.22: Mesures du paramètre $S_{21}$ au laboratoire.....	75
Figure 4.23: Blindage [65].....	76
Figure 5.1: La structure réelle du câble rayonnant Trilogy [61] .....	80
Figure 5.2: Vue générale et détaillée de la structure simulée du câble rayonnant Trilogy .....	81
Figure 5.3: Simulation du paramètre $S_{11}$ - Câble rayonnant Trilogy .....	82
Figure 5.4: Simulation du paramètre $S_{21}$ - Câble rayonnant Trilogy .....	84
Figure 5.5: Comparaison du paramètre $S_{21}$ entre mesures et simulations sans poussière.....	85
Figure 5.6: Distance séparant les amplificateurs.....	88
Tableau 2.1: Largeur de bande et taux maximal de bits du canal dans DOCSIS [9].....	34
Tableau 4.1: La comparaison des mesures dans le domaine fréquentiel et dans le domaine temporel [57].....	57
Tableau 4.2: Paramètres de l'analyseur de spectre .....	61
Tableau 4.3: Paramètres du câble .....	61

## RÉSUMÉ

Le travail dans les mines et surtout dans des endroits profonds, est plus dangereux, plus désagréable et coûte plus cher. Le besoin d'un système de communication fiable est donc primordial pour les applications de surveillance, de contrôle à distance, de transmission vidéo à haute vitesse et pour assurer un moyen de communications entre les mineurs pour accroître leur sécurité.

L'installation et le déploiement des systèmes de communications dans cet environnement est complexe, d'où la nécessité et l'importance d'un bon choix du type de système de communications, en prenant en considération la complexité d'installation et de réparations des équipements.

Le but de ce projet est de quantifier et d'étudier l'infrastructure du réseau de communications existant à la mine Westwood, pour supporter plusieurs applications dont la plus importante est la téléopération.

En plus, le but est de proposer des solutions pour résoudre le problème des atténuations anormales qui affectent le signal dans le câble rayonnant<sup>1</sup>, et influent fortement le système de la voix, empêchant par conséquent la communication entre les sites miniers ou les mineurs.

Des mesures et des tests ont été menés à la mine Westwood ainsi qu'au Laboratoire de Recherche Télébec en Communications Souterraines (LRTCS) pour résoudre le problème de l'atténuation. Ainsi, des simulations et des analyses pour étudier les performances des câbles rayonnants ont été réalisées à l'aide du logiciel CST (Computer Simulation Technology).

Les résultats des mesures et des simulations nous ont permis de proposer plusieurs solutions dans le but de réduire l'effet de ce problème et de constituer une étude exhaustive qui peut servir comme référence dans les nouvelles installations de ce type des systèmes de communications.

---

<sup>1</sup> Plusieurs termes sont utilisés pour désigner le nom du câble qui supporte les communications dans les environnements souterrains tels que : câble rayonnant, câble fuyant ou câble à fuites (en français) et *leaky feeder cable*, *leaky waves cable* ou *radiating cable* (en anglais).

Tout au long du mémoire, les termes «câble rayonnant» et «*leaky feeder cable*» seront utilisés.

## ABSTRACT

Work in the mines and mostly in deep places, is dangerous, unpleasant and expensive. The need for a reliable communication system is therefore essential to ensure applications' monitoring, remote control and video transmission at high speed, and to ensure a communication medium between miners to increase their safety.

The installation and deployment of communication systems in this environment is nevertheless complex. Hence, the need and the importance of a good choice of the type of the communication system, taking into account the complexity of the installation and the repairs of equipment is required.

The goal of this project is to quantify and study the communication network infrastructures existing at Westwood mine to support multiple applications, the most important being the teleoperation. In addition, the objective is to suggest solutions to resolve the problem of abnormal attenuation that affects the signal in the leaky feeder cable and influences strongly the voice system, which prevents communication between mine workers.

Measurements and tests have been performed in the mine Westwood and at LRTCS, to solve the attenuation problem. As well, simulations and analysis for the performance of leaky feeder cables were performed using CST.

The results of measurements and simulations have allowed us to propose several solutions in order to reduce the effect of this problem and to provide an exhaustive study that can serve as a reference in the new installations of this type of communications systems.

## GLOSSAIRE DES ABRÉVIATIONS

ACIS	Alan, Charles, Ian's System
AP	Avec Poussière
Base-T	Baseband Data Transmission
BER	Bit Error Rate
BNC	Bayonet Neill-Concelman
BMP	Bourse en Milieu Pratique
CCK	Complimentary Code Keying
CM	Cable Modem
CMTS	Cable Modem Termination System
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
CST	Computer Simulation Technology
CRSNG	Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie
dB	Decibel
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specifications
DSL	Digital Subscriber Line
DUT	Device Under Test
FQRNT	Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies
f	frequency
GHz	gigaHertz
HFC	Hybrid Fiber Coax
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
kbps	kbits par seconde kbits/s
LAN	Local Area Network
LF	Leaky Feeder
LRTCS	Laboratoire de Recherche Télébec en Communications Souterraines

MAC	<b>Media Access Control</b>
Mbps	<b>Mégabits par seconde</b> Mbts/s
MCNS	<b>Multimedia Cable Network System</b>
MHz	<b>MegaHertz</b>
m	<b>Meter</b>
mm	<b>Millimeter</b>
Mux	<b>Multiplexer</b>
OSI	<b>Open System Interconnection</b>
PLC	<b>Programmable Logic Controller</b>
QoS	<b>Quality of Service - Qualité de service</b>
R-D	<b>Research and Development</b>
RF	<b>Radio Frequency</b>
RFID	<b>Radio Frequency IDentification</b>
RJ45	<b>Registered Jack 45</b>
ROS	<b>Rapport d'Ondes Stationnaires</b>
SCDMA	<b>Synchronous Code Division Multiple Access</b>
SP	<b>Sans Poussière</b>
TAO	<b>Téléopération Assistée par Ordinateur</b>
TCP	<b>Transmission Control Protocol</b>
TDMA	<b>Time Division Multiple Access</b>
TDO	<b>Téléopération à Désignation d'Objectif</b>
TFTP	<b>Trivial File Transfer Protocol</b>
ToD	<b>Time of Day</b>
TSA	<b>Téléopération Semi Autonome</b>
UHF	<b>Ultra High Frequency</b>
UIT	<b>Union Internationale des Télécommunications</b>
USB	<b>Universal Serial Bus</b>
UWB	<b>Ultra Wide Band</b>
VHF	<b>Very High Frequency</b>

VNA	<b>Vector Network Analyzer</b>
WiFi	<b>Wireless Fidelity</b>
WiMAX	<b>Worldwide Interoperability for Microwave Access</b>
WMN	<b>Wireless Mesh Network</b>
WPAN	<b>Wireless Personal Area Network</b>
WSN	<b>Wireless Sensor Network</b>

# Chapitre 1

## INTRODUCTION

### 1.1 Introduction

On définit les télécommunications comme toute transmission, émission et réception à distance, de signes, de signaux, d'écrits, d'images, de sons ou de renseignements de toutes natures, par fil électrique, radioélectricité, liaison optique, ou autre support physique. Une de ses branches les télécommunications sans fil, dans lesquelles les réseaux sont basés sur une liaison utilisant des ondes électromagnétiques (radio ou infrarouge) au lieu d'un support filaire. Ils permettent de relier très facilement des équipements distants de quelques mètres à plusieurs kilomètres. Il existe plusieurs technologies sans fil et elles se distinguent par la fréquence d'émission, le débit et la portée des transmissions [1].

La communication sans fil connaît des progrès et des développements rapides au cours des dernières années, grâce à la forte demande de la population et de l'industrie.

Dans les mines, plus le travail se situe dans des endroits profonds, plus cela il devient dangereux, désagréable et coûte plus cher. D'où, la nécessité de développer des systèmes de communications dans les mines d'un point de vue sécuritaire et économique.

Suite à l'importance et la nécessité de la communication sans fil dans les mines souterraines, plusieurs compagnies minières au Canada investissent dans des



systèmes de communications modernes permettant le contrôle automatique des machines, la télésurveillance, la transmission vidéo à très haute vitesse, ce qui assure une sécurité accrue des ouvriers avec la possibilité de la radio localisation, une croissance de la production. On peut aussi utiliser des téléphones cellulaires avec possibilité d'interconnexions directes entre les ouvriers de la mine et leurs centres d'exploitations. [2]

Pour atteindre ces objectifs, une solution de communication a été développée dans la mine Westwood. Cette solution est basée sur le standard DOCSIS permettant la fonctionnalité de la radio dans les bandes de fréquences VHF ou UHF, et l'intégration de la vidéo et le transfert des données à haute vitesse pour les différentes applications telles que l'"*automine*". Le support de communication utilisé pour cette application, comme dans la majorité des mines d'ailleurs est le câble rayonnant.

Le standard DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specifications), maintenant reconnu par CableLabs et certifié pour les modems câbles est une interface standard pour les câbles modems présentant les équipements qui traitent les signaux de données entrants et sortants entre un opérateur de télévision par câble et un ordinateur personnel ou de travail, ou une télévision. [3]

## 1.2 Téléopération

La téléopération est un ensemble de principes et de techniques qui permettent à l'opérateur humain de transposer ses capacités d'action ou d'accomplir une tâche en temps réel à distance, grâce à un système robotique d'intervention (dispositif esclave), commandé à partir d'une station de contrôle (dispositif maître), par l'intermédiaire d'un canal de télécommunications (Figure 1.1).

L'importance de la téléopération a été reconnue à cause du besoin d'améliorer la capacité de l'homme à accéder à des lieux où il y a des difficultés d'accès.



Figure 1.1: Architecture générale d'un système de téléopération [4]

De nos jours, la téléopération s'applique aussi bien aux bras redondants, aux préhenseurs mécaniques polyarticulés et à diverses sortes de robot mobiles à roues et à pattes surtout dans les mines souterraines (Figure 1.2) [4].

Une série de véhicules miniers à des fins spéciales est en cours de conception pour les fonctionnements semi-autonomes et pour la téléopération. Ces développements sont possibles grâce aux progrès technologiques effectués dans le domaine des communications souterraines sans fil.

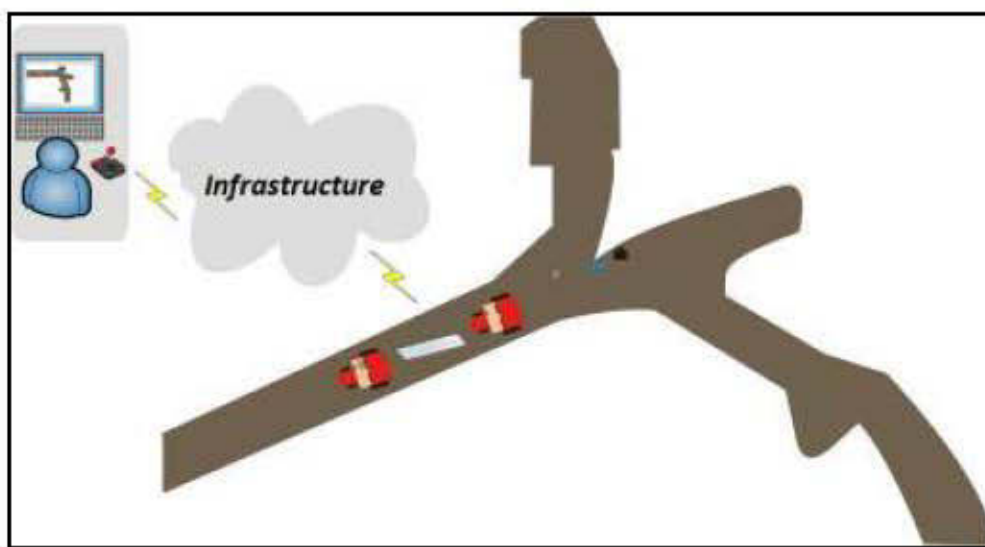


Figure 1.2: Exemple d'une application de téléopération

Cependant, un certain nombre de problèmes existent dans ces systèmes comme l'inévitable problème de délai dû au canal de transmission entre les deux sites, maître et esclave, impliquant ainsi un retard de transmission d'informations sensorielles utiles à l'opérateur.

L'évolution de l'informatique et des supports de télécommunications numériques est à l'origine de l'évolution de la téléopération. Grâce à eux, les robots esclaves ont pu être déportés à des distances considérables [5].

Plusieurs approches et concepts ont été proposés pour améliorer et faire évoluer les systèmes de téléopération. La plupart des systèmes de téléopération sont basés sur les modes d'interaction personne-machine représentés dans les approches suivantes : [4]

- la Téléopération Assistée par Ordinateur – TAO : elle est vue comme une voie intermédiaire entre la téléopération originelle bas niveau et la supervision.

- la Téléopération à Désignation d'Objectif (supervisée) – TDO : dans ce mode, l'opérateur est considéré comme un superviseur. L'intervention de l'opérateur se limite dans ce cas à la désignation d'objectifs qui seront réalisés par le robot.

- la Téléopération Semi Autonome – TSA : la plupart des systèmes de téléopération actuels s'orientent vers l'utilisation simultanée des deux concepts précédents (TAO et TDO). En effet, ils tentent de moderniser la téléopération par une meilleure exploitation simultanée de l'autonomie du robot et des capacités de l'opérateur.

Le classement de ces trois concepts selon le degré d'autonomie du dispositif esclave est résumé dans la figure 1.3.

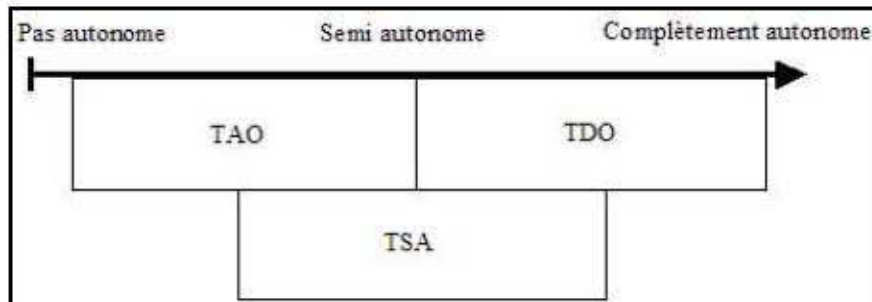


Figure 1.3: Classement de la TAO, TDO et TSA selon le degré d'autonomie du dispositif esclave [4]

Les problèmes les plus rencontrés dans la téléopération sont :

- les délais (retards) de transmission.
- la réalisation d'une transparence idéale.
- la prise en compte du facteur humain et de la sécurité.
- l'autonomie et le partage de la commande.

### 1.3 Problématique

Il s'agit dans ce projet de concevoir un réseau sans fil capable de transmettre principalement des vidéos en temps réels, afin de supporter une application de téléopération de véhicules mobiles évoluant dans un environnement confiné minier. Ce réseau doit servir aussi de support pour des applications moins exigeantes en termes de qualité de services (QoS), tels que les échanges de voix ou de données.

La difficulté réside dans la planification judicieuse du déploiement de ce réseau pour répondre au besoin actuel et futur. De plus, l'analyse de la performance du réseau permettra de prédire son comportement pour les futures extensions de celui-ci, avec une augmentation de nombres de véhicules mobiles télé-opérés et avec une augmentation de la zone de communication à couvrir avec ce réseau.

Cependant, la propagation du signal dans un environnement minier est gouvernée par de nombreux phénomènes physiques tels que la réflexion, la réfraction, la diffraction et la diffusion en raison de la composition du sol, des murs et du plafond dans un environnement aussi complexe. La qualité d'un signal reçu par un terminal dépend donc de plusieurs facteurs, comme la distance entre l'émetteur et le récepteur ou la perte due aux obstacles ou aux trajets multiples.

De plus, un curieux problème d'atténuation insolite du signal a été constaté. Afin d'investiger les causes de cette atténuation, des études ont été réalisées, surtout après l'observation d'un dépôt d'une couche de poussière sur le câble. Cette atténuation affecte particulièrement le câble rayonnant déployé sous terre pour supporter l'application automine. Elle risque de compromettre une partie des services supportés par le réseau de communication de la mine.

#### **1.4 Objectifs du projet de recherche**

Le but du projet est d'œuvrer à quantifier l'ampleur du problème des atténuations insolites en procédant à des mesures, des tests et des simulations sur le câble rayonnant pour caractériser ces atténuations et pour trouver une solution convenable à ce problème.

#### **1.5 Méthodologie et plan du mémoire**

Afin d'atteindre les objectifs de ce projet, plusieurs étapes ont été suivies :

- La première étape consistait à modéliser le fonctionnement des câbles rayonnants, l'infrastructure du réseau, les véhicules et les équipements actifs du réseau de communication nécessaires à la validation du fonctionnement du système.

- En deuxième étape, des tests et des mesures ont été menés.
- La troisième étape consistait à simuler la structure du câble rayonnant en utilisant le logiciel CST.
- Une bonne étude des mesures et des simulations constituait une étape importante pour trouver une solution.
- Suite à l'étude de toutes les mesures et les simulations réalisées, présenter, finalement, une proposition de solution pour le problème des atténuations.

Le travail résultant de l'exécution du plan ci-dessus est présenté dans ce mémoire, qui est composé de six chapitres dont le contenu, est comme suit :

- Le premier chapitre présente une introduction générale définissant la problématique, la téléopération, l'objectif du projet, la méthodologie, le plan du mémoire ainsi que le type du projet.
- Le deuxième chapitre présente l'environnement minier et les systèmes de communications.
- Au troisième chapitre, les besoins de communications dans la mine, l'architecture du réseau de communications à la mine Westwood et les parties qui le constituent sont décrites.
- Le quatrième chapitre présente les systèmes et les équipements de mesures et l'analyse des résultats obtenus.
- Dans le cinquième chapitre, nous présentons la modélisation du câble rayonnant et de la poussière, les résultats des simulations, une analyse de ces résultats et une proposition de solutions pour répondre à la problématique du sujet de recherche.
- Finalement, au chapitre six, nous finissons par une conclusion générale du mémoire où l'on formule des recommandations et des perspectives.

## **1.6 Projet BMP**

### **1.6.1 Type de projet**

Le programme de bourses de recherche en milieu de pratique BMP Innovation est offert conjointement par le Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT) et le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie (CRSNG). Il permet d'attribuer une aide financière à des étudiants inscrits à la maîtrise ou au doctorat qui désirent réaliser un projet de recherche relié au domaine des sciences naturelles et du génie dans le cadre d'un partenariat université-entreprise [6].

### **1.6.2 Objectif**

Le programme BMP Innovation a pour objectif de favoriser l'accroissement des compétences en innovation des entreprises et l'employabilité des jeunes diplômés aux études supérieures par des partenariats universités-entreprises :

- Par l'acquisition d'expériences et de compétences personnelles et professionnelles;
- Par le développement d'initiatives innovatrices en formation;
- Par la création de réseaux de collaborations et de transfert des connaissances;
- En encourageant les entreprises à investir en formation et en R-D;
- En contribuant à l'accélération de l'innovation dans les secteurs clés des régions du Québec [6].

Une des plus importantes conditions d'admissibilité à cette bourse est la possession d'un bon dossier et d'une bonne moyenne cumulative dans les études universitaires.

### 1.6.3 Site Westwood

Comme le nom l'indique, le projet doit être en milieu de pratique, donc notre milieu de travail était une entreprise minière nommée IAMGold. Le projet s'est exécuté sur le site Westwood de l'entreprise.

Le projet Westwood est situé sur la propriété Doyon, à 2,5 kilomètres à l'est de la mine d'or Doyon, à environ 40 kilomètres à l'est de Rouyn-Noranda dans le nord-ouest du Québec, au Canada.



Figure 1.4: Vue générale de la mine Westwood et de la rampe d'entrée



## **Chapitre 2**

### **SYSTÈMES DE COMMUNICATIONS DANS LES ENVIRONNEMENTS MINIERES**

#### **2.1 Introduction**

Ce chapitre présente les problèmes liés à l'environnement et au travail dans les mines et présente également les différentes infrastructures de communications filaires et sans fils qui y sont utilisées. En plus, nous présentons le standard DOCSIS et son principe de fonctionnement.

#### **2.2. Contraintes de travail dans une mine souterraine**

##### **2.2.1 Conditions de travail**

Comme l'environnement minier est un milieu dangereux, humide et sombre, les conditions de travail dans une galerie minière souterraine (Figure 2.1) sont plus difficiles et plus contraignantes que dans un environnement plus conventionnel [7]. Les galeries présentent un certain nombre de caractéristiques qui rendent l'étude de la propagation dans ce milieu complexe et exigeante, comme la rugosité des parois et la topologie à variation continue du milieu. Il est donc indispensable d'étudier les problèmes du milieu de propagation afin d'implanter un réseau de communication qui permettra d'assurer la sécurité des mineurs et l'automatisation des tâches dangereuses.

L'étude de la propagation dans un tel milieu est une étape préliminaire au déploiement des différents modules du réseau afin de profiter efficacement d'une communication large bande. Cette étude est l'une des conditions qui permettront une

amélioration de la productivité, la condition principale de la viabilité et de la compétitivité des industries minières [8] [9].



Figure 2.1: Photo d'une galerie minière

Divers accidents peuvent survenir dans une mine, ils sont généralement provoqués par la chute de roches, le déclenchement d'incendies ou par une intoxication liée à une fuite de gaz dans le milieu. Par conséquent, les outils et les équipements utilisés dans une mine doivent être robustes et satisfaire aux exigences du milieu. Il est donc important de préconiser un réseau de communications ayant le plus possible de composants sans fil, énergétiquement autonome et de bien le dimensionner de façon à supporter le trafic sur toutes les périodes en profitant de la qualité et de la flexibilité de ce réseau [8].

### 2.2.2 Structure du milieu

Le milieu minier change constamment suite à la création de nouvelles galeries, à l'abandon et à l'éboulement d'autres galeries. C'est ce qui rend difficile la prédiction de la topologie d'une galerie minière, surtout celle en cours d'exploitation. Une solution à envisager est que les équipements soient flexibles et démontables de manière à s'adapter à divers changements topologiques. Ils doivent également être faciles à déployer et capables d'assurer une connexion radio à court terme dans la zone d'exploitation [8].

Dans l'industrie minière, il existe deux types des mines: à ciel ouvert et souterraines. Le type d'exploitation dépend de la localisation du gisement dans le sol.

Visuellement, une mine souterraine ressemble à une fourmilière. En réalité, il s'agit d'un immense réseau de tunnels verticaux et horizontaux (Figure 2.2) permettant d'atteindre le gisement minier à extraire.

À l'intérieur d'une mine souterraine, on retrouve une rampe d'accès, des galeries, des puits d'accès et des puits d'aération.

Grâce aux équipements et aux infrastructures de communication nécessaires installées dans les mines souterraines, ces dernières se comportent comme une grande usine sous terre et même comme une petite ville.

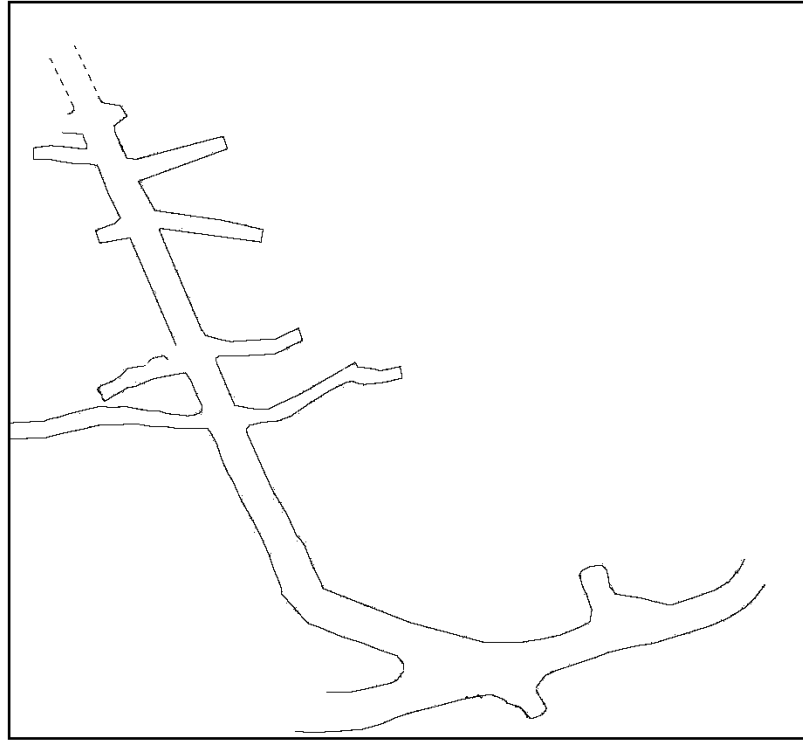


Figure 2.2: Exemple d'un plan minier souterrain

### 2.2.3 Extension des galeries minières

Les mines s'étendent sur une grande superficie, allant parfois jusqu'à quelques kilomètres, mais sont souvent non ou mal éclairées dans la plupart des zones sauf celles de travail. De nos jours, les mineurs utilisent les casques dotés des lampes, alimentées par une batterie, pour assurer l'éclairage et favoriser le déplacement dans les galeries. En outre, il est important de choisir un moyen de communication qui transmet le signal avec une perte minimale pour assurer la communication entre les mineurs ainsi que le fonctionnement des systèmes automatisés à longue distance. Pour atteindre cet objectif, il faut donc installer un réseau câblé à faibles atténuations et/ou un réseau sans fil qui opère sur une plage de fréquence où les affaiblissements du signal sont moindres. Les réseaux à architectures de plus en plus flexibles, à courte

portée et à source d'alimentation autonome sont donc indispensables pour couvrir les divers corridors dont les formes sont variables [9].

### 2.3 Inventaire des besoins en communications dans les mines

La figure 2.3 présente quelques types de services pouvant être disponibles avec les systèmes de réseaux de communication sans fil. La capacité d'un réseau est limitée par le type de services à utiliser. Elle peut être aussi limitée par l'environnement (rural, urbain, courte portée) dans lequel l'application est déployée ou selon que la communication entre le nœud source et le nœud destinataire soit unidirectionnelle, bidirectionnelle, point à point ou même à point multiples.

Pour chacun des services illustrés à la figure 2.3 ci-dessous, on montre le débit nécessaire en kbps en fonction de la communication établie entre la source et le destinataire si elle est bidirectionnelle, unidirectionnelle, point à point ou même multipoint [8].

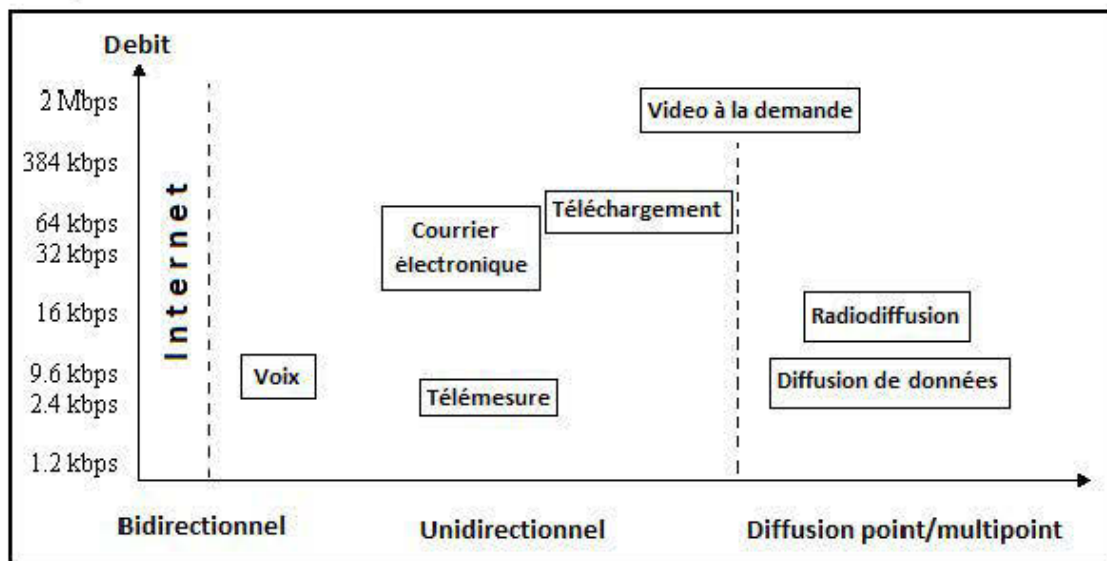


Figure 2.3: Services offerts par les réseaux sans fil [10]

Les services cités ci-dessus sont utilisés dans les mines pour les applications suivantes :

- Les salles de contrôle centrales pour l'exploitation minière.
- Les systèmes de contrôle de convoyeurs à bande complexe.
- L'automatisation des systèmes de contrôle à distance.
- Analyse de charbon en cendres en ligne.
- Le système de détection d'incendie.
- Système technique d'inspection vidéo de la zone de transport.
- Le système de caméra vidéo.
- Le système de communication de voix.
- Le transfert des données par l'utilisation des messageries et des ordinateurs.

#### **2.4 Les mediums de communications utilisés dans le milieu minier**

Malgré des efforts dans les dernières années pour l'utilisation des points d'accès sans fil, le câble rayonnant reste le support de communication le plus connu et le plus utilisé dans les mines. Pour la solution des points d'accès, la liaison entre ces derniers qui forment l'infrastructure du réseau reste le plus souvent filaire. Dans cette partie, la classification des réseaux se fera selon la technologie de l'infrastructure utilisée par les usagers du réseau pour accéder à l'infrastructure verticale. Selon le cas, le moyen de transport du signal peut varier entre une infrastructure filaire ou sans fil.

Dans les mines, nous distinguons les infrastructures de transport du signal simples basées essentiellement sur les câbles rayonnants et les infrastructures basées sur la fibre optique, le câble coaxial et le câble torsadé et d'autres technologies comme le WiFi, WMN et WSN (exemple figure 2.4). Ces infrastructures sont présentées dans la suite du chapitre.

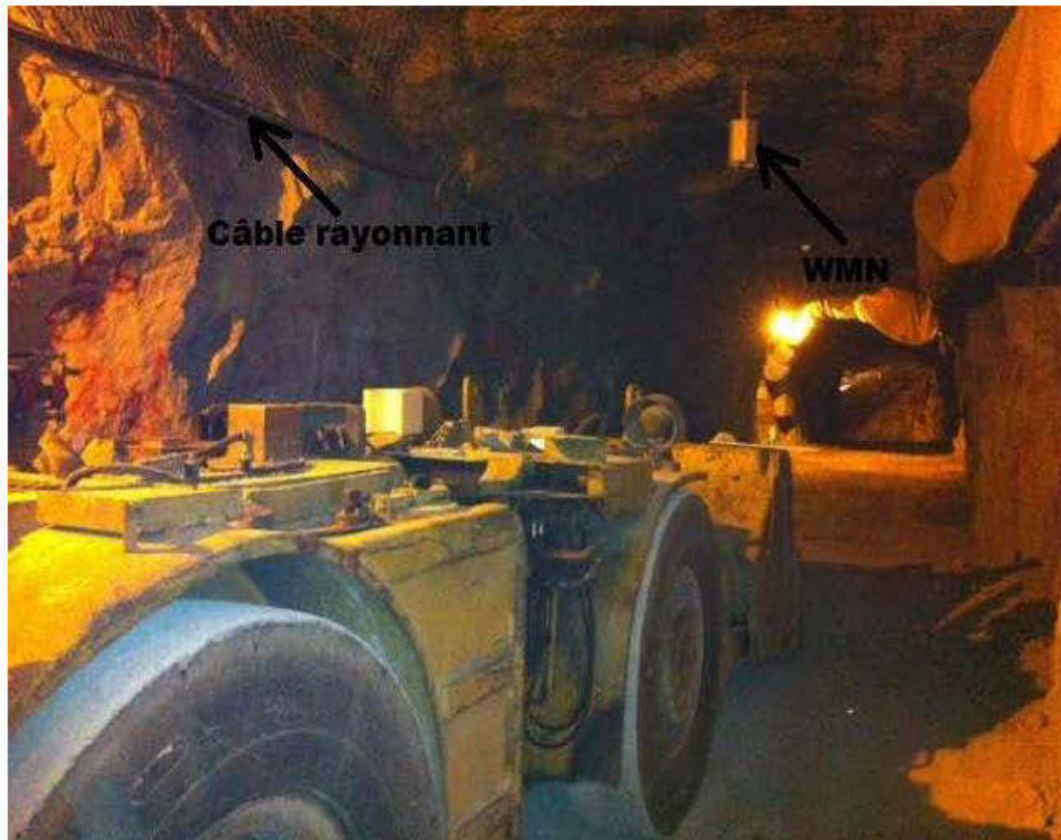


Figure 2.4: Exemple des infrastructures installées dans une mine souterraine

## 2.4.1 Infrastructures filaires

### 2.4.1.1 Paire torsadée

Ethernet est fondamentalement une norme de communication (IEEE 802.3) utilisée sur les réseaux locaux. Il a été introduit dans les travaux sur la modélisation OSI au début des années 1980. Les éléments de la couche physique (couche 1 OSI) sont définis par les normes IEEE des sous-comités 802.3 et la méthode d'accès CSMA/CD correspond à la partie MAC de la couche liaison (couche 2 OSI).

Les systèmes Ethernet les plus couramment installés sont appelés 10 Base-T ou 100 Base-T et offrent des vitesses de transmission allant jusqu'à 100 Mbps [11].

La paire torsadée est un câble formé de 4 paires torsadées qui sont souvent blindées afin de limiter les interférences. Comme le blindage est fait de métal, celui-ci constitue également un référentiel de masse.

La paire torsadée demeure la première technologie utilisée pour le transport de la voix. Elle offre la largeur de bande nécessaire à la transmission de la voix et utilise des modems spéciaux pour envoyer les informations d'un point à un autre.

Le débit offert par une paire torsadée est toujours faible, malgré l'apparition de nouvelles technologies, et nécessite des éléments réseautiques comme les répéteurs pour couvrir une distance plus longue (chaque 100 m). Elle est très utilisée et peu coûteuse. Elle est bien adaptée pour des couvertures sur de courtes distances.

L'infrastructure filaire est constituée essentiellement du câble torsadé et l'interconnexion entre les câbles est assurée par des dérivateurs pour desservir toutes les galeries de la mine. Le signal au niveau de l'infrastructure sera amplifié par des amplificateurs de ligne convenablement installés. Dans un tel réseau, un point d'accès assure l'acheminement du trafic des mobiles vers l'infrastructure du réseau [8].

#### **2.4.1.2 Câble coaxial**

Le câble coaxial est formé de deux fils concentriques, de forme cylindrique, séparés par un diélectrique. Un des fils est le conducteur central et l'autre est le conducteur extérieur. Une gaine protectrice couvre ces conducteurs. Cette gaine est recouverte par une armure de protection extérieure. Le rapport des diamètres des conducteurs (central et extérieur) est gardé constant afin de garantir une impédance caractéristique constante tout au long du câble.



Les câbles coaxiaux sont utilisés comme des lignes de transmission et sont construits de manière à assurer une protection contre les interférences extérieures.

Il existe deux types principaux de câbles coaxiaux : le câble d'impédance caractéristique de valeur  $75 \Omega$  utilisé principalement pour la vidéo, et celui d'impédance caractéristique  $50 \Omega$  surtout utilisé pour l'instrumentation et les applications radio et hyperfréquences.

Le câble coaxial est un support difficile à mettre en place et à raccorder (poids, rigidité, connectique délicate) mais très performant.

Il offre ainsi un débit beaucoup plus élevé et une moindre sensibilité aux perturbations électromagnétiques que la paire torsadée [8].

#### **2.4.1.3 Fibre optique**

Les systèmes basés sur les câbles à fibres optiques assurent la fiabilité des données. En effet, les câbles et les connecteurs de fibres optiques ne sont pas affectés par le bruit, la foudre, les interférences de RF, la force électromotrice (FEM), les interférences électromagnétiques (IEM) et les harmoniques [14] [15].

Grâce aux progrès de la technologie, les implémentations de fibres optiques permettent d'améliorer les processus, la qualité et la sécurité des communications filaires [16].

La fibre optique est utilisée partiellement ou localement pour assurer une communication efficace en milieu confiné. La lumière se propage dans le cœur de la fibre, à des distances allant de quelques mètres à des centaines de kilomètres. Le système utilise des impulsions de lumière qui peuvent être codées, ce qui permet, par conséquent, la transmission des données.

Le signal lumineux est codé par une variation d'intensité à travers la fibre optique. Cette dernière est capable de transmettre une grande quantité de données entre deux lieux distants de plusieurs centaines de kilomètres, en y intégrant des amplificateurs ou régénérateurs à des distances périodiques de quelques dizaines de kilomètres. La fibre optique est un guide d'ondes qui exploite les principes de la propagation de la lumière.

La fibre optique est typiquement formée de trois couches concentriques, le cœur, la gaine optique et la gaine mécanique (Figure 2.5). La lumière se propage essentiellement dans le cœur de la fibre. Un faisceau lumineux injecté à l'une des extrémités de la fibre subit des réflexions totales à chaque dioptre (interface cœur-gaine) en raison de la différence d'indices du cœur ( $n_c$ ) et de la gaine ( $n_g$ ) (l'indice du cœur étant plus élevé que celui de la gaine), puis sort à l'autre extrémité. [17].

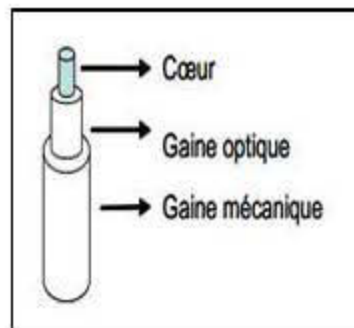


Figure 2.5: Exemple d'une fibre optique

Il existe deux types de fibre optique :

- La fibre optique à sauts d'indice (Figure 2.6), c'est le type de fibre le plus simple, directement issue des applications optiques traditionnelles, où l'indice de réfraction change brutalement entre le cœur et la gaine.

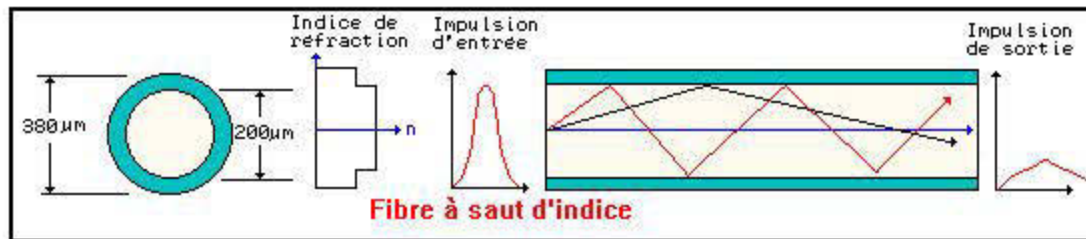


Figure 2.6: Fibre à saut d'indice

- La fibre optique à gradients d'indice (Figure 2.7), où le changement d'indice est progressif. Ces fibres sont spécialement conçues pour les télécommunications. Leur cœur n'est plus homogène : la valeur de l'indice décroît depuis l'axe jusqu'à l'interface.

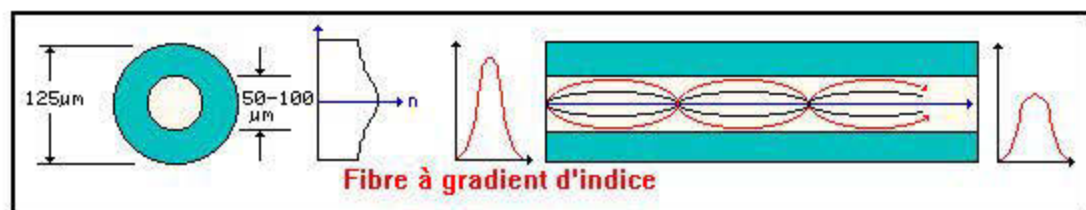


Figure 2.7: Fibre à gradient d'indice

Le guidage est cette fois dû à l'effet du gradient d'indice. Les rayons guidés suivent une trajectoire d'allure sinusoïdale.

L'avantage essentiel de ce type de fibre est de minimiser la dispersion du temps de propagation entre les rayons [18].

Elle permet, dans le contexte de la mine, de faire de la communication de type IP.

#### 2.4.1.4 Câble coaxial rayonnant

Il existe différentes méthodes disponibles pour faire des communications souterraines pour la distribution de la voix et des données, mais le système sans fil le plus polyvalent et le plus fiable est le système basé sur le câble rayonnant. Le câble

rayonnant est analogue à une surface d'un système d'antenne. Un bon système basé sur le câble rayonnant servira de base pour les applications de voix et de données bidirectionnelles [11].

Le câble rayonnant (Figure 2.8) contient essentiellement un câble coaxial normal destiné à transmettre des signaux RF à partir d'une extrémité du câble à l'autre avec des degrés variables de perte, dépendant de la qualité [19]. Le but du blindage de cuivre extérieur du câble est de conserver autant que possible les signaux à l'intérieur du câble et éviter les signaux RF externes et / ou les interférences de pénétrer dans le câble.

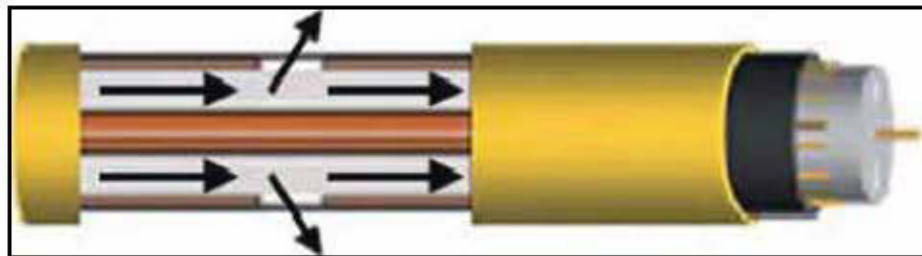


Figure 2.8: Câble rayonnant

Le câble rayonnant présente des ouvertures permettant aux signaux RF de s'échapper uniformément sur toute sa longueur [13]. Les trous dans le câble permettent également aux signaux RF internes de sortir et de ceux externes d'entrer et de se propager le long du câble.

Le câble rayonnant permet les radiocommunications dans les galeries souterraines et offre un service de communication bidirectionnelle voix/données et une communication unidirectionnelle d'images vidéo. Les signaux de voix, vidéo et de données sont captés par le câble rayonnant et acheminés vers la tête de ligne. Les signaux correspondant à la voix sont émis le long du réseau, tandis que les signaux de données sont traités par un automate programmable. Les signaux vidéo sont extraits du câble puis transmis aux écrans ou aux téléviseurs par fibre optique ou par câble coaxial.

Dans les grandes mines, les répéteurs peuvent également être utilisés pour amplifier et retransmettre des signaux entrants et sortants aux mineurs porteurs des radios portatives. L'espacement de ces répéteurs le long du câble est essentiellement régi par la sensibilité du récepteur, l'atténuation longitudinale du câble, la perte de couplage du câble vers l'unité portable et la puissance de l'émetteur. Généralement, un amplificateur bidirectionnel est utilisé à chaque 350 à 500 m pour augmenter la puissance du signal de manière à lutter contre les affaiblissements linéiques du câble.

Le système radio du câble rayonnant est pratiquement exempt de bruit et est capable à la fois d'assurer les communications vocales et de données sur tous les canaux simultanément.

## **2.4.2 Infrastructures sans fil**

### **2.4.2.1 WiFi**

WiFi (Wireless Fidelity) [16] est une technologie sans fil qui utilise les radiofréquences pour transmettre des données à travers l'espace libre. Il s'agit d'un concept relativement nouveau, qui ouvre la porte à un nouveau niveau de communication sans fil. WiFi est un terme générique qui désigne un type d'Ethernet spécifié dans les normes IEEE 802.11a, b, et g pour les réseaux locaux opérant dans les bandes de fréquences sans licence à 5 GHz et 2,4 GHz.

La norme 802.11a transmet à 5 GHz et peut se déplacer jusqu'à 54 Mo de données par seconde. 802.11b est la norme la plus lente et la moins coûteuse. Elle transmet dans la bande de fréquence 2,4 GHz et peut gérer jusqu'à 11 Mo de données par seconde. Elle utilise le CCK (Complementary Code Keying). Le 802.11 g est une version modifiée de la norme 802.11b et transmet à 2,4 GHz comme le 802.11b mais elle est plus rapide que le 802.11b. Elle peut gérer jusqu'à 54 Mo de données par

seconde. Le 802.11 g est plus rapide car il utilise le codage OFDM comme 802.11a [16].

WiFi transmet des signaux radio bidirectionnels entre une station de base fixe et un ou plusieurs ordinateurs portables ou tout autre appareil, comme un assistant numérique personnel. L'alliance WiFi [16], un groupe de recherche et d'éducation sans but lucratif, affirme que les transmissions ont une portée d'environ 116 m à l'extérieur et 27 m à l'intérieur à pleine vitesse et à des distances plus longues à basse vitesse.

WiFi nécessite des répéteurs sans fil stratégiquement placés. Ces systèmes sont numériques, ce qui ouvre un nouveau champ de possibilités, y compris la livraison simultanée de la voix (VoIP), de données et vidéo sur le lien. Une fusion des technologies qui combinent le câble rayonnant, l'Ethernet et le WiFi s'est également produite [16].

Un réseau WiFi peut être installé dans une mine dans laquelle un mineur peut entrer et continuer à utiliser son téléphone cellulaire. Un développement important dans l'automatisation de l'exploitation minière souterraine a été atteint avec la mise en œuvre réussie de la technologie WLAN pour une communication dans les galeries minières souterraines.

WiFi peut être sélectionné afin de répondre aux besoins en bande passante du réseau de données souterrain et plusieurs configurations peuvent être installées dans les galeries des mines souterraines pour évaluer leur performance.

Bien que la technologie WLAN soit faisable dans une opération minière, il est clair que de nouvelles recherches et développements sont nécessaires afin d'établir une couverture spatiale de façon optimale. WiFi est rapide, pratique et omniprésent. Il

est également plus rentable pour l'industrie de mettre en place un réseau sans fil qu'une connexion filaire.

Une des rares limitations de l'accès WiFi, c'est qu'il n'est pas totalement sécurisé. Les connexions WiFi peuvent être chiffrées avec différentes versions de cryptage. En outre, les systèmes peuvent interférer les uns avec les autres. Les inconvénients comme une faible couverture, les problèmes de sécurité, une forte consommation d'énergie et le manque de hiérarchisation du trafic peuvent parfois rendre le déploiement du WiFi difficile.

#### **2.4.2.2 WMN**

Les réseaux sans fil maillés (*Wireless Mesh Network*) ont été introduits pour fournir une connectivité à large échelle à un coût moindre que celui de la connexion avec fil. En plus de l'avantage des coûts, les réseaux WMN sont faciles à maintenir, ils sont robustes et ils fournissent une couverture fiable.

Ce type de réseau peut être déployé sur des terrains où le déploiement d'un réseau filaire est difficile. Le développement de normes comme IEEE 802.11 [20], 802.15 [21] et 802.16 [22] et la diminution des coûts des cartes d'interface de la technologie sans fil a aidé et poussé fortement le développement et la diffusion de la technologie WMN.

En effet, un réseau maillé sans fil (WMN) est un réseau de communication constitué de nœuds radio organisés en une topologie de maille. Les réseaux maillés sans fil sont souvent constitués de clients, routeurs et passerelles déployés en maille. Les clients sont souvent des ordinateurs portables, des téléphones cellulaires et autres appareils sans fil tandis que les routeurs transmettent le trafic de et vers les passerelles (Figure 2.9) [23].

Les nœuds du maillage sont des petits émetteurs radio qui fonctionnent de la même manière qu'un routeur sans fil. Les nœuds utilisent les normes communes WiFi connus sous le nom 802.11a, b et g pour communiquer sans fil avec les utilisateurs, et, plus important encore, les uns avec les autres [23].

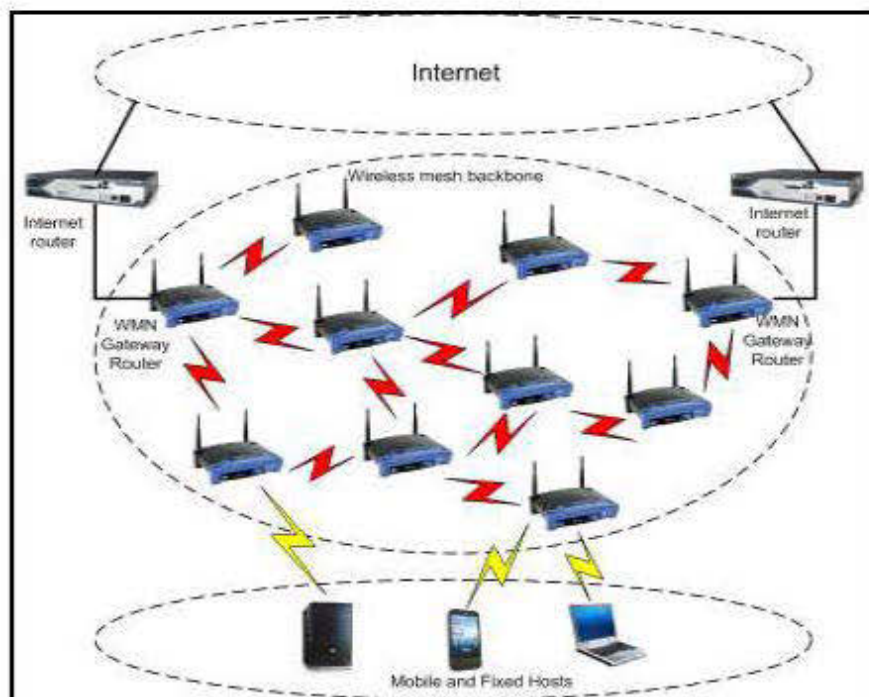


Figure 2.9: Exemple des routeurs et des clients dans WMN [23]

Le plus grand avantage des réseaux maillés sans fil par rapport aux réseaux filaires ou des réseaux sans fil fixes, c'est qu'ils sont intégralement sans fil. La plupart des points d'accès sans fil traditionnels doivent encore être câblés à l'internet pour diffuser leur signal. Pour les grands réseaux sans fil, des câbles Ethernet doivent être insérés dans les plafonds, les murs et dans toutes les zones publiques tandis que dans un réseau maillé sans fil, un seul nœud doit être physiquement relié à une connexion réseau comme un modem DSL internet. Ce nœud filaire partage ensuite sa connexion internet sans fil avec tous les autres nœuds dans son voisinage. Par la suite, ces nœuds partagent la connexion sans fil avec les nœuds les plus proches d'eux. Plus le nombre



de nœuds est grand, plus la connexion se propage en créant ensuite un "nuage de connectivité" qui peut servir un petit bureau ou une ville de millions d'utilisateurs [21].

La topologie d'un réseau maillé est aussi fiable car chaque nœud est relié à plusieurs autres nœuds. Si un nœud tombe en panne, en raison d'une défaillance matérielle ou toute autre raison, ses voisins peuvent rapidement trouver un autre itinéraire en utilisant un protocole de routage [24].

Les réseaux WMNs sont différents des autres réseaux sans fil. Habituellement WMNs se composent de deux types de nœuds, les routeurs en maille (*mesh routers*) et les clients en maille (*mesh clients*) [24].

Selon la base de la composition de la WMN, l'architecture WMN est classée en trois types : architecture du client, architecture de l'infrastructure/backbone et l'architecture hybride [23].

### ***Architecture du Client***

L'architecture du client ne contient que des nœuds clients. Ces nœuds clients jouent un rôle double : des routeurs de réseau et des utilisateurs finaux de réseau.

### ***Architecture de l'infrastructure/Backbone***

L'architecture de l'infrastructure/Backbone contient les routeurs mesh et les nœuds clients mesh. Les routeurs mesh constituent l'épine dorsale (*Backbone*) des infrastructures pour les clients et leur apportent la connectivité.

Les routeurs mesh exécutent des fonctions telles que le routage, l'auto-configuration (*self-configuring*) et l'auto-guérison (*self-healing*).

### *Architecture hybride*

L'architecture hybride, comme le nom l'indique, combine les deux types d'architectures ci-dessus.

Dans ce type d'architecture, les nœuds clients communiquent les uns avec les autres via des routeurs maillés, ou entre les clients eux-mêmes (*peer-to-peer*).

En même temps, l'infrastructure du backbone rend la connectivité possible à d'autres réseaux existants sans fil tels que WiFi, WiMAX, WPAN et les réseaux de capteurs WSN. Cette architecture est le modèle pour la future génération de réseaux.

Les WMN sont appliqués dans les environnements difficiles tels que les situations d'urgence, les tunnels, les galeries des mines souterraines, les plates-formes pétrolières, la surveillance de champ de bataille, les applications à haute vitesse de la vidéo mobile à bord des transports publics, la télémétrie en temps réel de course de voitures. Ils offrent un accès internet à haut débit, le partage d'informations sur les biens et services, les jeux, la sécurité publique, la réponse médicale et d'urgence, la sécurité des biens précieux, la surveillance vidéo d'un lieu et la surveillance industrielle [22].

Ces applications sont très différentes dans leurs exigences de qualité de service. Un protocole destiné à soutenir un ensemble d'exigences peut ne pas être bon pour d'autres. Par conséquent, la conception de protocoles pour de tels réseaux devraient tenir compte des diverses exigences comme fournir la meilleure performance pour chaque ensemble tout en réalisant l'équité entre les différents ensembles [22].

### 2.4.2.3 WSN

La miniaturisation croissante des équipements électroniques ainsi que les progrès des technologies de communication sans fil ont permis la conception, à faible coût et en grande quantité, de nœuds communicants miniatures (des nœuds capteurs) capables de fonctionner avec peu d'énergie.

Ces petites entités autonomes mesurent les conditions ambiantes (luminosité, température, pression barométrique, son, ondes sismiques, etc.) et les transforment en signaux électriques permettant aux équipements informatiques de les traiter [25].

Un réseau de capteurs sans fils est formé par l'ensemble de ces entités et il est capable de superviser une région ou un phénomène d'intérêt, en fournissant des informations utiles par la combinaison des mesures prises par les différents capteurs et de les communiquer ensuite via le support sans fil.

Un capteur est composé de plusieurs éléments ou modules correspondant chacun à une tâche particulière d'acquisition, de traitement, ou de transmission de données (Figure 2.10). Il comprend également une source d'énergie [26] [27].

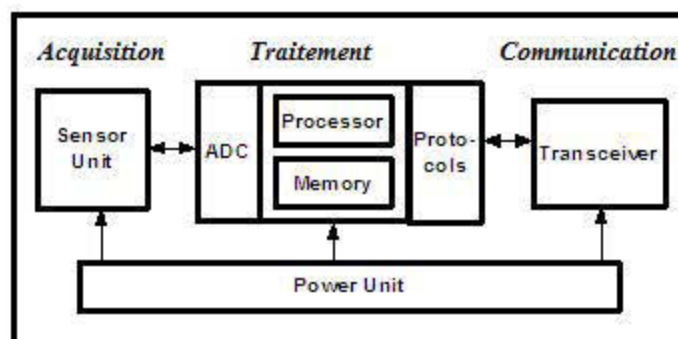


Figure 2.10: Structure d'un nœud capteur [27]

La portée de transmission des nœuds capteurs peut aller de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres. Cette portée va dépendre de cinq conditions : la

position (présence d'obstacles, par exemple), la fréquence, la modulation, la puissance d'émission et les conditions météorologiques [28].

Chaque nœud du réseau doit être capable de communiquer avec les autres nœuds par l'intermédiaire d'un lien radio très fiable qui est compatible avec le protocole de communication du réseau (norme IEEE 802.11b et IEEE 802.11g,...). En plus, le réseau doit être robuste pour contrôler les mesures nécessaires, telles que la mesure de la température sur une longue période de temps [29].

La taille de plus en plus réduite des micro-capteurs, leur coût de plus en plus faible, la large gamme des types de capteurs disponibles (thermique, optique, vibrations,...) ainsi que le support de communication sans fil utilisé, permettent aux réseaux de capteurs d'envahir rapidement plusieurs domaines d'applications [30].

Grâce à leur fort potentiel, les réseaux de capteurs se retrouvent au cœur de nombreuses applications tels que l'exploitation minière souterraine, la détection et la surveillance des désastres, le contrôle de l'environnement et la cartographie de la biodiversité, le bâtiment intelligent, la surveillance et la maintenance préventive des machines, la logistique et les transports intelligents, couvrant ainsi des différents domaines tels que la sécurité, l'environnement, la médecine, l'écologie, le militaire et l'industrie.

L'environnement minier souterrain est l'un des environnements de travail les plus dangereux au monde. Plusieurs accidents surviennent dans les mines, causant le décès de plusieurs personnes et cela à cause d'une surveillance défailante ou une impossibilité de faire cette surveillance et de la détection du danger. Les réseaux de capteurs sans fil facilitent les conditions de travail et les rendent plus sécuritaires, et facilitent du même coup les opérations de sauvetage.

Plusieurs tâches de détection peuvent être définies pour les réseaux de capteurs sans fil [29]:

1. Déploiement des capteurs pour localiser les personnes en situation normale ou anormale (par exemple lors d'un accident).
2. Utilisation des capteurs pour localiser des trous qui causent des effondrements.
3. Utilisation des capteurs pour mesurer et prévoir les changements sismiques dus à des causes internes (exploitation minière) ainsi que des causes externes (séisme).
4. Utilisation des capteurs pour mesurer la concentration des gaz, y compris le méthane (qui est la cause principale des explosions), l'oxygène et le dioxyde de carbone.

Plusieurs défis peuvent être mentionnés lors du déploiement du réseau de capteurs sans fil dans les mines souterraines et cela étant dû à l'environnement minier qui est hostile aux communications radio. En effet, les virages et les cintrages des tunnels souterrains empêchent de maintenir un lien de communication en visibilité directe. Les signaux atteignent le récepteur ou la destination après avoir subi plusieurs phénomènes physiques, telles que la réflexion, la réfraction, la dispersion. Aussi, en raison du pourcentage élevé d'humidité relative, l'absorption du signal et l'atténuation sont extrêmement élevées.

Le déploiement de réseaux de capteurs sans fil dans une mine souterraine doit donc tenir compte d'un compromis entre des exigences contradictoires.

### **2.4.3 Utilisation des données sur un câble coaxial**

Afin d'utiliser le câble coaxial comme médium pour transmettre les données, une connaissance du standard DOCSIS est essentielle.

### 2.4.3.1 DOCSIS

#### *Définition*

DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification) est une norme définissant les conditions d'interface de communications et de soutien d'opération pour un système de données utilisant le système de télévision par câble.

Il permet l'addition du transfert de données à vitesse élevée à un système existant en utilisant le câble de télévision. Il est utilisé par beaucoup d'opérateurs pour fournir l'accès à l'internet sur leur infrastructure coaxiale.

Pour délivrer les services de données DOCSIS sur un réseau câblé, un canal radio de 6 MHz est alloué dans la bande de fréquence 550-750 MHz pour le trafic descendant et un autre canal de 6 MHz dans la bande de fréquence 5-42 MHz pour le trafic montant [31] [32]

La figure 2.11 montre les détails des bandes de fréquences allouées pour chaque trafic.

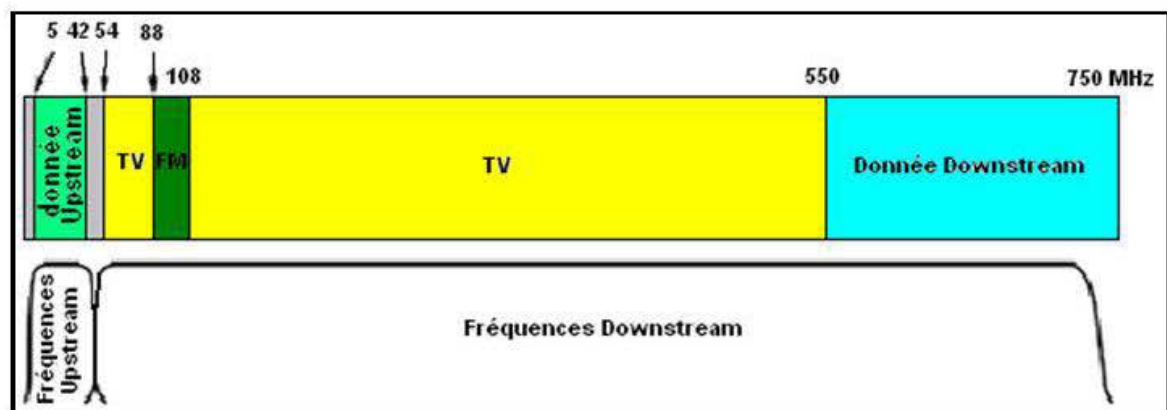


Figure 2.11 : Bandes de fréquences allouées pour DOCSIS

Un équipement de tête de ligne CMTS communique à travers ces canaux avec les câbles modems situés dans la zone des systèmes et applications (ex. : zone de téléopération dans une mine).

DOCSIS emploie la méthode TDMA/SCDMA. Cette méthode d'accès diffère du système d'Ethernet, car le système DOCSIS n'éprouve aucune collision [32]

### *Principe de fonctionnement*

La phase d'initialisation logicielle en DOCSIS est la suivante:

1. Le modem envoie une requête DHCP de façon à connaître la configuration du réseau à utiliser.
2. Le CMTS renvoie son adresse IP locale, sa passerelle, et plus spécifiquement l'adresse IP du serveur TFTP et le nom du fichier de configuration à aller chercher.
3. Le modem se connecte au serveur TFTP et demande le fichier de configuration nommé précédemment. Ce fichier contient, entre autres, les informations relatives à la vitesse de connexion du modem, sa priorité sur le réseau et le nombre d'ordinateurs autorisés à accéder au modem en même temps.
4. Le modem informe le CMTS qu'il a bien reçu le fichier et qu'il est prêt à opérer (phase de synchronisation).

Après ceci, le ou les ordinateurs branchés au modem peuvent eux-mêmes demander leurs informations de connexion via le DHCP et agir comme sur un réseau local tout à fait conventionnel [31]

### *Versions du DOCSIS*

Les premières spécifications de DOCSIS, établi par le consortium CableLabs et ratifié par l'Union Internationale des Télécommunications (UIT) en Mars 1998, étaient la version 1.0.

En avril 1999, CableLabs a rédigé une nouvelle spécification : DOCSIS 1.1. Elle a ajouté quelques éléments clés par rapport au standard d'origine; qualité

supérieure, systèmes de sécurité, gestion de la priorité des paquets destinés aux communications vocales. L'objectif de cette spécification est de supporter la téléphonie et les autres services en temps réel.

Enfin, en février 2002, une nouvelle norme nommée DOCSIS 2.0 a été établie. Elle a apporté une symétrie de la bande passante entre les voies montantes et descendantes. Cette évolution est due à l'utilisation d'internet par les utilisateurs avec l'arrivée de la voix sur IP et de la vidéoconférence.

La dernière version du DOCSIS, introduite en 2006, est la version 3.0. Bien que cette version offre une augmentation de la capacité de canal et une amélioration de la sécurité du réseau, elle n'est pas encore suffisamment vulgarisée.

La version européenne de DOCSIS s'appelle EuroDOCSIS. La différence principale est que la largeur des canaux en Europe est de 8 MHz, tandis qu'en Amérique du Nord la largeur des canaux est de 6 MHz. Ceci permet d'assigner plus de largeur de bande à la circulation de données en liaison descendante. Il existe également un DOCSIS spécifique pour le Japon [31] [32]

Bien que le nom "DOCSIS" continue à être utilisé, le nouveau nom souligne que la norme est maintenant utilisée pour certifier les produits des fabricants de câbles modems. Les câbles modems conformes à la norme DOCSIS sont désormais commercialisés. [3]

Cisco et Microsoft ont approuvé DOCSIS. Ils travaillent en collaboration sur un système conforme au câble nommé *Hybrid fiber coax (HFC)*, appelé *Multimedia Cable Network System (MCNS)*, qui fournira des services commerciaux, éducatifs ainsi qu'aux clients résidentiels. [3]



### *Caractéristiques du DOCSIS*

Selon la norme DOCSIS 1.0/1.1, la largeur de la bande peut s'étendre jusqu'à 3.2MHz. DOCSIS 2.0 apporte plus d'options pour la liaison montante, y compris des canaux plus larges (6.4 MHz).

La norme DOCSIS 2.0 a introduit l'annulation de signaux interférents (*ingress cancellation*) dans le flux de données en liaison montante, ce qui a amélioré considérablement la vitesse. Toutes ces améliorations combinées procurent une vitesse en liaison montante de 30 Mbps par canal.

La vitesse montante dans la norme DOCSIS 1.0 est limitée à 5 Mbps, et à 10 Mbps dans DOCSIS 1.1. Ces versions du standard DOCSIS procurent un flux de données en liaison descendante jusqu'à 43 Mbps par canal [32].

Le tableau 2.1 présente les valeurs détaillées de la largeur de bande totale, la largeur de bande du canal et le taux maximal de bits du canal pour les liaisons montantes et descendantes des différentes versions de DOCSIS.

Tableau 2.1: Largeur de bande et taux maximal de bits du canal dans DOCSIS [9]

<b>DOCSIS</b>		
	Liaison montante Upstream	Liaison descendante Downstream
Largeur de la bande totale	5-42 MHz	54-750 MHz
Largeur de la bande du canal	0.2 à 3.2 MHz (Docsis 1.x) 0.2 à 6.4 MHz (Docsis 2.0)	6 MHz
Taux maximal de bits du canal Data rate	Jusqu'à 10 Mbps (Docsis 1.x) Jusqu'à 30 Mbps (Docsis 2.0)	Jusqu'à 43 Mbps

### *CMTS*

En utilisant une infrastructure DOCSIS en milieu souterrain, il est indispensable d'installer un CMTS (Cable Modem Terminaison System) au niveau de la tête de ligne. Le CMTS est la passerelle du réseau et représente, de ce fait, l'élément central du réseau.

Le CMTS est un ordinateur spécial, muni des interfaces BNC pour assurer la connexion avec le câble coaxial et RJ45 pour assurer la connexion au routeur. En plus un logiciel, qui présente la partie logique du CMTS, est indispensable pour gérer les actions, comme les débits et les attributions de lignes.

Le CMTS joue le rôle d'interface entre le réseau câble et le réseau de données principal. Il contrôle la configuration, l'enregistrement et l'accès au support de tous les câbles modems sous son contrôle et détermine la source qui transmet, le moment et la durée de la transmission. Un CMTS peut communiquer avec tous les câbles modems, mais ces derniers ne peuvent communiquer qu'avec le CMTS. Par conséquent, si deux câbles modems doivent communiquer entre eux, le CMTS transmet les messages. [31]



Figure 2.12: CMTS de type Motorola

### Principe de fonctionnement

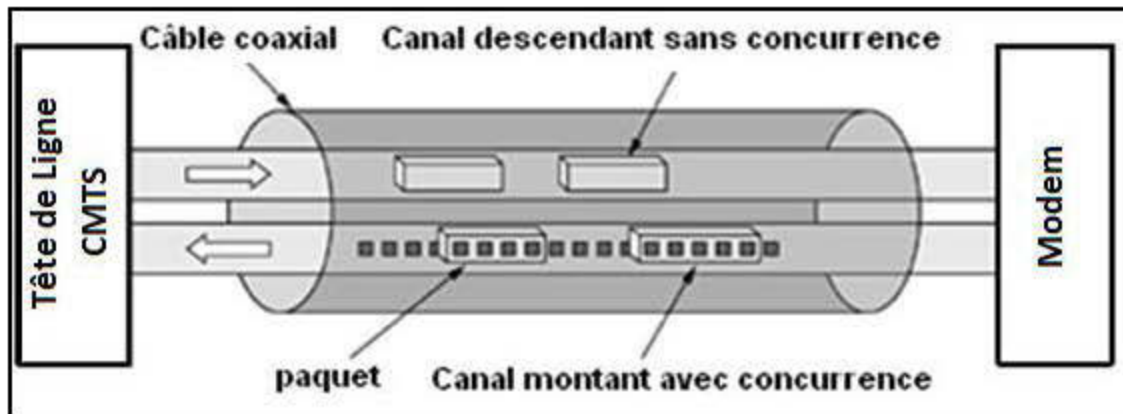


Figure 2.13: Détails des canaux entre CMTS et CM

- Le CM balaie toutes les fréquences descendantes et cherche des paquets spéciaux émis périodiquement par le CMTS. Une fois trouvés, il annonce sa présence.
- Le CMTS répond en lui attribuant les canaux montant et descendant.
- Le CM évalue sa distance au CMTS à des fins de synchronisation (*Ranging*).
- Des mini slots sont attribués par le CMTS au CM. Pour envoyer les paquets, le CM demande le nombre nécessaire de mini slots pour ces paquets. Le CMTS confirme la requête en indiquant le nombre de mini slots attribués.
- S'il y a concurrence, il n'y aura pas d'accusé de réception et le CM attendra une durée aléatoire avant la prochaine requête.
- Le CMTS est le seul émetteur sur le canal descendant, donc il n'y a pas de concurrence.
- Le CM commence ces échanges après le *ranging* et l'initialisation pour demander une adresse IP. Le serveur DHCP lui en retourne une avec l'adresse IP du serveur TFTP et du serveur ToD.
- Le CM télécharge sa configuration et règle sa date. [33]

## **2.5 Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre l'environnement minier, la difficulté de travail dans un tel lieu et les problèmes liés à cet environnement et au travail dans les mines et nous avons présenté également les différentes infrastructures de communications filaires et sans fils utilisées dans les mines, comme le standard DOCSIS.

## **Chapitre 3**

### **CONTEXTE DE L'ÉTUDE**

#### **3.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous présentons les besoins de communication dans la mine Westwood, une description de l'architecture du réseau de la mine, le câble rayonnant utilisé et les différentes parties composant le réseau. Quelques applications sont également mentionnées.

#### **3.2 Besoins de communications de Westwood**

La compagnie IAMGold a développé un nouveau gisement minier dans la perspective d'une mise en exploitation. Le gisement Westwood se situe près de la mine Doyon, à proximité de la route 117, dans la municipalité de Rouyn-Noranda. Le réseau de communications qui est préféré de la compagnie est un câble rayonnant pour les communications avec les personnes, ainsi que pour la cueillette et la distribution d'informations sans fil. Ce réseau sera utilisé pour relier des automates et d'autres équipements fixes.

Dans ce contexte, un système de communication a été déployé dans les dernières années pour répondre aux besoins de l'entreprise et des mineurs dans le cadre de productivité, de sécurité et d'automatisation du travail minier sous terre. Ce système est basé sur le standard DOCSIS qui se compose généralement de 3 parties principales: la tête de ligne, le média de transmission et les terminaux (Figure 3.1).

L'implantation du réseau TCP/IP sur le câble rayonnant est assurée par le système CMTS et les câbles modems utilisant la norme DOCSIS. Il est alors possible d'intégrer différentes applications IP comme la voix sur IP, vidéo sur IP, l'internet, l'intranet et d'autres applications.

### 3.3 Architecture du réseau de communications de Westwood

La figure 3.1 ci-dessous présente l'architecture du réseau de communication existant dans la mine Westwood. Ce réseau, basé sur le standard DOCSIS, comprend essentiellement un CMTS dans la tête de ligne. Un multiplexeur est indispensable pour connecter au système la radio, la station de contrôle du système de téléopération et le câble rayonnant.

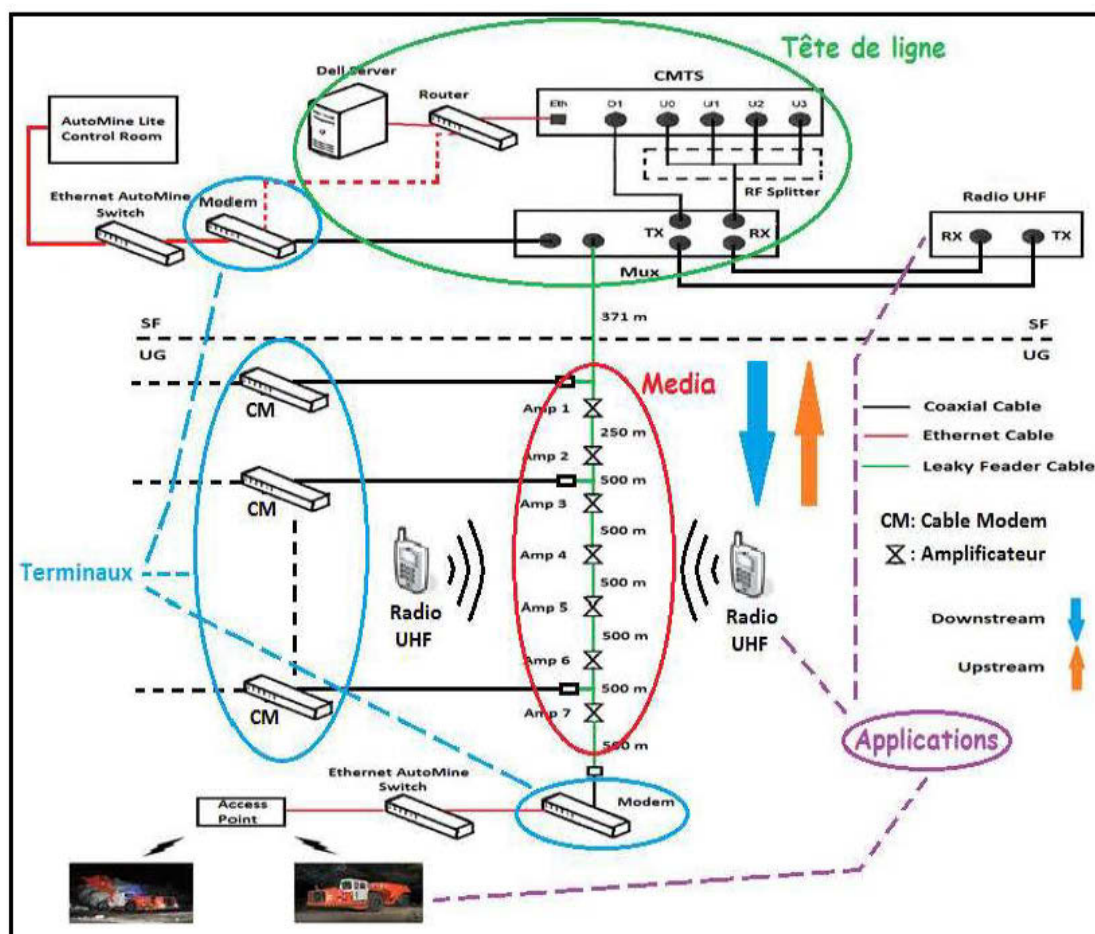


Figure 3.1: Architecture du réseau de communications dans la mine

Dans ce réseau, le câble rayonnant est utilisé; il est connecté au multiplexeur, et il est installé tout le long des galeries de la mine. Les amplificateurs sont installés sur le câble rayonnant et avec une séparation de l'ordre de 500 mètres. Le câble rayonnant et les amplificateurs composent le média dans ce réseau.

Les applications sont connectées aux câbles modems qui représentent les terminaux dans ce système, l'application de téléopération et sa station de contrôle (*Automine Control*) sont connectées chacune sur un câble modem.

La figure 3.2 ci-dessous présente un exemple des applications qui peuvent être utilisées dans un système DOCSIS comme les applications de téléopération, les caméras et les téléphones sans fil en utilisant la technologie WiFi, les systèmes de la radio et d'autres applications.

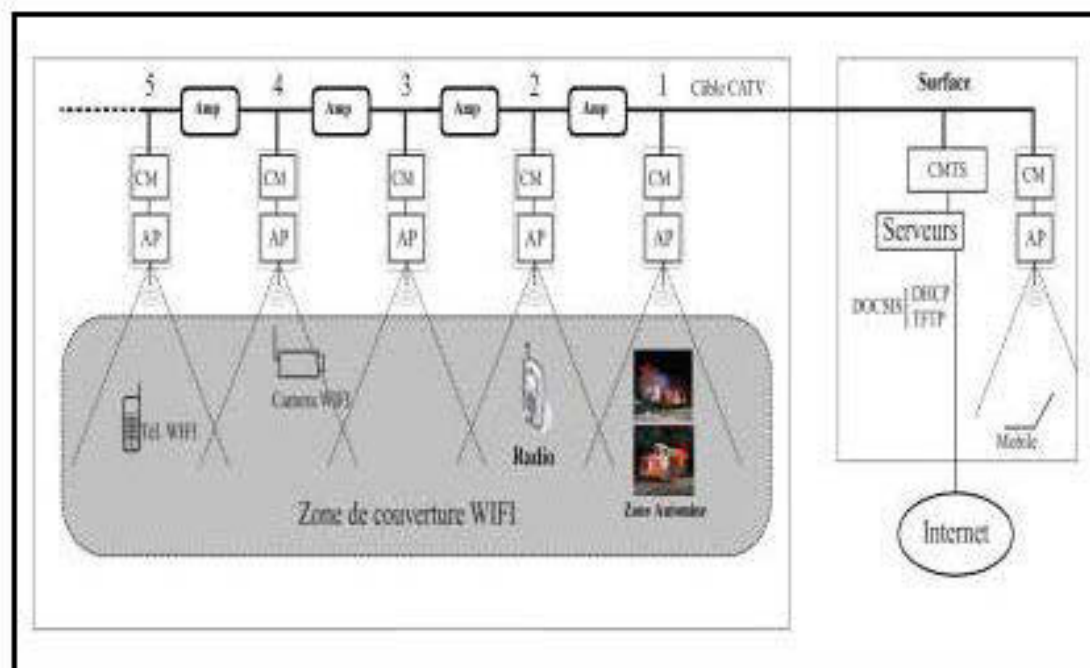


Figure 3.2: Exemple des applications sur DOCSIS

### 3.4 Multiplexeur

Un multiplexeur est un circuit permettant de connecter une sortie à une entrée en sélectionnant une entrée parmi N.

Le multiplexeur est donc le "chef d'orchestre", à l'un des bouts, et présente l'info et le code permettant au démultiplexeur d'affecter l'info, grâce à ce code, vers les sorties correspondantes.

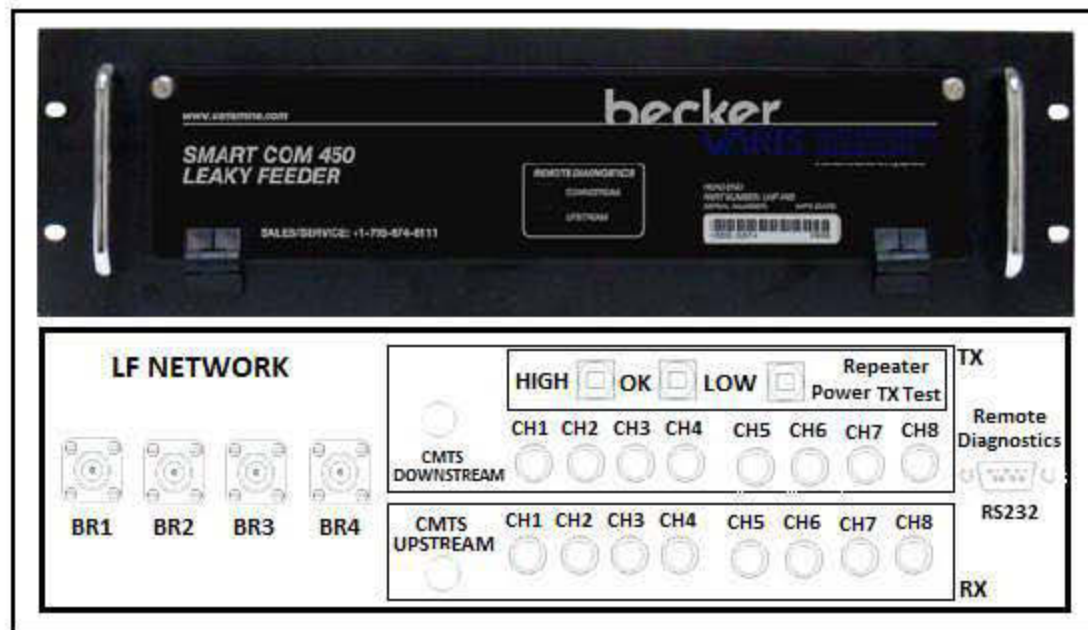


Figure 3.3: Multiplexeur de type Varis

### 3.5 Câble rayonnant installé dans la mine

Les câbles rayonnants ont été développés pour assurer la radiocommunication dans des milieux où les antennes traditionnelles ne sont pas bien adaptées comme les mines et les tunnels. Il est possible de comparer un câble rayonnant à une immense antenne, diffusant un champ homogène, réparti sur toute sa longueur.



Le câble rayonnant est un modèle spécial de câble coaxial. Il est constitué d'un conducteur intérieur, d'un diélectrique en polyéthylène expansé et d'un conducteur extérieur (Figure 3.4). Le conducteur extérieur présente des ouvertures sous forme de fentes ou de trous. Le signal transmis par le câble rayonnant s'échappe donc par ces ouvertures. Par suite, le câble rayonnant fonctionne comme une antenne sur toute sa longueur [34] [35].

Le câble utilisé actuellement dans les mines est limité aux fréquences VHF et UHF et présente des atténuations sur 100m allant jusqu'à 6.1dB en opérant sur la fréquence 450 MHz tandis que le câble rayonnant Trilogy permet de fonctionner sur des fréquences allant jusqu'à 3 GHz. Ce dernier présente, sur 100 m, des atténuations de 1.31dB, 2.56dB et 7.66dB pour les fréquences 150 MHz, 450 MHz et 2.4 GHz respectivement.

Ce câble offre toutefois une bande passante plus large qui le rend compatible avec plusieurs technologies opérant à des fréquences plus élevées telles que Wifi, WIMAX, cellulaire, etc.

L'utilisation du câble rayonnant Trilogy à faible perte réduit le nombre d'amplificateurs dans l'infrastructure et réduit ainsi le nombre d'interventions pour l'entretien et permet de suivre les besoins et d'intégrer les nouvelles technologies. Le déploiement du câble rayonnant assure la transmission de l'information, la communication sans fil pour certains services et constitue l'épine dorsale de l'infrastructure.

La compagnie minière IAMGold a donc choisi le câble rayonnant de type Trilogy puisqu'il est le plus approprié, le meilleur en atténuation, le moins cher et plus facile à installer.

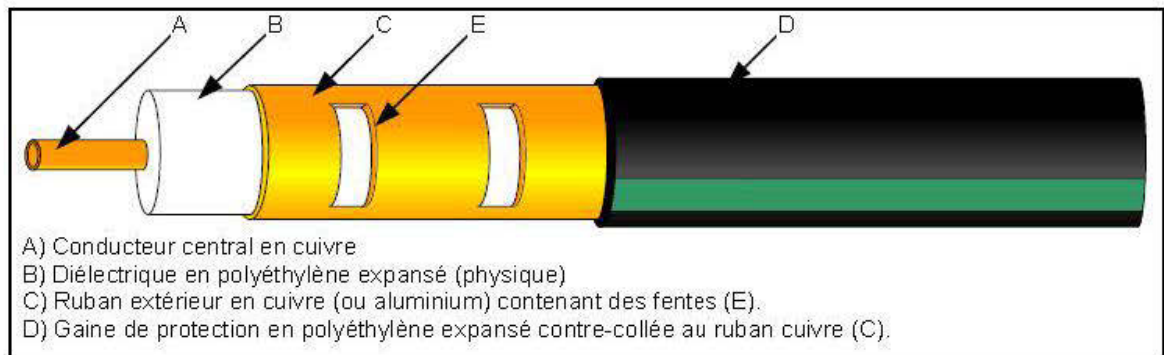


Figure 3.4: Exemple d'un câble coaxial rayonnant [16]

### 3.6 Amplificateur

Un amplificateur est un appareil utilisé pour amplifier le signal afin d'augmenter sa portée. Il amplifie seulement le signal allant vers le câble modem; il n'amplifie pas les signaux retournant vers la tête de ligne. La distance qui sépare les amplificateurs est déterminée selon le type du câble utilisé, l'atténuation que subit le signal sur le câble et selon le type d'amplificateurs.



Figure 3.5: Amplificateur de type Varis

### 3.7 Terminaux

Les terminaux les plus importants dans ce système sont les câbles modems (CM).

Un câble modem est un dispositif qui permet la modulation et la démodulation du signal reçu de la tête de ligne.

Le câble modem est bidirectionnel, il n'utilise qu'un seul câble coaxial dans les deux directions, ascendante et descendante.



Figure 3.6: Câble Modem [66]

### 3.8 Applications

Les applications visées par les systèmes basées sur DOCSIS sont illustrées ci-dessous selon trois groupes :

### **Échanges multimedia et données**

- Communication entre personnes
- Communication de type IP sur internet ou via cellulaire (*Voice and video over IP*)
- Télésurveillance vidéo par caméras IP
- Instrumentations industrielles

### **Localisation**

- Signature énergétique
- Tag RFID
- Localisation souterraine des personnes et des véhicules

### **Téléopération & Télémessure**

- Réseaux de capteurs et PLC
- Détection et surveillance du gaz
- Surveillance et contrôle
- **Téléopération**

## **3.9 Conclusion**

Ce chapitre nous a permis de présenter les besoins de communication de Westwood, l'architecture du réseau de communication de la mine, le câble rayonnant utilisé dans la mine, ainsi qu'une description des équipements constituant le réseau comme le multiplexeur, les amplificateurs et les câbles modems.

En plus, les applications visées par les systèmes basées sur le standard DOCSIS sont mentionnées.

## Chapitre 4

### RÉSULTATS ET ANALYSE DES MESURES

#### 4.1 Introduction

Les chapitres précédents nous ont permis d'introduire les systèmes de communications utilisés dans les environnements miniers et de décrire le contexte de l'étude. Dans ce chapitre, nous présentons la description détaillée d'un problème d'atténuation dans un câble rayonnant installé dans un environnement minier souterrain ainsi que les différentes techniques de mesure d'un canal de propagation.

Des mesures ont été menées à la mine Westwood ainsi qu'au laboratoire. Premièrement, nous présentons une description des mesures d'atténuation menées aux fréquences 150 MHz et 450 MHz sur le câble rayonnant installé sous terre. De même, nous présentons une caractérisation réelle du câble rayonnant incluant les mesures de propagation du signal pour les fréquences 150 MHz et 450 MHz. Ces mesures de propagation sont réalisées en utilisant deux câbles rayonnants avec et sans poussière.

Ensuite, les mesures des paramètres  $S_{11}$  et  $S_{21}$  sont présentées sur une bande de fréquence allant de 10 MHz jusqu'à 2500 MHz. Le but de cette étape est d'étudier les atténuations et les réflexions du signal dans le câble rayonnant.

Après la description de chacune des mesures présentées, une analyse des résultats obtenus est décrite.

## 4.2 Description détaillée du problème

Le bon fonctionnement d'un système de communications efficace qui répond au besoin de la mine et des mineurs nécessite l'utilisation d'équipements fiables et efficaces, de façon à ce que les atténuations qui existent dans un tel environnement minier soient minimisées le plus possible.

Après l'installation et la mise en fonctionnement du système, des problèmes sous forme d'atténuations anormales ont été constatés au niveau des systèmes de la téléopération et de la communication radio.

Dans le cas de la téléopération, il a été constaté une coupure du signal pour quelques millisecondes, ce qui provoque un mauvais fonctionnement du système.

Quant au problème de la communication radio, un affaiblissement du signal a été constaté provoquant un dysfonctionnement du système de la voix.

D'autre part, une accumulation de poussières fût observée sur le câble rayonnant.

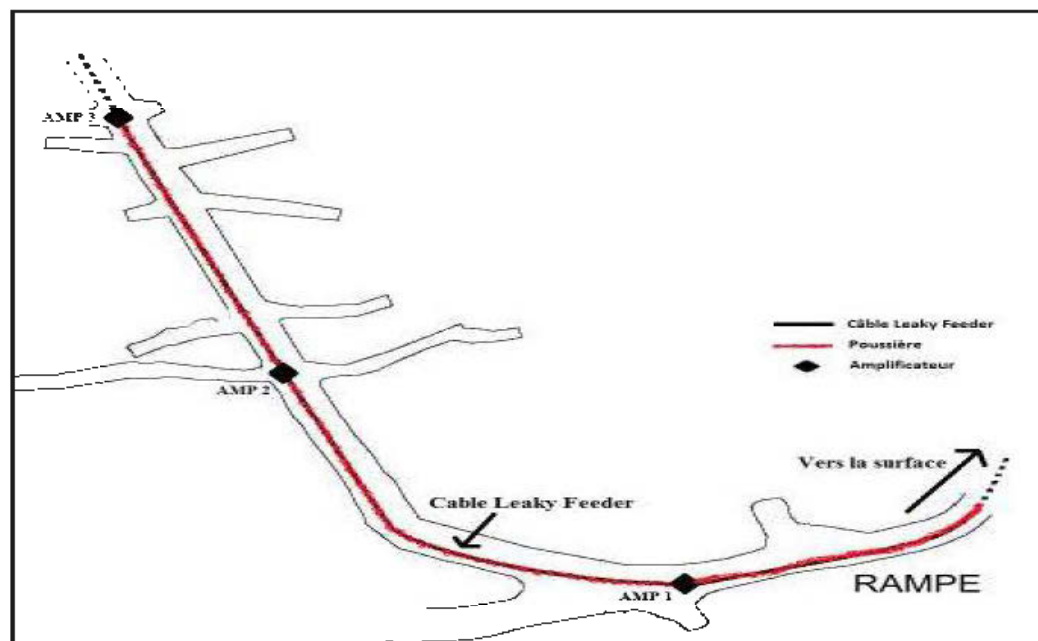


Figure 4.1: Un plan minier qui montre le câble installé avec poussière

Sur la figure 4.1 ci-dessus, un plan minier présente le câble rayonnant et les amplificateurs installés dans la rampe ainsi que la poussière accumulée.

La compagnie minière a procédé au lavage du câble, afin de vérifier s'il y aurait une amélioration au niveau du signal et, par la suite, un effet sur l'atténuation constatée au niveau des amplificateurs. Le lavage du câble a amélioré le signal et a diminué l'atténuation en question, ce qui a permis de considérer la poussière qui s'accumule sur le câble comme une cause probable du problème d'atténuation.

Pour trouver une solution à ce problème, nous avons procédé à l'étude et à l'analyse du câble présentant ces atténuations anormales par des mesures et des simulations qui ont été réalisées dans ce but.

### 4.3 Techniques de mesures

Le signal appliqué à l'entrée du canal peut être décrit comme un signal dans le domaine temporel  $x(t)$  ou dans le domaine fréquentiel  $X(f)$  (Figure 4.2).

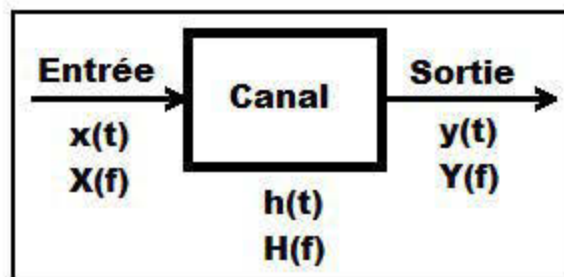


Figure 4.2: Exemple d'un signal appliqué à l'entrée du canal

### 4.3.1 Domaine temporel

Dans le domaine temporel, la technique de mesure consiste à générer des impulsions ultra courtes avec un générateur d'impulsions, puis de mesurer à l'entrée du récepteur la variation de ces impulsions avec un oscilloscope numérique. Ces deux instruments sont synchronisés avec un déclencheur.

La figure 4.3 illustre, de manière simplifiée, les instruments utilisés dans la technique de mesure temporelle ainsi que l'impulsion mesurée [57].

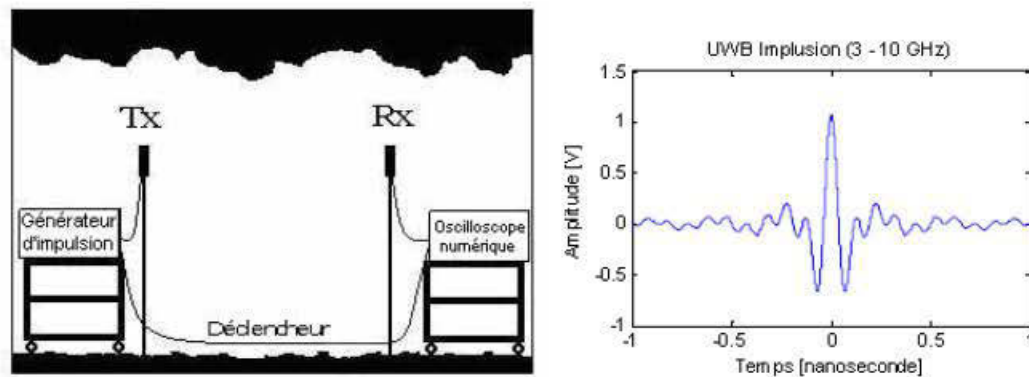


Figure 4.3: Technique de mesure dans le domaine temporel [57]

#### 4.3.1.1 Les techniques temporelles

La technique d'impulsions directes est une technique de mesure permettant d'obtenir directement la réponse impulsionnelle du canal. Elle consiste en l'émission d'impulsions de très courtes durées de l'ordre de nanoseconde. Au niveau du récepteur, une acquisition très rapide du signal est nécessaire (Figure 4.4). Un oscilloscope à échantillonnage numérique (*Digital Sampling Oscilloscope*) est généralement utilisé [63].



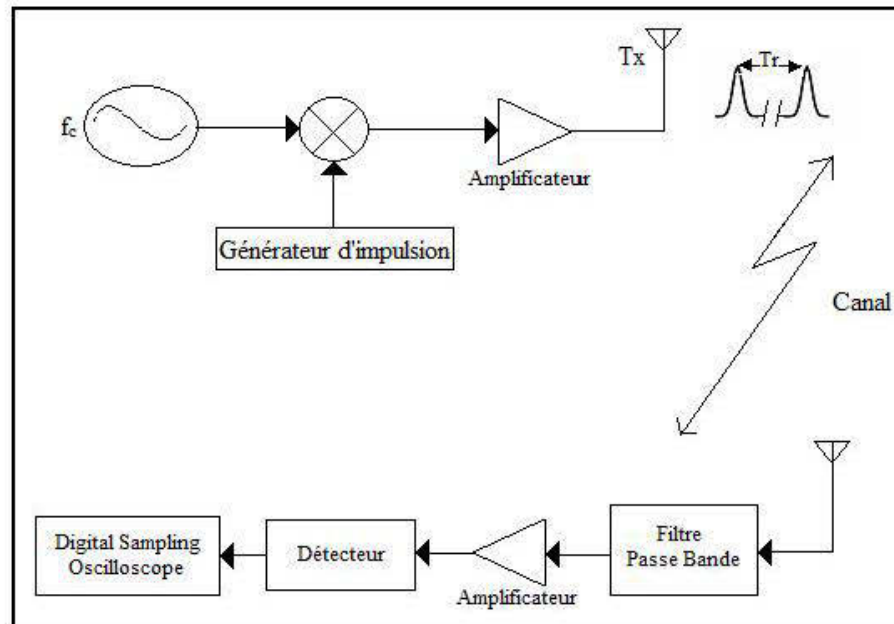


Figure 4.4: Technique de mesure par impulsion périodique [63]

L'avantage principal de la technique de sondage par impulsion réside dans son faible temps d'acquisition, et la réponse impulsionnelle est récupérée en temps réel. Cette technique est indiquée pour mesurer les variations spatiales ou temporelles du canal.

Mais, cette méthode comporte également des inconvénients. La génération d'impulsions de courtes durées nécessite une forte puissance au niveau des amplificateurs et s'ensuivent des périodes d'inactivité. La faible puissance moyenne qui en résulte ne permet pas d'obtenir un bon rapport signal sur bruit rendant cette méthode inadaptée pour des campagnes de mesures sur de grandes distances. Enfin, cette technique nécessite une parfaite synchronisation entre l'émetteur et le récepteur, celle-ci peut être réalisée en reliant ces deux terminaux par un câble.

Il existe également d'autres techniques temporelles comme la technique de compression d'impulsion ou de corrélation qui consiste à utiliser un bruit blanc pour

exciter le canal de propagation et de réception. On calcule alors la corrélation entre la sortie du canal et le bruit blanc retardé temporellement. La réponse impulsionnelle est proportionnelle au résultat du calcul. L'autre technique est celle par corrélation glissante qui se base sur les propriétés d'auto-corrélation périodique des séquences pseudo aléatoires [63].

D'autres techniques temporelles sont décrites dans [64].

### 4.3.2 Domaine fréquentiel

La technique de mesure dans le domaine fréquentiel est basée sur un analyseur de réseau vectoriel (VNA) capable de mesurer directement la fonction de transfert  $H(f, t)$  sur la plage de fréquence désirée. La réponse fréquentielle complexe est mesurée en comparant le signal émis  $X(f, t)$  et le signal reçu  $Y(f, t)$  dans le domaine fréquentiel.

$$H(f, t) = \frac{Y(f, t)}{X(f, t)} \quad (4.1)$$

Cette technique de sondage du canal permet de mesurer la variation de la puissance et de la phase du signal transmis et elle est utilisée dans la plupart des mesures de canaux. La figure 4.5 illustre le montage expérimental associé à cette technique de mesure et la réponse fréquentielle mesurée [57].

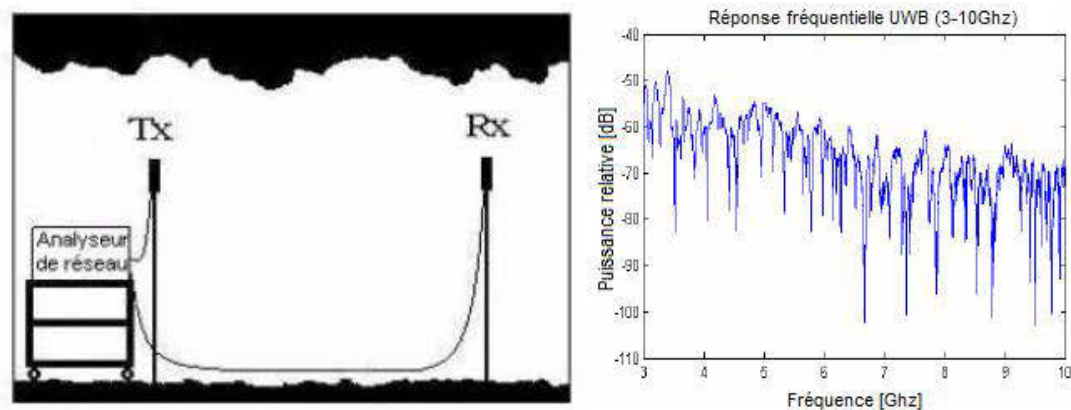


Figure 4.5: Technique de mesure dans le domaine fréquentiel [57]

Généralement, lorsqu'on réalise des mesures dans le domaine fréquentiel, on considère que le canal est quasi-stationnaire pendant toute la durée d'une mesure. Il est difficile d'accéder à la fluctuation du canal en utilisant un analyseur de réseau. Il est donc important de choisir une durée de balayage suffisamment courte pendant laquelle l'hypothèse de stationnarité est valable. Ceci se fait toutefois au détriment de la résolution temporelle obtenue avec cette technique de caractérisation [64].

Afin de soustraire de la caractérisation du canal les éléments qui n'en font pas partie (câbles, connecteurs), une phase de calibration est nécessaire.

#### **4.3.2.1 Analyseur de réseau vectoriel**

Un analyseur de réseau vectoriel mesure les paramètres  $S$  d'un équipement. Il donne des informations sur l'amplitude et la phase, et détermine les pertes ou les gains de transmission, tout ceci sur une large bande de fréquences et avec une bonne précision. Il mesure également la perte due à la puissance réfléchie (en raison d'une désadaptation d'impédance), ainsi que les retards de groupe.

Les analyseurs de réseaux travaillent avec des signaux RF "continus", non modulés et il est impératif qu'ils soient correctement calibrés. Les fournisseurs proposent d'ailleurs des kits permettant de vérifier que l'appareil est conforme aux spécifications obtenues lors de l'étalonnage.

Les analyseurs vectoriels sont des analyseurs de spectre un peu particulier, dotés de capacités de traitement du signal afin de restituer, en plus de l'amplitude, les composantes en phase et en quadrature de chaque fréquence contenue dans le signal. Les résultats de l'analyse peuvent être présentés sous différentes formes (diagramme de constellation, distribution de la puissance en fonction des numéros des canaux, etc.) [58].

#### 4.3.2.1.1 Paramètres S

Les paramètres S sont des grandeurs vectorielles complexes qui représentent le rapport entre deux signaux RF. Les paramètres S sont dotés d'une amplitude et d'une phase, ou sous forme cartésienne, de composantes réelles et imaginaires. Les paramètres S sont exprimés sous la forme  $S_{xy}$  où X représente le port de sortie du DUT mesuré et Y se rapporte au port d'entrée du DUT stimulé par le signal RF incident. La figure 4.6 montre un simple matériel doté de deux ports, comme un filtre RF, atténuateur ou amplificateur.

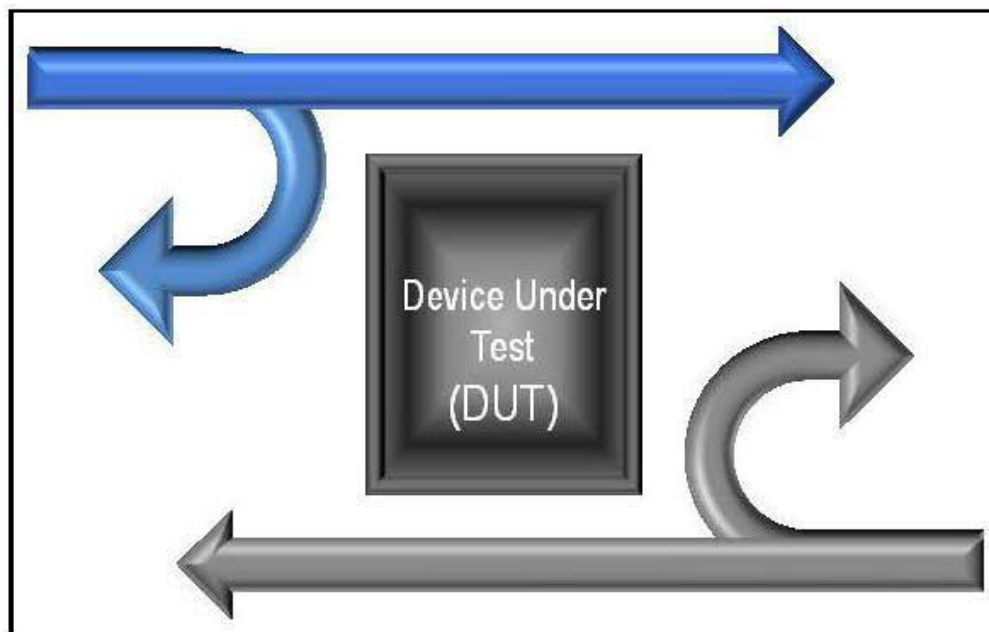


Figure 4.6: Simple matériel doté de deux ports caractérisé par des paramètres S [59]

$S_{11}$  est défini comme le rapport entre l'énergie réfléchie au port un (1) et le signal incident placé sur le port un (1).  $S_{21}$  est défini comme le rapport entre l'énergie transmise à travers le DUT présent au port deux (2) et le signal incident placé sur le port un (1).

Ces deux grandeurs,  $S_{11}$  et  $S_{21}$ , sont appelées paramètres S directs, car le signal incident provient de la source RF sur le port un (1). Avec la source incidente sur le port deux (2),  $S_{22}$  devient le rapport de l'énergie réfléchiée par le port deux (2) divisée par l'énergie de la source incidente au port deux(2), et  $S_{12}$  représente le rapport entre l'énergie transmise à travers le DUT présent au port un (1) et le signal incident placé sur le port deux (2). Ce sont des paramètres S inverses.

Les paramètres S qui décrivent une transmission, comme  $S_{21}$ , sont comparables à d'autres termes familiers, notamment le gain, la perte d'insertion ou l'atténuation. Les paramètres S qui décrivent la réflexion, comme  $S_{11}$ , correspondent au rapport d'ondes stationnaires (ROS), à la perte par réflexion ou au coefficient de réflexion.

Les paramètres S présentent également d'autres avantages. Ils sont largement utilisés et compris dans les mesures RF modernes. Ils sont aisément traduits en paramètres H, Z ou autres [59].

#### 4.3.2.1.2 Adaptation d'impédance

Après avoir constaté le problème des atténuations et suite à l'investigation faite pour en déterminer la cause, nous sommes arrivés à la conclusion qu'une mauvaise adaptation est forcément la cause de ces atténuations. En effet, le câble installé n'ayant subi aucun dommage physique et ne présentant aucune déformation apparente, cela nous a permis donc de considérer que le problème est lié à la non-adaptation d'impédance (*mismatch impedance*).

Le modèle de la figure 4.7 schématise une ligne de transmission.

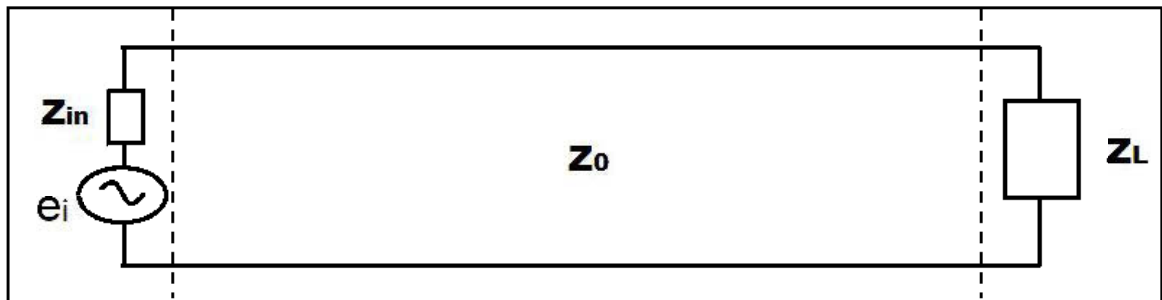


Figure 4.7: Ligne de transmission

où

$Z_{in}$  : Impédance d'entrée.

$Z_0$  : Impédance caractéristique.

$Z_L$  : Impédance de la charge.

On peut calculer la puissance moyenne transportée par la ligne de transmission selon l'équation simplifiée suivante :

$$P = \frac{1}{2} \frac{|V_0|^2}{Z_0} (1 - |\Gamma|^2) \quad (4.2)$$

Avec,

$$\Gamma = (Z_L - Z_0) / (Z_L + Z_0) = S_{11} \quad (4.3)$$

$\Gamma$  : Coefficient de réflexion

Lorsque  $Z_L = Z_0$ ,  $\Gamma$  est nul et la puissance transmise  $P$  est maximale.

Si  $Z_L > Z_0$  ou  $Z_L < Z_0$ , la puissance transmise  $P$  est inférieure à la puissance maximale. Il y a donc une perte de puissance (réflexion partielle).

Si  $Z_0$  est infini ou nul, nous aurons une perte totale de la puissance transmise (réflexion totale).

La puissance, l'impédance et le coefficient de réflexion sont clairement liés d'après les équations 4.2 et 4.3. Donc, une variation dans l'impédance du câble

affecte la puissance transmise et provoque des réflexions et des atténuations, ce qui nous a conduit à mesurer et à simuler les paramètres  $S_{11}$  et  $S_{21}$  du câble rayonnant dans le but d'étudier l'influence d'une variation de l'impédance sur la réflexion et sur l'atténuation du signal dans le câble. En effet,  $S_{11}$  représente la réflexion et  $S_{21}$  reflète l'atténuation dans le câble, d'où l'intérêt d'étudier ces paramètres.

#### **4.3.2.4 Autres équipements de mesures**

##### ***Analyseur de spectre***

Les analyseurs de spectre effectuent des mesures dans le domaine des fréquences en utilisant des techniques de détection à bande étroite. Ils affichent un spectre avec la puissance absolue ou relative en fonction de la fréquence. Ils peuvent également afficher un signal démodulé.

Les analyseurs de spectres sont capables de mesurer des fréquences allant de quelques kilohertz à 40 GHz et au-delà. Les appareils les plus courants couvrent des gammes allant jusqu'à 3 GHz.

Un analyseur de spectre sert avant tout à vérifier qu'un émetteur génère le spectre de puissance désiré. On peut lui demander aussi de mesurer la présence éventuelle d'harmoniques ou de signaux transitoires responsables d'une distorsion du signal [58].

##### ***Générateur de signal***

Les générateurs des signaux RF fournissent des signaux sinusoïdaux, triangulaires ou carrés. Les paramètres de spécification des générateurs RF sont nombreux dont principalement les plages de fréquence et d'amplitude, la précision sur l'amplitude, le rapport cyclique et, pour ceux qui délivrent des signaux modulés, la qualité de la modulation. La vitesse de réglage de la fréquence et le temps de

stabilisation de l'amplitude constituent également des paramètres critiques afin de réduire le temps de test.

Les générateurs RF sont utilisés lorsque les spécifications de test exigent de réaliser des tests de sensibilité, des tests de taux d'erreurs de bits (BER), de la réjection sur des canaux adjacents, de la réjection et de la distorsion d'intermodulation [58].

### 4.3.3 Comparaison des deux techniques de sondage du canal

Théoriquement, l'approche fréquentielle et l'approche temporelle sont équivalentes d'après la dualité du temps et de la fréquence. Le tableau ci-dessous illustre les avantages et les inconvénients des deux techniques de mesure.

Tableau 4.1: La comparaison des mesures dans le domaine fréquentiel et dans le domaine temporel [57]

	Domaine Fréquentiel	Domaine Temporel
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Disponibilité/Coût de l'instrumentation</li> <li>-Un seul appareil de mesure</li> <li>-Phase disponible grâce à la mesure vectorielle</li> <li>-Dynamique de l'instrumentation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Forme d'onde d'excitation réaliste</li> <li>-Rapidité de mesure</li> <li>-Non stationnaire (Doppler)</li> <li>-Mise en œuvre de la synchronisation</li> <li>-Mesures MIMO (multiples antennes)</li> </ul>
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mesure à grande distance -&gt; long câble</li> <li>-Compromis: résolution &amp; dynamique vs rapidité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Instrumentation spécifique</li> <li>-Dynamique limitée</li> </ul>



Le choix de la méthode de mesure mise en œuvre dépend des applications prévues du système de communications en tenant compte d'autres paramètres tels que la disponibilité des équipements et les coûts financiers.

Parmi les techniques de mesure déjà présentées, le contexte nous a poussés à choisir la technique fréquentielle pour la mise en œuvre du système de mesure caractérisé par sa simplicité. Une autre raison qui vérifie notre choix est l'absence de la mobilité dans notre projet et par conséquent l'absence de l'effet Doppler qui décrit la variation temporelle d'un canal dans une région donnée.

#### **4.4 Mesures sur le câble rayonnant à Westwood**

Des mesures ont été menées à la mine Westwood afin d'identifier les causes possibles au problème d'atténuation se produisant dans le câble rayonnant à la mine. Cette étape consiste à procéder à des mesures sur le câble rayonnant, comme il sera décrit dans les prochains paragraphes.

##### **4.4.1 Système de mesure**

Les mesures avec l'analyseur de spectre sont prises afin de connaître la quantité du signal passant dans le câble au niveau de chaque amplificateur, ainsi que pour caractériser le gain de chaque amplificateur. Les résultats de ces mesures présentent donc les atténuations affectant le câble rayonnant Trilogy.

Nous avons mesuré le niveau du signal dans la rampe au niveau des six premiers amplificateurs de la surface où la présence de poussière est constatée.

La figure 4.8 montre un schéma détaillé des mesures menées au niveau de chaque amplificateur.

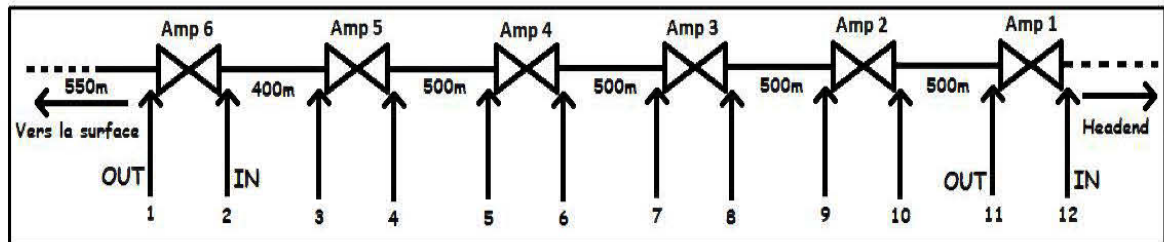


Figure 4.8: Schéma détaillé des mesures à Westwood

Le montage expérimental ci-dessous a été réalisé et utilisé pour effectuer les mesures d'atténuation aux fréquences 150 MHz et 450 MHz par nous-mêmes.

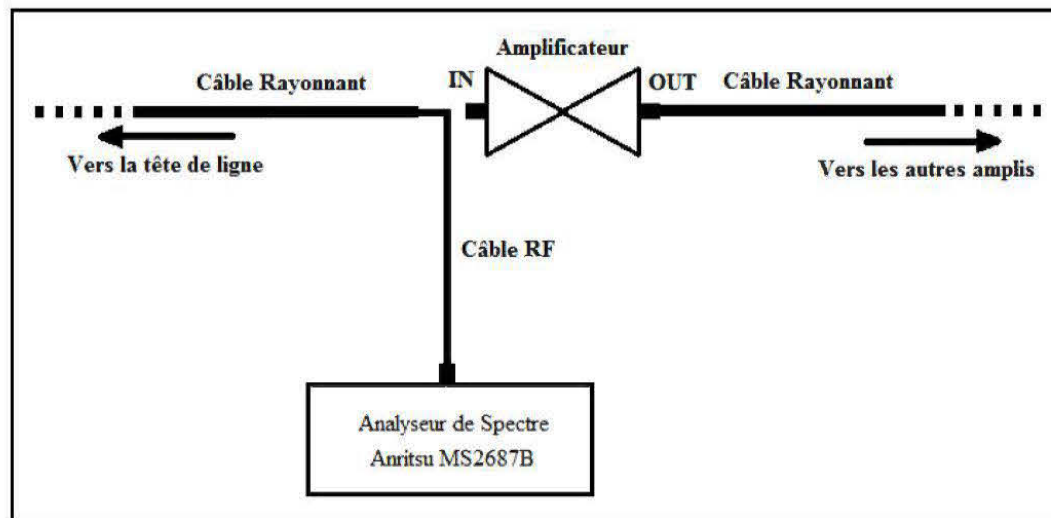


Figure 4.9: Schéma du protocole de mesure expérimental à Westwood (à l'entrée de l'amplificateur)

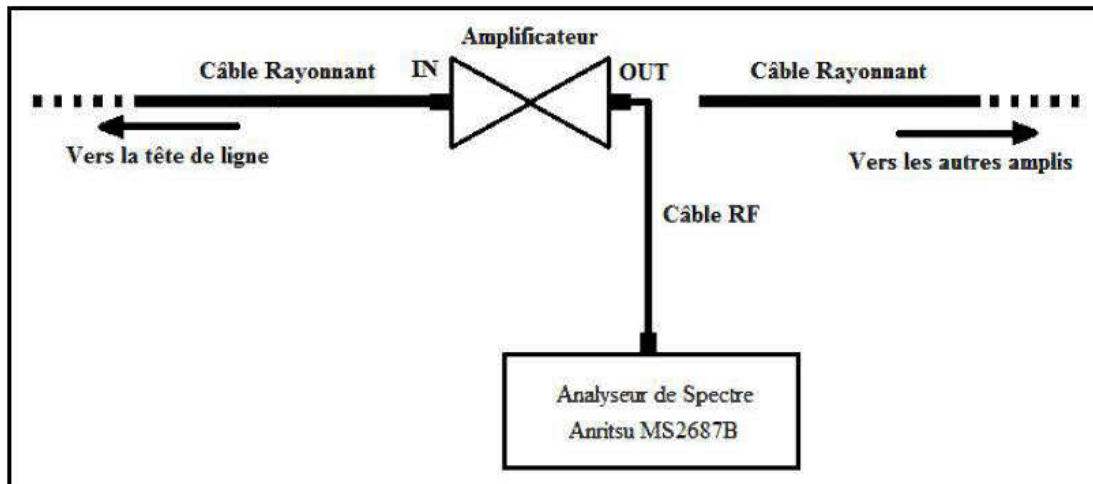


Figure 4.10: Schéma du protocole de mesure expérimental à Westwood (à la sortie de l'amplificateur)



Figure 4.11: Exemple d'un affichage de l'analyseur de spectre

Afin de mener nos mesures, divers matériels ont été utilisés :

- Analyseur de spectre : Anritsu MS2687B
- Câble RF : StormProduct true-blue série 205

L'analyseur de spectre Anritsu MS2687B couvre une bande de fréquence allant de 9 kHz à 30 GHz. Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques de cet analyseur :

Tableau 4.2: Paramètres de l'analyseur de spectre

Résolution de la bande passante	Compteur de fréquence	Précision du Span	Moyen du bruit	Atténuateur d'entrée
Allant jusqu'au 20 MHz	Résolution 1 Hz	$\pm 1\%$	$\leq -146$ dBm/Hz	0 à 70 dB (10 dB step)

Les câbles utilisés lors de nos mesures sont de type StormProduct True-blue série 205. Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 4.3: Paramètres du câble

Perte à 5 GHz	Perte à 10 GHz	Poids/mètre	Délai de propagation	Impédance
0.59 dB/m	0.85 dB/m	65.6 g/m	4.56 ns/m	$50 \pm 2\Omega$

#### 4.4.2 Analyse des mesures d'atténuation à la fréquence 150 MHz

Les résultats des mesures sont présentés par des graphes dans les figures ci-dessous.

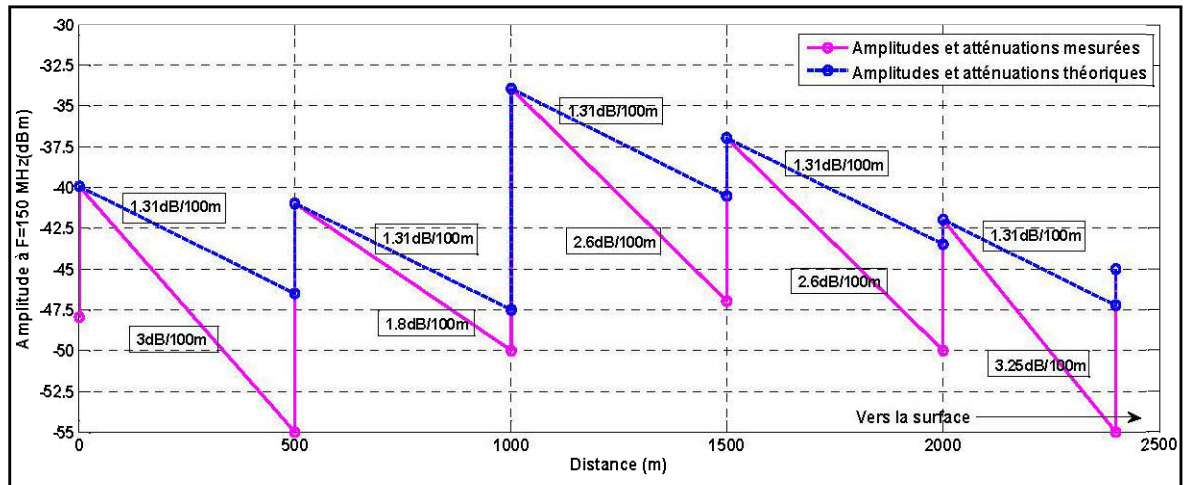


Figure 4.12: Atténuations à  $f=150$  MHz - Mesures Westwood

La figure 4.12 illustre les amplitudes mesurées du signal à la fréquence 150 MHz, ainsi que les atténuations théoriques du câble rayonnant Trilogy obtenues en se basant sur sa fiche technique en fonction de la distance vers la surface.

La courbe bleue montre les atténuations selon les spécifications (fiche technique) du câble rayonnant, tandis que la courbe violette montre les amplitudes et les atténuations mesurées à l'entrée et à la sortie de chaque amplificateur. Entre deux amplificateurs consécutifs, nous pouvons déterminer l'atténuation exprimée en dB/m dans les deux cas soient les spécifications et mesures.

À l'entrée du premier amplificateur, l'amplitude mesurée est de -48 dBm et à la sortie elle vaut -40 dBm. Après une distance de 500 m, distance séparant les deux premiers amplificateurs, on mesure l'amplitude à l'entrée du deuxième amplificateur et elle vaut -55 dBm. Le signal est donc atténué de 15 dB/500 m ce qui correspond à 3 dB/100 m, tandis qu'à la sortie la valeur est de -41 dBm après avoir subi l'amplification, et ainsi de suite pour tous les amplificateurs.

Quant aux atténuations selon les spécifications, à la fréquence 150 MHz, le câble a une atténuation de 1.31 dB/100m.

Les valeurs des atténuations varient entre 1.8 et 3.25 dB/100 m. Donc, chaque portion du câble présente une atténuation différente des autres.

On peut noter aussi que les atténuations mesurées dans toutes les portions sont supérieures à celles données par les spécifications.

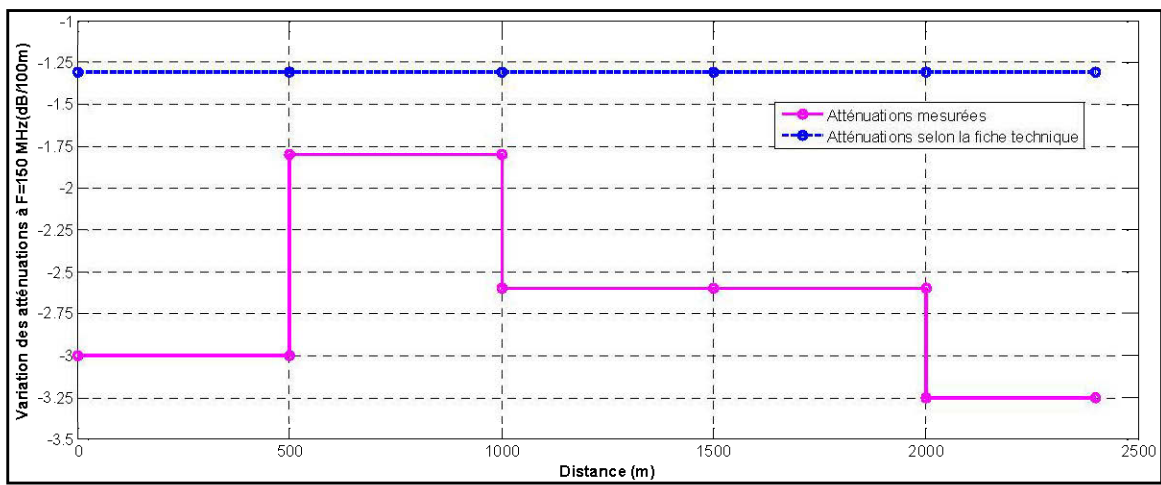


Figure 4.13: Variation des atténuations à f=150 MHz - Mesures Westwood

La figure 4.13 présente la variation des atténuations mesurées (tracée en violet) et celles obtenues selon les spécifications (tracée en bleu), à la fréquence 150 MHz et ce en fonction de la distance.

Dans le cas des atténuations obtenues selon la fiche technique, on peut noter que les valeurs sont identiques dans toutes les portions et valent 1.3 dB/100 m, contrairement aux atténuations mesurées dont leurs variations changent d'une portion à une autre.

Tel que montré à la figure 4.13 dans la première portion (de 0 m à 500 m), la valeur de l'atténuation est de -3 dB/100 m. Cette dernière diminue dans la deuxième portion (de 500 m à 1000 m) pour atteindre -1.8 dB/100 m. Au-delà de la troisième

portion (de 1000 m à 1500 m), les valeurs de ces atténuations augmentent pour atteindre une valeur de -3.25 dB/100 m dans la dernière portion.

Les atténuations changent d'une portion à l'autre, probablement à cause de l'accumulation qui diffère d'une section à l'autre.

#### 4.4.3 Analyse des mesures d'atténuation à la fréquence 450 MHz

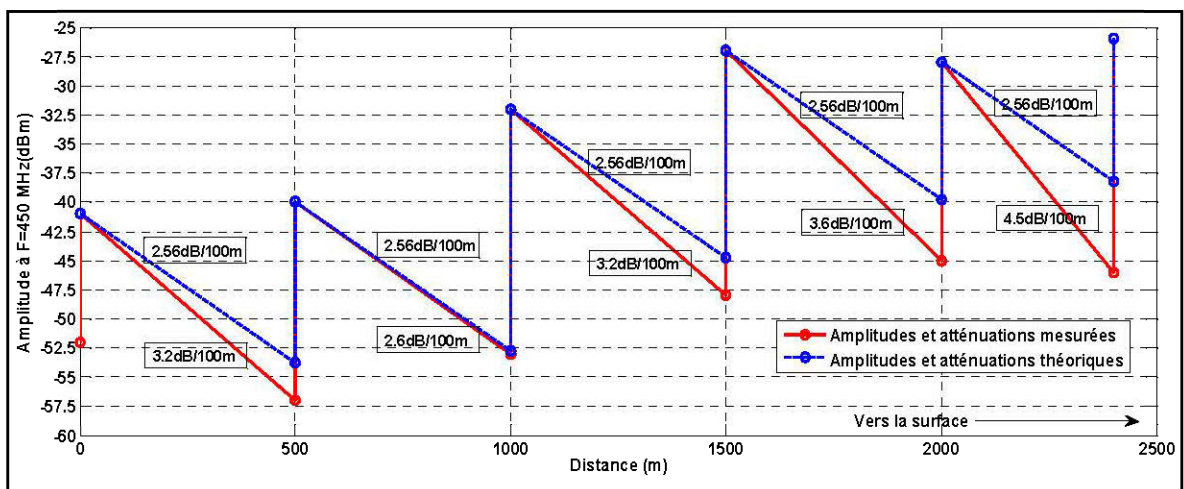


Figure 4.14: Atténuations à  $f=450$  MHz - Mesures Westwood

La figure 4.14 présente les amplitudes mesurées du signal et les atténuations théoriques du câble rayonnant Trilogy obtenues et ce en se basant sur la fiche technique de ce câble en fonction de la distance et en opérant à la fréquence 450 MHz.

De même, la courbe bleue montre les atténuations selon les spécifications du câble rayonnant. La courbe rouge montre les amplitudes et les atténuations mesurées au niveau de l'entrée et de la sortie de chaque amplificateur.

À l'entrée du premier amplificateur, l'amplitude mesurée est de -52 dBm et à la sortie la valeur est de -41 dBm. À l'entrée du deuxième, après une distance de

500 m, l'amplitude mesurée est de -57 dBm, donc le signal est atténué de 16 dB/500 m, ce qui équivaut à 3.2 dB/100 m. Tandis qu'à la sortie, la valeur est de -40 dBm après l'amplification et ainsi de suite pour tous les amplificateurs.

Quant aux atténuations selon les spécifications, à la fréquence 450 MHz, le câble a une atténuation de 2.56 dB/100 m.

Les valeurs des atténuations varient entre 2.6 et 4.5 dB/100 m. Donc, chaque portion du câble présente une atténuation différente des autres et les atténuations dans toutes les portions sont supérieures aux atténuations selon les spécifications.

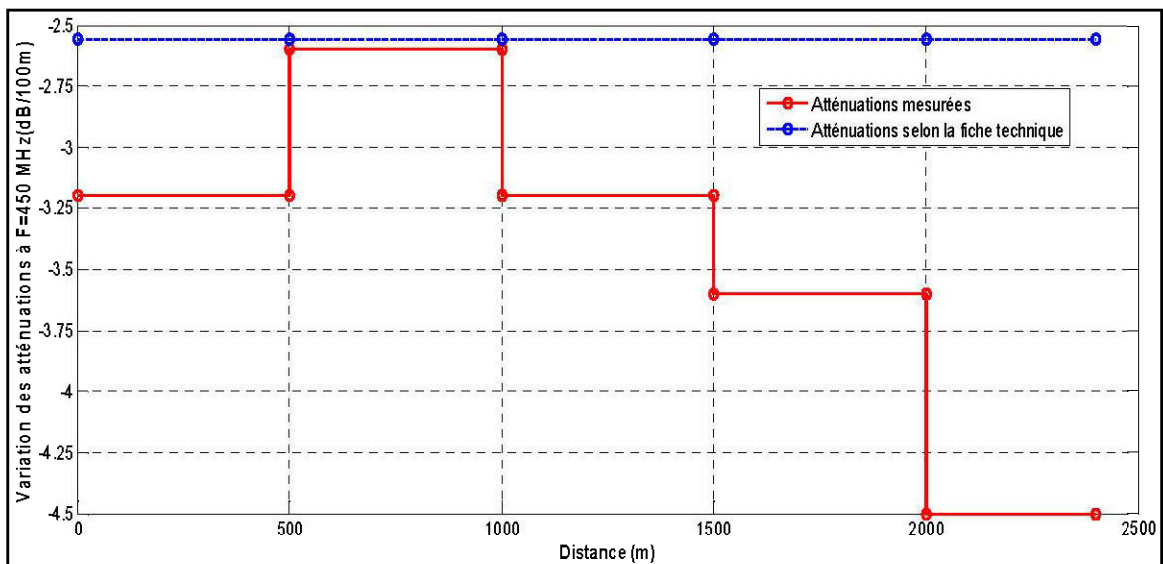


Figure 4.15: Variation des atténuations à f=450 MHz - Mesures Westwood

La figure 4.15 présente la variation des atténuations mesurées (tracée en rouge) et celles obtenues selon les spécifications (tracée en bleu), à la fréquence 450 MHz en fonction de la distance mesurée.

Dans le cas des atténuations obtenues selon la fiche technique, on peut noter que les valeurs des atténuations sont les mêmes dans toutes les portions et valent 2.56



dB/100 m tandis que dans le cas des atténuations mesurées, ces variations changent d'une portion à une autre, comme dans le cas de la fréquence 150 MHz.

Comme le montre la figure 4.15, dans la première portion (allant de 0 m à 500 m), la valeur de l'atténuation est de -3.2 dB/100 m et cette dernière diminue dans la deuxième portion (de 500 m à 1000 m) pour atteindre -2.6 dB/100 m. Au-delà de la troisième portion (de 1000 m à 1500 m), les valeurs de ces atténuations augmentent pour atteindre une valeur de -4.5 dB/100 m dans la dernière portion.

Nous avons noté, de même qu'à la fréquence 150 MHz, que les atténuations changent d'une portion à l'autre, probablement, à cause de l'accumulation qui diffère d'une section à l'autre.

#### **4.5 Mesures sur le câble rayonnant au laboratoire**

Au laboratoire LRTCS, nous avons mené des mesures plus poussées, dans un environnement contrôlé et stable, en utilisant deux portions du même câble rayonnant Trilogy utilisé dans la mine Westwood. L'un de ces câbles est neuf et l'autre est recouvert de poussière. La longueur des portions est de cinq (5) mètres chacune (Figure 4.16).

Le but de ces mesures est de comparer les deux câbles au niveau de l'atténuation et de la propagation du signal. Ces mesures ne sont pas réalisées dans la mine en raison de la complexité de l'environnement dans une mine fonctionnelle et de l'impossibilité de bloquer le travail de la mine dans les milieux de mesure.



Figure 4.16: Mesures au dépôt du laboratoire

## 4.5.1 Mesures de propagation

### 4.5.1.1 Système de mesure

Un générateur de signal a été utilisé pour injecter un signal (5 dBm) dans le câble rayonnant et un analyseur de spectre a été utilisé avec une antenne (150 MHz/450 MHz) connectée pour recevoir le signal sortant du câble rayonnant.

L'analyseur de spectre est déplacé selon deux axes X et Y (Figure 4.17). L'axe X en parallèle au câble, varie de zéro (0) à cinq (5) m par pas d'un (1) mètre tout au long du câble. Zéro (0) mètre représente le début du câble et cinq (5) m c'est l'extrémité.

L'axe Y, perpendiculaire au câble, varie d'un pas d'un (1) mètre en s'éloignant de trois (3) mètres du câble. À chaque point, l'amplitude du signal est mesurée et notée.

Ces mesures sont répétées deux fois. Une première fois pour le cas du câble neuf et une autre pour le câble couvert de poussière.

Le montage expérimental ci-dessous a été réalisé et utilisé pour effectuer les mesures de propagation par nous-mêmes.

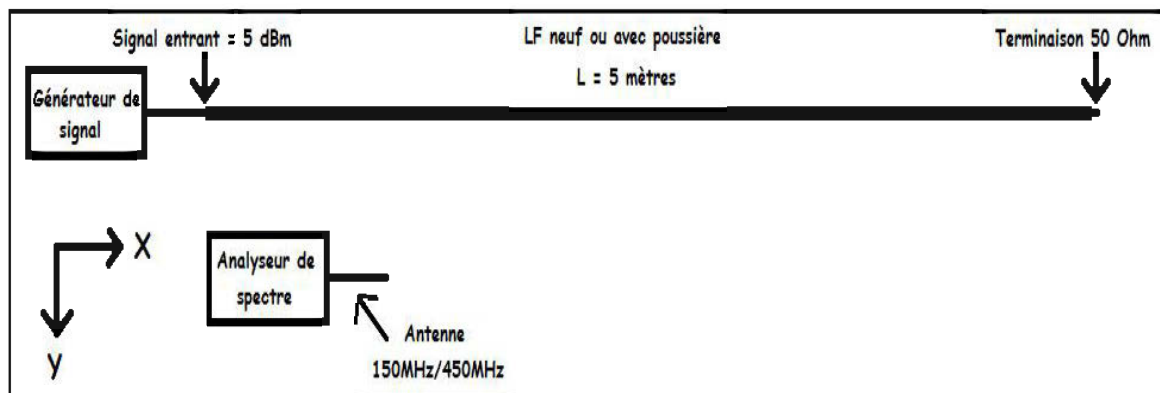


Figure 4.17: Schéma du protocole de mesure de propagation au laboratoire

Dans cette mesure, nous avons utilisé les matériels suivants :

- Générateur de signal : Anritsu MG3700A
- Analyseur de spectre : Anritsu MS2687B
- Antenne omnidirectionnelle double bande

Le générateur de signal Anritsu MG3700A couvre une bande de fréquence allant de 250 kHz à 3 GHz. Il possède une fonction intégrée de générateur de bande de base de signaux arbitraires à grande vitesse avec un taux d'échantillonnage de 160 MHz. Il prend en charge une bande passante de modulation vectorielle à 120 MHz et dispose d'une grande mémoire de forme d'onde arbitraire allant jusqu'à 2 Go. Il a une précision de niveau absolu égale à  $\pm 0.5$  dB et un disque dur pour le stockage des données de 40 GB.

L'antenne omnidirectionnelle utilisée est une simple antenne couvre une bande de fréquence allant de 144 MHz à 450 MHz. Il a un gain de deux (2) dBi et une impédance de  $50 \Omega$ . Sa déviation de fréquence est égale à  $\pm 5$  kHz.

#### 4.5.1.2 Analyse des mesures de propagation à la fréquence 150 MHz

Les résultats des mesures menées au laboratoire à la fréquence 150 MHz sont présentés dans la figure 4.18 ci-dessous.

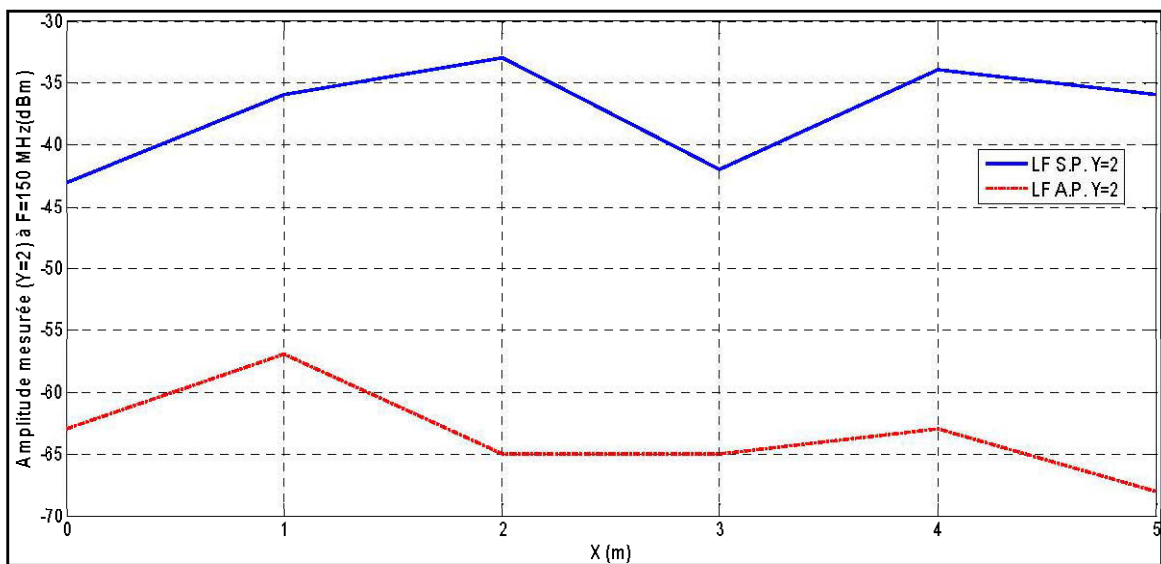


Figure 4.18: Amplitude mesurée à  $f=150$  MHz à une distance du câble de  $Y=2$  m

La figure 4.18 montre les graphes présentant les valeurs des amplitudes du signal, à la fréquence 150 MHz, se propageant dans le câble rayonnant avec et sans poussière, obtenues suite aux mesures réalisées au sein du laboratoire.

D'après la fiche technique du câble rayonnant Trilogy, les valeurs des amplitudes ont été mesurées où  $Y=2$  m où la perte de couplage est de 95%.

La courbe bleue de la figure 4.18 présente les valeurs des amplitudes du signal se propageant dans le câble rayonnant sans poussière en fonction de la distance  $X$ , tandis que la courbe rouge présente les valeurs des amplitudes du signal se propageant dans le câble avec poussière. Les mesures sont réalisées à une fréquence  $f=150$  MHz.

À  $X=0$  m, l'amplitude du signal dans le câble sans poussière vaut  $-43$  dBm. En augmentant  $X$ , cette valeur varie pour atteindre  $-36$  dBm où  $X=5$  m. D'autre part, l'amplitude du signal dans le câble avec poussière est égale à  $-63$  dBm à  $X=0$  m et atteint  $-68$  dBm à  $X=5$  m.

#### 4.5.1.3 Analyse des mesures de propagation à la fréquence 450 MHz

Les résultats des mesures menées au laboratoire à la fréquence 450 MHz sont présentés dans la figure 4.19 ci-dessous.

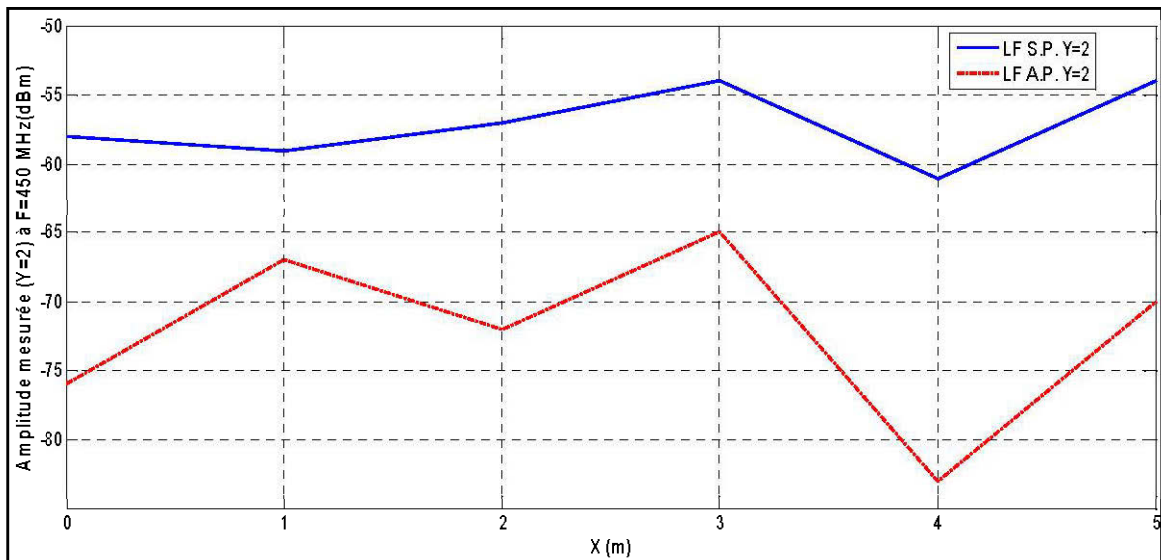


Figure 4.19: Amplitude mesurée à  $f=450$  MHz à une distance du câble de  $Y=2$  m

À la figure 4.19, la courbe bleue présente les valeurs des amplitudes du signal se propageant dans le câble sans poussière en fonction de la distance  $X$  et la courbe rouge présente le cas où le câble est couvert par la poussière. Les mesures sont menées en opérant à une fréquence  $f=450$  MHz.

À  $X=0$  m, l'amplitude du signal dans le câble sans poussière est égale à  $-58$  dBm et atteint  $-54$  dBm à l'extrémité du câble (c.-à-d.  $X=5$  m). Tandis que l'amplitude du signal dans le câble avec poussière est égale à  $-76$  dBm à  $X=0$  m et atteint  $-70$  dBm à  $X=5$  m.

D'après les figures 4.18 et 4.19, on remarque qu'à une distance  $d=2$  m du câble rayonnant, les valeurs des amplitudes du signal mesurées du câble avec poussière sont inférieures à celles mesurées dans le câble sans poussière.

En effet, la propagation du signal a été affectée par la poussière présente sur le câble, ce qui prouve que celle-ci a joué un rôle dans l'affaiblissement du signal. Cet affaiblissement est plus important en opérant à la fréquence 450 MHz qu'en opérant à 150 MHz, ce qui provoque un problème de fonctionnement du système de la voix en opérant à 450 MHz.

## **4.5.2 Mesures des paramètres $S_{11}$ et $S_{21}$**

### **4.5.2.1 Système de mesure**

En menant ces mesures dans cette étape, nous avons utilisé l'analyseur de réseau pour obtenir les valeurs des paramètres  $S_{11}$  et  $S_{21}$ .

Le paramètre  $S_{11}$  est le coefficient de réflexion sur le port un (1) et le paramètre  $S_{21}$  est le coefficient de transmission du port un (1) vers le port deux (2).

D'après le paramètre  $S_{21}$ , nous pouvons étudier les atténuations du signal dans le câble rayonnant. À cette étape, nous avons mesuré les valeurs de ces paramètres sur une bande de fréquence de 10 MHz allant jusqu'à 2500 MHz afin d'étudier les fréquences pouvant être utilisées dans le futur.

Pour réaliser ce test, une portion de cinq (5) m du câble rayonnant a été utilisée. Un bout a été connecté au port un (1) de l'analyseur du réseau, et l'autre bout au port deux (2). La figure 4.20 présente le schéma du protocole de cette mesure. Ce test a été répété deux fois. Une première fois avec un câble neuf et une autre fois pour un câble avec poussière. Les valeurs des paramètres  $S_{11}$  et  $S_{21}$  sont notées.

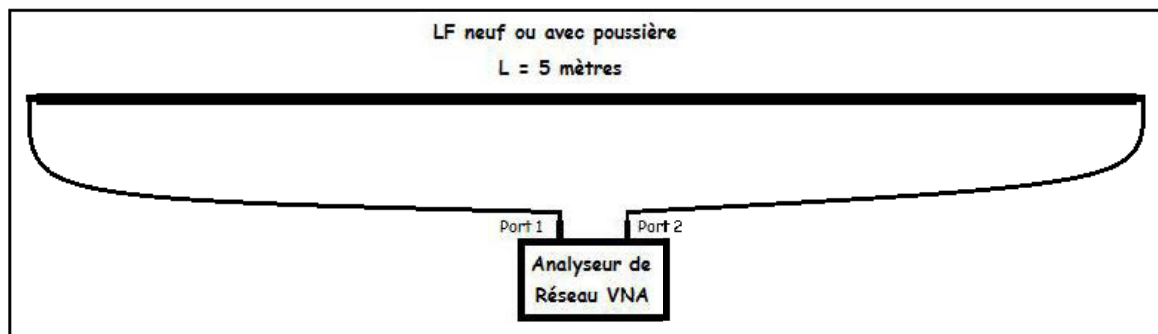


Figure 4.20: Schéma du protocole de mesure des paramètres S au laboratoire

Dans cette mesure nous avons utilisé les matériels suivants :

- Analyseur de réseau VNA : Agilent E8363B
- Câbles RF : StormProduct true-blue série 205

L'analyseur du réseau vectoriel Agilent E8363B couvre une grande bande de fréquence allant de 10 MHz jusqu'à 40 GHz. Sa vitesse de mesure pouvant atteindre 26  $\mu$ s/point. De plus, il comporte 32 canaux, 2 ports et le nombre de pas fréquentiel atteint 16001.

#### 4.5.2.2 Analyse des mesures du paramètre $S_{11}$

La figure 4.21 montre l'amplitude du paramètre  $S_{11}$  pour les deux portions de câbles : sans et avec poussière en fonction de la fréquence.

La courbe bleue montre l'amplitude du paramètre  $S_{11}$  pour le câble rayonnant sans poussière, tandis que la courbe rouge montre celle pour le câble avec poussière.

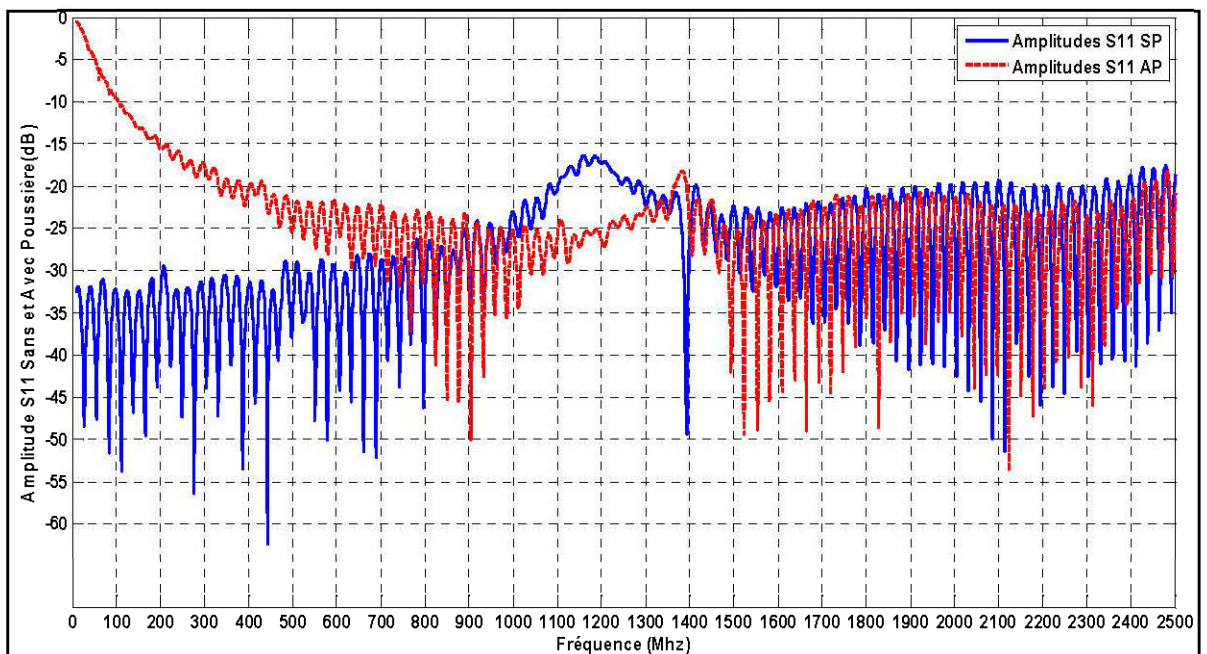


Figure 4.21: Mesures du paramètre  $S_{11}$  au laboratoire

Pour les fréquences allant de 10 MHz jusqu'à 500 MHz, les valeurs de  $S_{11}$  pour le câble sans poussière sont considérées normales, tandis que pour le câble avec poussière, les valeurs de  $S_{11}$  varient de 0 dB jusqu'à -25 dB. Ces valeurs sont supérieures à celles obtenues pour le câble sans poussière, et elles sont considérées inacceptables pour le paramètre  $S_{11}$ .



Pour les autres fréquences allant de 500 MHz jusqu'à 2500 MHz, les valeurs de  $S_{11}$  dans les deux cas sont proches et varient entre -17 dB et -50 dB. Ces dernières sont considérées acceptables malgré la présence de poussière.

D'après les résultats obtenus des mesures du paramètre  $S_{11}$ , nous pouvons noter qu'avec la présence de poussière, les basses fréquences sont davantage affectées. Cela revient à l'effet des éléments composant la poussière sur l'impédance du câble, provoquant par la suite un changement dans la valeur de cette dernière. Ce changement s'effectue aléatoirement et il est impossible de le déterminer puisque la présence de la poussière sur le câble n'est pas parfaitement uniforme et chaque portion du câble peut être couverte par une quantité variable de poussière.

Suite au changement dans l'impédance, et comme mentionné dans la section 4.3.2.3, la puissance du signal transmis est donc affectée et par conséquent la puissance du signal reçu l'est également.

Les hautes fréquences ne sont pas affectées malgré la présence de poussière et du changement de l'impédance. Les éléments qui constituent la poussière agissent donc sur le signal seulement aux basses fréquences.

#### 4.5.2.3 Analyse des mesures du paramètre $S_{21}$

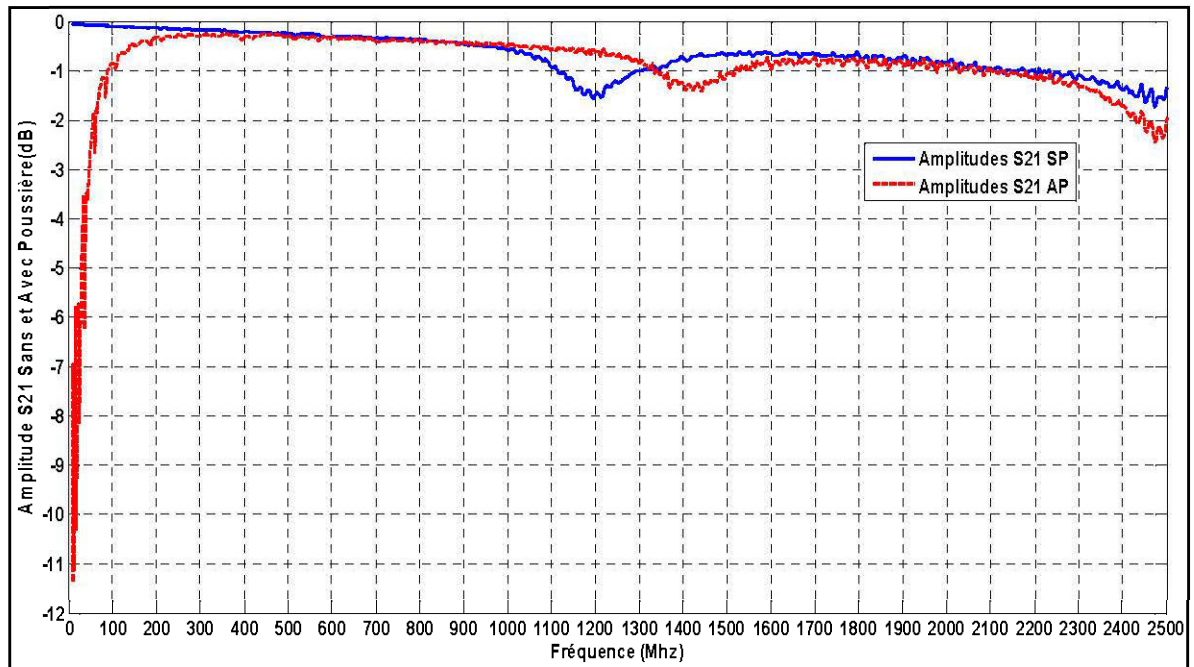


Figure 4.22: Mesures du paramètre  $S_{21}$  au laboratoire

La figure 4.22 montre l'amplitude du paramètre  $S_{21}$  pour les deux portions de câbles : avec et sans poussière en fonction de la fréquence.

La courbe bleue montre l'amplitude du paramètre  $S_{21}$  pour le câble rayonnant sans poussière, tandis que la courbe rouge montre celle pour le câble avec poussière.

Bien qu'en opérant en basses fréquences, les valeurs de  $S_{21}$ , pour le cas du câble sans poussière, soient inférieures aux autres. Nous pouvons noter, en opérant en hautes fréquences, que la situation est inversée et les valeurs de  $S_{21}$  pour le câble avec poussière sont proches ou même meilleures que celles obtenues pour le câble sans poussière.

D'après les allures des courbes de la figure 4.22, nous constatons qu'en plus de l'effet de la variation de l'impédance du câble rayonnant, la poussière se comporte comme un blindage électromagnétique.

Généralement, un blindage (Fig. 4.23) se produit lorsqu'un champ électromagnétique, évalué par sa composante électrique  $E_i$ , rencontre une barrière conductrice, une partie  $E_r$  est réfléchiée et repart en arrière [65].

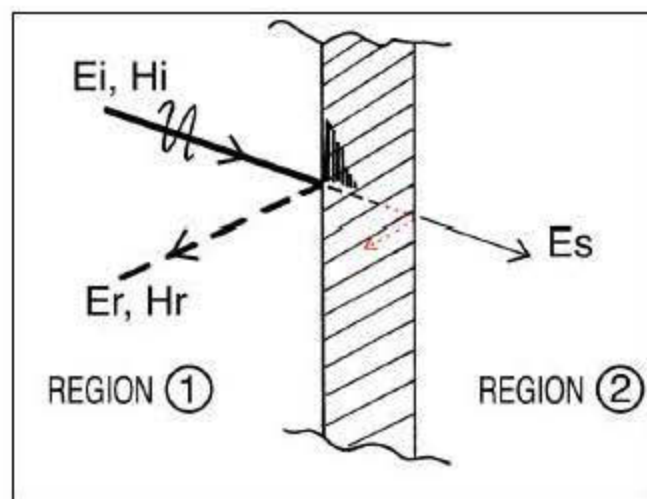


Figure 4.23: Blindage [65]

Ce phénomène implique une perte par réflexion et par absorption. La réflexion est liée à la désadaptation de l'onde électromagnétique rencontrant un changement abrupt du milieu, et dépend encore de l'impédance de surface du matériau et de l'impédance d'onde du champ incident. Quant à l'absorption, elle est liée à l'effet de peau dans le métal et dépend de la conductivité, de la perméabilité magnétique du matériau, et de la fréquence [65].

En revenant à la figure 4.22 et en présence de poussière, l'absorption causée par le blindage a un effet sélectif aux basses fréquences. Bien qu'en hautes fréquences ce phénomène n'est pas clair, les atténuations pour les deux câbles, avec

et sans poussière, sont reliées à l'augmentation de la fréquence, puisque selon la fiche technique du câble, en augmentant la fréquence les atténuations augmentent.

De plus, nous pouvons noter que l'effet aux basses fréquences revient encore à la nature de la poussière et aux dimensions de la fente du câble.

#### **4.6 Conclusion**

Le but de ce chapitre était de présenter les techniques, les équipements de mesure et les différentes méthodes utilisées dans les mesures réalisées.

Des mesures réelles réalisées dans la mine Westwood et au LRTCS sur les câbles rayonnants sont expliquées.

Les résultats de ces mesures ont été présentés et expliqués.

## Chapitre 5

### SIMULATION ET MODÉLISATION

#### 5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation avec le logiciel CST du câble rayonnant et nous analysons les résultats obtenus. Enfin, nous proposons des solutions au problème étudié.

#### 5.2 Logiciel de simulation

CST (Computer Simulation Technology) est un logiciel spécialisé pour la conception et l'analyse électromagnétique dans le domaine des hautes fréquences. Il simplifie le processus de création de structure en fournissant une modélisation graphique frontale massive basée sur le noyau de modélisation ACIS. Après la construction du modèle, une procédure entière de maillage automatique est appliquée préalablement au lancement de la simulation [60].

Puisqu'aucune méthode ne convient à toutes les applications, ce logiciel contient plusieurs techniques de simulation différentes (solveur transitoire "*transient solver*", solveur du domaine fréquentiel "*frequency domain solver*", solveur d'équation intégrale "*integral equation solver*", solveur multicouche "*multilayer solver*", solveur asymptotique "*asymptotic solver*", et solveur mode propre "*eigenmode solver*") pour mieux s'adapter à diverses applications.

La technique de solveur du domaine fréquentiel a été choisie dans notre simulation afin d'obtenir les paramètres S du câble coaxial structuré et puisqu'il contient des alternatives pour le calcul rapide des paramètres S pour les structures très résonnantes.

Le programme est particulièrement adapté à l'analyse et la conception rapide et efficace des composantes tels que les antennes (y compris les tableaux réseaux "*arrays*"), les filtres, les lignes de transmission, les coupleurs, les connecteurs, les cartes de circuits imprimés, les résonateurs et autres. CST peut résoudre n'importe quel problème de champ en hautes fréquences [60].

### **5.3 Modélisation de la poussière**

Pour simuler avec les mêmes conditions dans lesquelles se trouve le câble rayonnant, il faut reproduire ces dernières dans notre modèle et cela en ajoutant les mêmes éléments de la poussière qui se trouvent sur le câble utilisé dans la mine.

La première étape consiste à bien construire la structure du câble avec toutes ses propriétés, les détails concernant les matières constituant les conducteurs interne et externe ainsi que les matières séparant les deux conducteurs et les dimensions de chacune. En outre, en prenant en considération la longueur de la fente présente sur le conducteur extérieur permettant la fuite du signal. À noter que cette caractéristique est très importante à prendre en considération afin d'obtenir une structure similaire au câble réel (figures 5.1 et 5.2).

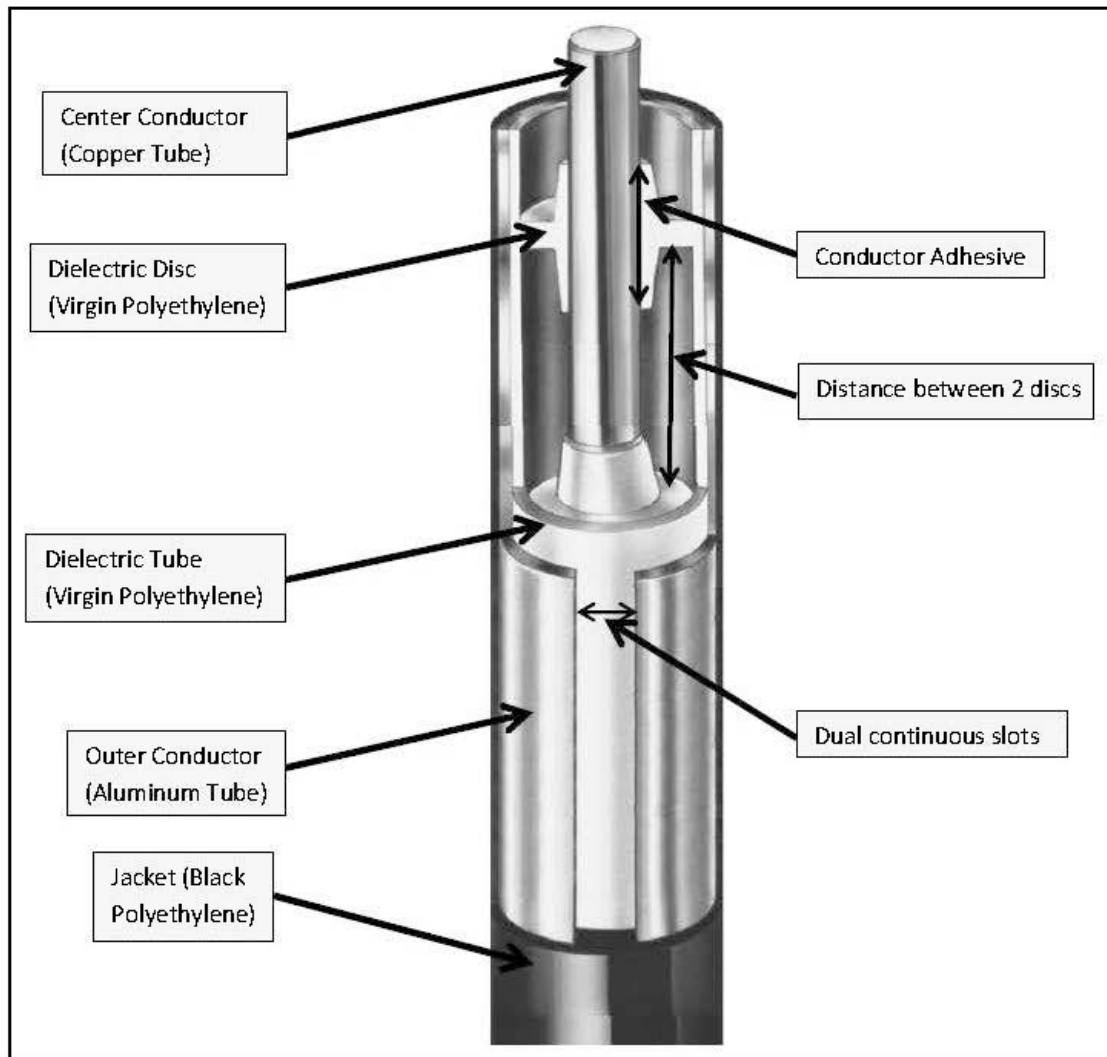


Figure 5.1: La structure réelle du câble rayonnant Trilogy [61]

La deuxième étape consiste à ajouter la poussière. Cette dernière est donc constituée, selon l'analyse des chimistes dans la mine, d'un mélange des éléments suivants : la pyrite, le carbone et la silice dont les constantes diélectriques sont 80, 2.17 et 11.9 respectivement. Comme dans la réalité, nous avons ajouté sur la gaine extérieure du câble une couche uniforme de chacun des trois éléments de la poussière sur toute la structure simulée (figure 5.2).

## 5.4 Modélisation du câble rayonnant

Nous avons simulé une structure d'un (1) mètre du câble rayonnant Trilogy installé dans la mine en respectant toutes ses propriétés. La figure 5.2 présente la structure simulée.

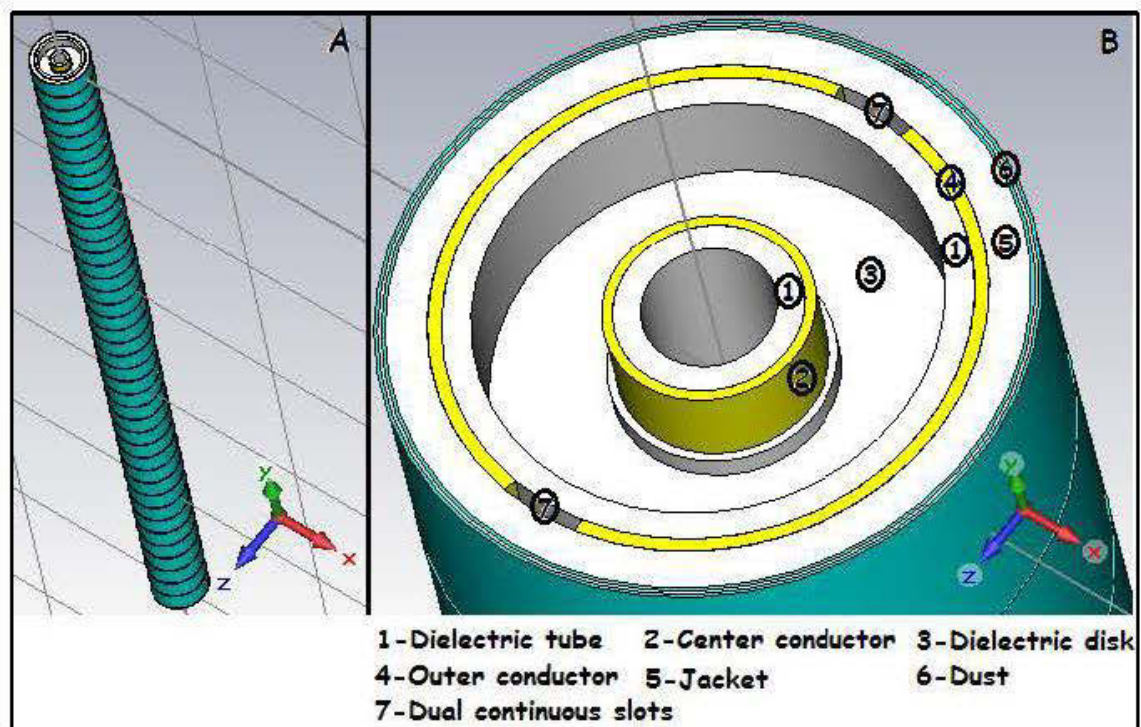


Figure 5.2: Vue générale et détaillée de la structure simulée du câble rayonnant Trilogy

Nous avons simulé différentes épaisseurs de poussière aux fréquences suivantes: 150 MHz, 450 MHz et 2.4 GHz. La simulation nous donne les valeurs d'amplitude des paramètres  $S_{11}$  et  $S_{21}$ . Les résultats sont présentés aux figures 5.3 et 5.4.



### 5.4.1 Analyse du paramètre $S_{11}$ du câble simulé

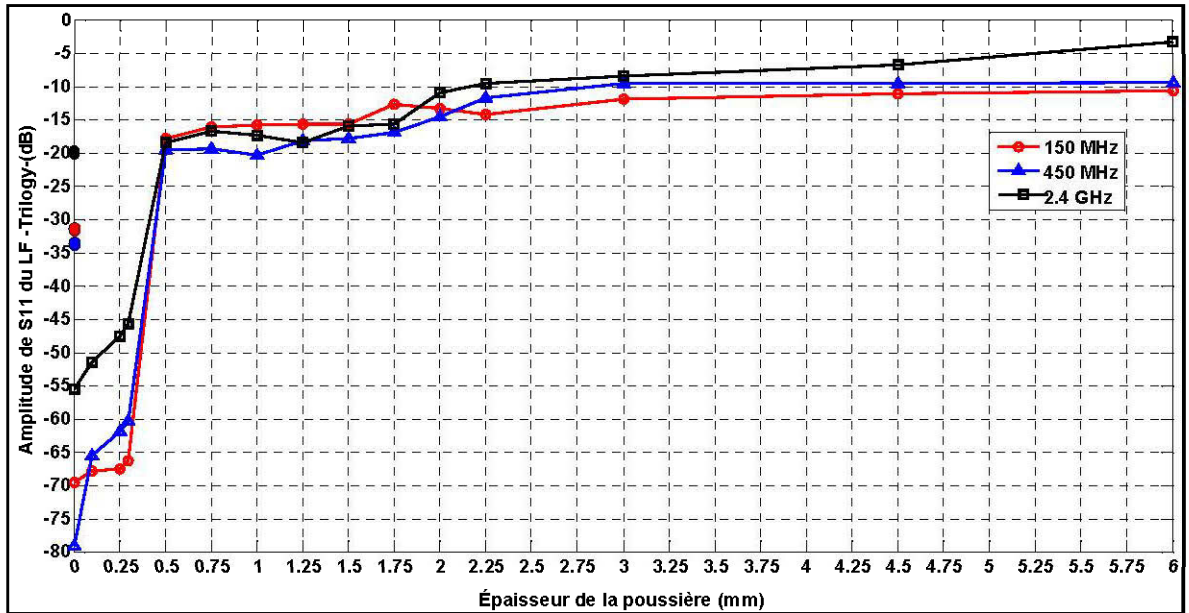


Figure 5.3: Simulation du paramètre  $S_{11}$  - Câble rayonnant Trilogy

La figure 5.3 montre l'amplitude  $S_{11}$  en fonction de l'épaisseur de la poussière. Les courbes présentent le résultat de la simulation. La courbe rouge présente l'amplitude  $S_{11}$  tout en fonctionnant à 150 MHz, la courbe bleue à 450 MHz et la courbe noire à 2.4 GHz. Les trois points situés hors les courbes, colorés en rouge, bleu et noir représentent les valeurs de mesures du paramètre  $S_{11}$  pour le câble sans poussière réalisées au laboratoire respectivement pour les fréquences 150 MHz, 450 MHz et 2.4 GHz.

À une épaisseur de 0 mm de poussière, les valeurs de  $S_{11}$  restent normales et acceptables à toutes les fréquences. Tout en augmentant cette épaisseur, les valeurs de  $S_{11}$  diminuent jusqu'à s'approcher de -10 dB à la fois pour 150 MHz et 450 MHz, tandis que lorsque cette épaisseur atteint 6 mm à 2.4 GHz, la valeur atteint environ -4 dB.

Néanmoins, lorsque l'épaisseur de la poussière est supérieure ou égale à 0,5 mm, les valeurs obtenues du paramètre  $S_{11}$  sont très proches l'une de l'autre et sont inacceptables, ce qui pose un problème réel en terme de propagation du signal. On remarque, d'après ces résultats, que le phénomène de blindage expliqué à l'aide des résultats au chapitre précédent se répète et affecte le signal selon l'augmentation de l'épaisseur de poussière. Toutefois, au delà de l'épaisseur de 0.5 mm et en raison des matériaux ajoutés, l'effet du blindage atteint sa saturation et agit donc sur l'impédance jusqu'à l'épaisseur de 0.5 mm. Après cela, il paraît clair que son effet diminue puisque les valeurs de  $S_{11}$  simulées pour les trois fréquences seront à peu près similaires et ne changent pas de façon importante après l'atteinte d'une épaisseur de 0.5mm.

Quant aux valeurs du paramètre  $S_{11}$  mesurées au laboratoire pour le câble sans poussière, on trouve qu'elles sont égales à -32.6 dB, -33.8 dB et -19.2 dB respectivement pour les fréquences 150 MHz, 450 MHz et 2.4 GHz.

Même si le câble utilisé pour les mesures était neuf et n'était pas couvert de poussière, on peut clairement noter que ces valeurs sont différentes des valeurs simulées. D'après nos tests faits sur le câble, nous avons constaté que les caractéristiques publiées pour ce dernier sont celles obtenues dans les conditions idéales de l'usine tandis que les modifications et les effets mécaniques causés par l'installation et l'utilisation de ce câble affectent significativement, par la suite, ses caractéristiques. Cela peut expliquer l'obtention de valeurs mesurées différentes de celles de la simulation présentant des conditions idéales similaires ou même meilleures que celles prévalant à l'usine.

### 5.4.2 Analyse du paramètre $S_{21}$ du câble simulé

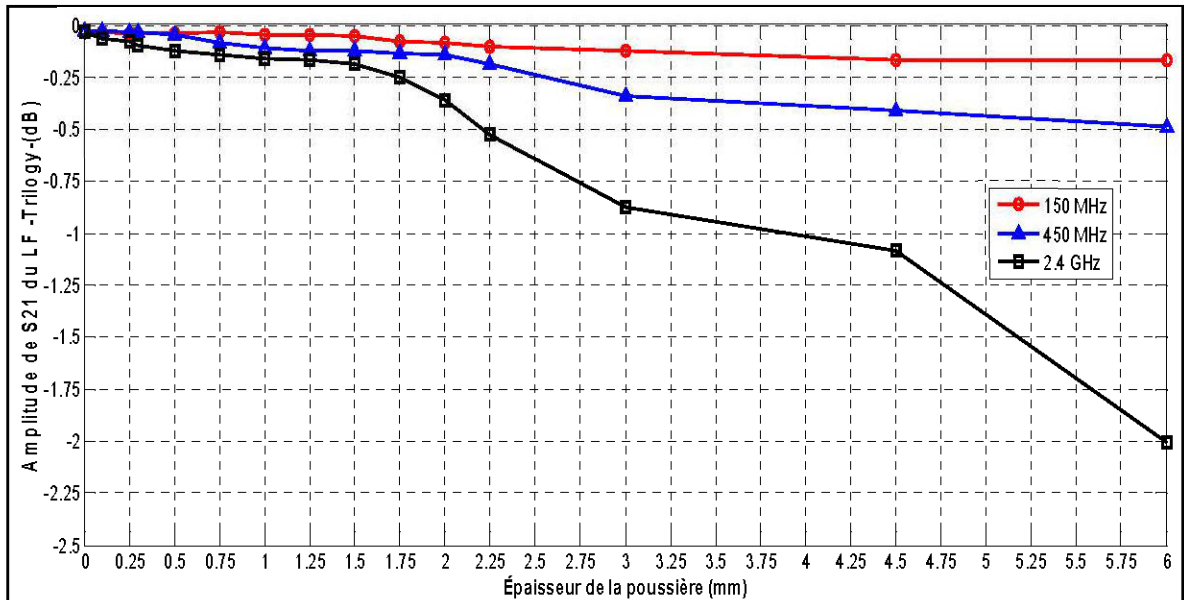


Figure 5.4: Simulation du paramètre  $S_{21}$  - Câble rayonnant Trilogy

Les résultats de la figure 5.4 montrent l'amplitude  $S_{21}$  en fonction de l'épaisseur de la poussière. La courbe rouge présente l'amplitude  $S_{21}$  tout en fonctionnant à 150 MHz, la courbe bleue à 450 MHz et la courbe noire à 2.4 GHz. Avec une épaisseur de poussière de 0 mm, les valeurs de  $S_{21}$  restent normales (150 MHz : -0.032 dB, 450 MHz : -0.0305 dB, 2.4 GHz : -0.033 dB) et acceptables à toutes les fréquences, et ce en les comparant à la fiche technique du câble (150 MHz : -0.0131 dB, 450 MHz : -0.0256 dB, 2.4 GHz : -0.0766 dB).

En augmentant l'épaisseur de la poussière, les valeurs de  $S_{21}$  augmentent progressivement pour atteindre, à l'épaisseur de 6 mm, les valeurs -0.17 dB, -0.48 dB et -2 dB respectivement aux fréquences 150 MHz, 450 MHz et 2.4 GHz.

Ces valeurs obtenues pour une structure simulée d'un (1) mètre sont inacceptables, puisque lorsque nous opérons à une distance supérieure à 350 m - la distance séparant deux amplificateurs - elles dépassent le seuil de réception

(généralement de -95 dBm) et le signal sera un bruit. En outre, nous pouvons noter qu'en augmentant la fréquence, les atténuations augmentent.

Pour pouvoir comparer les amplitudes du paramètre  $S_{21}$  du câble rayonnant Trilogy obtenues par la simulation (sans poussière) avec celles obtenues par les mesures au laboratoire (sans poussière), nous avons tracé ces amplitudes sur la même figure.

La figure 5.5 montre la comparaison entre ces différentes amplitudes du paramètre  $S_{21}$ .

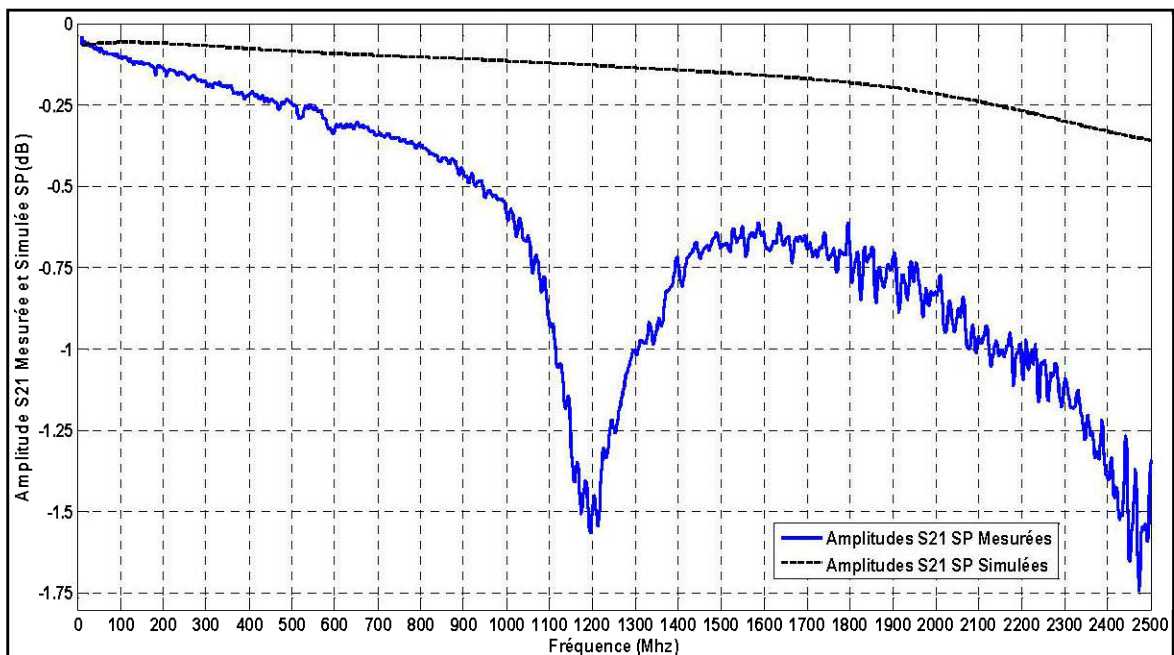


Figure 5.5: Comparaison du paramètre  $S_{21}$  entre mesures et simulations sans poussière

La courbe bleue montre l'amplitude du paramètre  $S_{21}$  pour le câble sans poussière, et la courbe noire montre celle pour le câble sans poussière simulé à l'aide de CST.

Au début, les deux amplitudes mesurées et simulées commencent presque aux mêmes valeurs. Par la suite, en augmentant la fréquence, les atténuations simulées et mesurées augmentent progressivement et avec une courbure supérieure à celles mesurées.

À la fréquence 1000 MHz, l'amplitude mesurée de  $S_{21}$  chute brusquement pour atteindre -1.55 dB à la fréquence 1200 MHz.

Nous notons que l'amplitude mesurée présente plus d'atténuation que celle simulée. Ce résultat peut être expliqué par le fait que la simulation présente des conditions idéales en terme de propagation et d'atténuation et sans perturbation externe, tandis que les mesures ne sont pas faites dans les conditions idéales et sont affectées par plusieurs éléments comme l'environnement de mesure, la courbure du câble et la précision des équipements de mesures.

En outre, après son installation et son utilisation, le câble rayonnant subit des modifications et des effets mécaniques qui affectent ses caractéristiques, d'où la différence entre les valeurs mesurées de  $S_{21}$  et celles de la fiche technique du câble.

## 5.5 Propositions de solutions

Notre étude du problème d'atténuation, soit en menant des tests et des mesures à la mine Westwood et au laboratoire, soit en exécutant des simulations, nous a permis d'extraire des solutions et des suggestions. Une solution au problème d'atténuation nécessitera, selon le cas, l'implantation d'une ou de plusieurs des solutions potentielles proposées. Elles sont présentées ci-dessous.

- 1- Durant nos mesures, un facteur très important a été noté et a causé de fortes atténuations pour le signal : c'est la courbure du câble qui crée et cause plus d'atténuations. De plus, on peut noter que l'augmentation de la courbure du câble augmente l'atténuation. Il faut donc fortement éviter si possible le pliage

du câble et essayer de le garder droit. Pour cela, il est recommandé d'installer le câble au milieu des galeries et non aux coins si possible, et de respecter le rayon de courbure spécifié par la fiche technique.

- 2- Les mesures ont montré qu'en opérant aux hautes fréquences et en présence de poussière, le signal subit moins d'atténuation. En effet, la poussière - comme nous l'avons déjà expliqué au chapitre 4 - se comporte comme un blindage électromagnétique; elle a plus d'effet aux basses fréquences qu'aux hautes fréquences, et cela est dû à la nature des éléments constituant la poussière et aux dimensions de la fente qui sont dépendant de la longueur d'onde. Selon le phénomène de blindage, l'augmentation de la fréquence diminue la longueur d'onde et par conséquent les dimensions de la fente requise pour une meilleure émission et vice versa.

Donc, en décalant les bandes de fréquences des systèmes opérant en basses fréquences vers les hautes fréquences, nous obtiendrons de meilleurs résultats en termes d'atténuation et de propagation en présence de poussière.

- 3- Les mesures ont montré que chaque portion du câble présente une atténuation différente des autres portions (atténuations mesurées entre deux (2) amplificateurs). Donc, en utilisant un AGC (*Automatic Gain Control*) pour régler les amplificateurs, les atténuations présentes dans chaque portion du câble seront automatiquement compensées.
- 4- Selon les résultats des mesures du paramètre  $S_{11}$  obtenus, nous remarquons que l'impédance du câble a été affectée par la poussière. Un adaptateur d'impédance intégré à l'entrée et à la sortie de l'amplificateur s'ajustera en fonction de la puissance transmise et incidente. Cette intégration règlera

automatiquement le problème de l'impédance du câble et par la suite devrait avoir un impact positif sur le problème d'atténuation.

- 5- Dans le cadre de nos simulations, une étude a été faite afin d'estimer la distance séparant deux amplificateurs, en fonction de l'épaisseur de la poussière, pour avoir un meilleur signal. La figure 5.6 ci-dessous décrit les résultats.

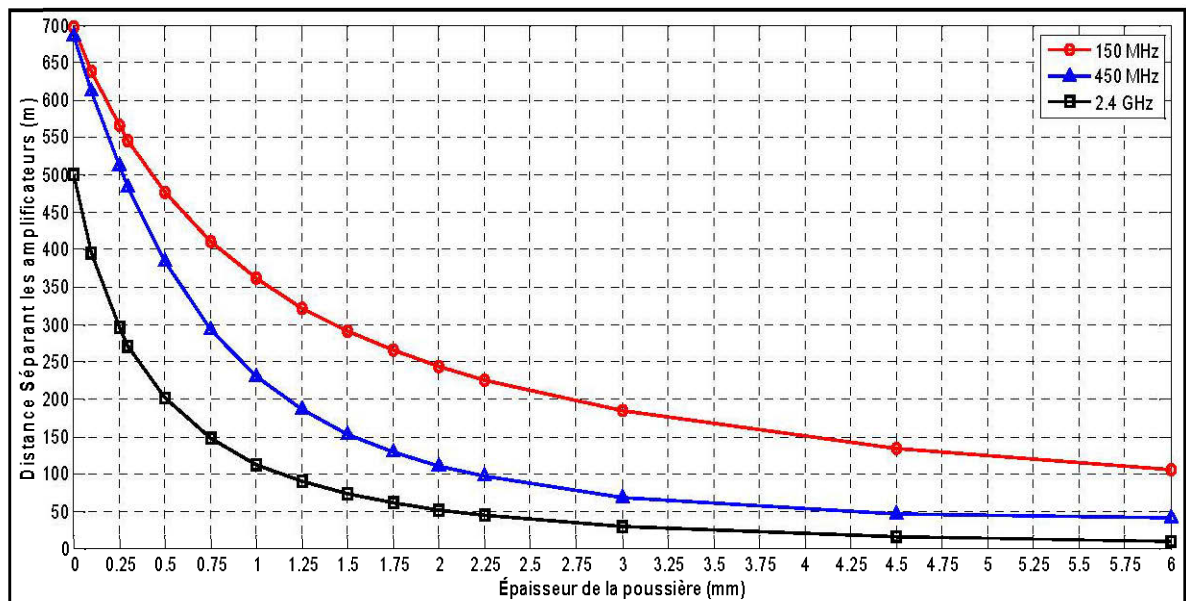


Figure 5.6: Distance séparant les amplificateurs

La figure 5.6 présente la distance séparant les amplificateurs en fonction de l'épaisseur de la poussière.

La courbe rouge montre les valeurs de ces distances en opérant à la fréquence 150 MHz, la courbe bleue montre celles opérant à la fréquence 450 MHz, et la courbe noire montre celles à 2.4 GHz.

Pour les fréquences 150 MHz et 450 MHz, la distance séparant deux amplificateurs consécutifs est de 700 m à l'épaisseur 0 mm. Elle diminue en augmentant l'épaisseur.

À une épaisseur de 0.5 mm, la distance diminue à 475 m pour la fréquence 150 MHz et à 380 m pour 450 MHz, tandis que cette distance arrive à 200 m pour 2.4 GHz.

Cette solution peut être utilisée dans le cas où la poussière n'est pas trop accumulée sur le câble. Si cette dernière dépasse une épaisseur de 0.5 mm, cette solution ne sera pas efficace et il sera nécessaire d'utiliser une autre alternative.

## **5.6 Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre la modélisation du câble rayonnant, de la poussière et l'analyse des résultats pour ce câble de type Trilogy afin d'étudier l'effet de la poussière sur ce dernier. Des propositions de solutions sont ainsi présentées.



## Chapitre 6

### CONCLUSION

Dans ce travail, on a étudié et quantifié le problème d'atténuation du signal qui affecte le câble rayonnant déployé sous terre dans la mine Westwood de l'entreprise IAMGold pour supporter l'application automine. Cette atténuation risque de compromettre une partie des services supportés par le réseau de communications de la mine.

Des tests et des mesures étaient nécessaires afin de déterminer les caractéristiques de propagation et de transmission du câble, permettant ainsi de résoudre ce problème. Pour atteindre cet objectif, nous avons procédé par expérimentation en réalisant des mesures et des tests à Westwood ainsi qu'au LRTCS. Nous avons aussi analysé les performances des câbles rayonnant en procédant par des simulations réalisées à l'aide du logiciel CST.

Les résultats obtenus des mesures menées à la mine Westwood ont montré les atténuations du câble rayonnant installé sous terre.

De même, les mesures menées au LRTCS, pour un câble rayonnant couvert de la poussière et un autre sans poussière, ont présenté la propagation du signal avec et sans poussière, ainsi que les paramètres  $S_{11}$  et  $S_{21}$  dans les deux cas.

D'autre part, des simulations pour le câble rayonnant ont été réalisées en utilisant le logiciel CST. Ces simulations ont montré aussi les paramètres  $S_{11}$  et  $S_{21}$  du signal dans le câble en fonction de l'épaisseur de la poussière.

L'analyse de ces mesures et ces simulations nous a permis d'identifier la cause principale du problème, et ensuite de proposer plusieurs solutions dans le but de réduire cet effet, et de constituer une étude utile qui peut servir comme référence dans les nouvelles installations de ce type des systèmes de communications.

## ANNEXE A

## Fiche Technique – Câble rayonnant Trilogy

**AirCell**<sup>®</sup>**TRANSLINE CABLE****Cable Specifications****50 Ohm Transline Cable 7/8"**

Description	Product Number
<b>Standard Cable</b>	
7/8", Black Polyethylene Jacket	AT078J50
<b>Fire Retardant Jacket</b>	
7/8", Low-Smoke, Non-Halogenated, Fire Retardant Jacket, IEC332-1	AT078FX50
7/8", Low-Smoke, Non-Halogenated, Fire Retardant Jacket, IEC332-1, IEC332-3C, UL 1685-12 (FT4/IEEE1202, NFPA-130)	AT078FV50
<b>Riser Rated Cable</b>	
7/8", Low-Smoke, Non-Halogenated, Fire Retardant Jacket, UL-1666, CMR, IEC332-1, IEC332-3C	AT078R50
<b>Physical Dimensions</b>	
Center Dia., in (mm)	0.383 (9.73)
Dia. Over Dielectric, in (mm)	0.968 (24.58)
Dia. Over Outer Conductor, in (mm)	1.012 (25.70)
Max. Dia. Over Jacket, in (mm)	1.142 (29.01)
Center Conductor	Solid Copper Tube
Outer Conductor	Solid Aluminum Tube
<b>Electrical Characteristics</b>	
Maximum Frequency, GHz	5
Peak Power Rating, KW	90
DC Res., Ohms/1000 ft (1000m)	
Center	0.47 (1.54)
Outer	0.20 (0.64)
DC Breakdown, kV	8.7
Capacitance, pF/ft (m)	22.3 (73.16)
Inductance, mH/ft (m)	0.056 (0.184)
Jacket Spark, kV RMS	8
VSWR typical, optimized bands	1.1
VSWR typical, broadband	1.3
Impedance, Ohms	50
Velocity of Propagation	91%
<b>Mechanical Characteristics</b>	
Min. Bend. Rad., in (mm) – Single	5 (127)
Min. Bend. Rad., in (mm) – Multiple	10 (254)
Cable Weight, lb/ft (kg/m)	0.29 (0.43)
Bending Moment, ft.lb (N.m)	26 (35.1)
Tensile Strength, lb (kg)	734 (333.6)
Flat Plate Crush, lb/in (kg/mm)	132 (2.36)
Number of Bends	20
Temperature, °F (°C)	
Recommended Install	-40 to 170 (-40 to 77)
Recommended Storage	-94 to 170 (-70 to 77)
Operating	-40 to 170 (-40 to 77)

Frequency MHz	Attenuation		Avg. Pwr. kW
	dB/100 ft	dB/100m	
30	0.17	0.56	11.60
50	0.23	0.75	8.95
88	0.31	1.02	6.73
100	0.33	1.08	6.31
108	0.34	1.12	6.07
150	0.40	1.31	5.13
174	0.44	1.44	4.76
200	0.47	1.54	4.44
300	0.59	1.94	3.61
400	0.69	2.26	3.11
450	0.73	2.40	2.93
500	0.78	2.56	2.78
512	0.79	2.59	2.74
800	0.86	2.82	2.53
700	0.94	3.08	2.33
800	1.01	3.31	2.18
824	1.03	3.38	2.15
894	1.08	3.54	2.06
960	1.12	3.67	1.98
1000	1.15	3.77	1.94
1250	1.30	4.27	1.73
1500	1.45	4.76	1.57
1800	1.61	5.28	1.55
1900	1.67	5.48	1.53
2000	1.72	5.64	1.35
2300	1.87	6.14	1.25
3000	2.20	7.22	1.09

**Standard Conditions:**

For attenuation, VSWR 1.0, ambient temperature 20°C (68°F)

For average power, VSWR 1.0, ambient Temperature 40°C (104°F), inner conductor Temperature 100°C (212°F), no solar loading

**Product Certifications:**

Transline cables and connectors are certified to exceed the strict Verizon Wireless PIM [Passive Inter Modulation] and Motorola 25kW PIP [Peak Instantaneous Power] specifications.

## ANNEXE B

Elia M., Hakem N., Ailas M., "Dust effects on leaky feeder cable in an underground mine environment", présenté le 12 Juillet 2013 pour publication dans *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI National Radio Science Meeting*, Orlando, Florida, USA.

# Dust effects on Leaky Feeder Cable in an underground mine environment

Mohamad Elia, Nadir Hakem, Mohamed Aïlas

Laboratoire de Recherche Télébec en Communications Souterraines

Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Val D'or, Québec, Canada

Mohamad.elia@uqat.ca

**Abstract** – Leaky Feeder based network is widely used for underground mine communications to transmit voice, data and video signals. In this paper we present the dust's effects on leaky feeder signal propagation which is produced from drilling operations and vehicles in the underground mine. Simulations were done to study the signal propagation behavior in a leaky feeder according to scattering parameters:  $S_{11}$  and  $S_{21}$  in presence of dust. Results obtained show the dust's influence on the communication cable, and a solution to this problem is suggested.

**Keywords** – Leaky feeder, underground mine, CST, VHF, UHF, mine dust.

## I. INTRODUCTION

Generally, work in the mines and especially in deep places is dangerous, unpleasant and expensive. Hence, the necessity for underground communications systems for different applications is primordial. Most mines use the Leaky Feeder cable (LF) or radiating cable for their different communications. These cables transmit and receive radio signals through the holes or slots existing in their outer shield.

LF cables are easy to install and to repair. They are widely used in underground mines, since both voice and data applications, as well as other applications, can operate on the same cable reliably. Because the LF cables are able to transfer power and RF signals, these technologies are considered as particular case of line power communication [1]. Many works have been done on LFs [2][3][4][5][6] to study its characteristics and principles.

Both bands VHF and UHF frequencies are used in mine applications. In our case, VHF band (around 150 MHz) is used for data transmission, while UHF band (around 450 MHz) is for voice application. Also, it is planned to use the frequency 2.4 GHz to support Wifi network.

The type of LF cable is Trilogy Aircell 7/8 inch. This cable is considered one of the best cables regarding the attenuation, coupling loss, cost and ease of installation. For 100 m length, it presents the following attenuations values 1.31 dB, 2.56 dB and 7.66 dB at frequencies 150 MHz, 450 MHz and 2.4 GHz respectively [7].

However, the real values observed in the underground mine where is installed this cable are larger than theoretical values. Simulations are done to investigate the causes of this attenuation and to suggest a suitable solution.

The paper is organized as follows. After this introduction, a second section exposes the encountered problem. In the third section we present simulations and results, and we wrap up with a conclusion in the fourth section.

## II. ENCOUNTERED PROBLEM

Reliable communication is essential for underground mines from several aspects including safety and productivity [1]. For this purpose, a communication system based on the LF was installed in the Westwood mine located about 40 km east of Rouyn-Noranda in northwestern Quebec, Canada. During the system operation, a large attenuation in the signal was observed. An accumulation of dust on the wire in the mine ramp is observed.

The chemical composition of this dust is known as a mix of carbon element, silica and pyrite. Simulations are done to study its influence on the signal by studying  $S_{11}$  and  $S_{21}$  parameters which show the signal propagation and signal attenuation over the cable.

## III. SIMULATIONS AND RESULTS

Using CST (Computer Simulation Technology), we simulate a structure of 1 meter of the LF cable

installed in the mine by respecting all its properties (Fig1). In order to reproduce the same mine environment, we added the same dust elements on the simulated structure. Many dust thickness was simulated at the following frequencies: 150 MHz, 450 MHz and 2.4 GHz. Amplitude values of  $S_{11}$  and  $S_{21}$  parameters are obtained. The results are shown in the Fig. 2 and Fig 3.

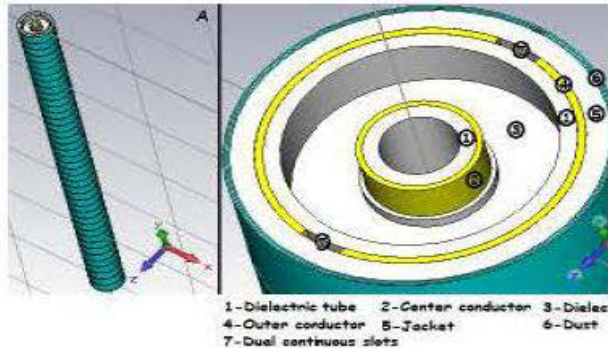


Figure 1. LF structure (A: General view, B: Detailed view)

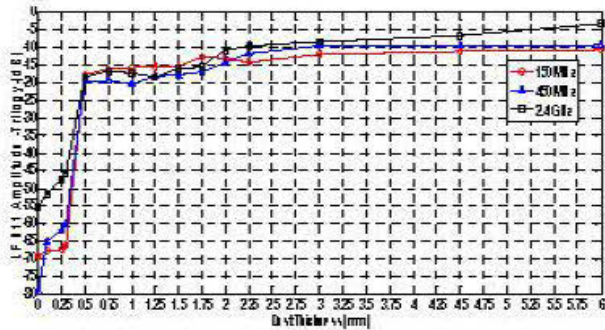


Figure 2. LF  $S_{11}$  Amplitude

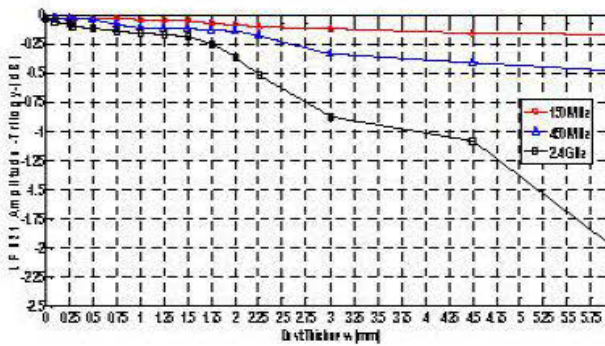


Figure 3. LF  $S_{21}$  Amplitude

Figure 2 shows the  $S_{11}$  amplitude in function of dust thickness. The red curve presents the  $S_{11}$  amplitude while operating at 150MHz, the blue one at

450 MHz and the black one when operating at 2.4 GHz. At dust thickness equal to 0 mm,  $S_{11}$  values remain normal and acceptable at all frequencies. While increasing the dust thickness,  $S_{11}$  values decrease until getting close to -10 dB for both 150MHz and 450MHz when the dust thickness attains 6mm, whereas at 2.4 GHz it reaches about -4 dB.

Nevertheless, when dust thickness is equal and greater than 0.5mm,  $S_{11}$  amplitude values obtained are unacceptable and this presents a real problem in terms of signal propagation. Measurements are conducted in the mine using VNA (V ector Network Analyser) to determine the  $S_{11}$  cable parameter. Obtained results are consistent to the simulations.

The results in Fig3 show the  $S_{21}$  amplitude in function of dust thickness. Likewise, the red curve presents the  $S_{21}$  amplitude while operating at 150MHz, the blue one at 450 MHz and the black one when operating at 2.4 GHz. At dust thickness equal to 0 mm,  $S_{21}$  values remain normal and acceptable at all frequencies. The dust thickness rise increases  $S_{21}$  values to reach very high attenuations. Even so, obtained values are unacceptable when operating at a distance of 1 meter. In addition, we can note that while increasing frequency attenuations increase.

This encountered problem seeks us to find a solution to reduce the effect of signal attenuation, since the cable is already installed in the architecture of the underground network. Existing amplifiers can be used in this case, but the challenge lies in determining distance between existence amplifiers all along the cable without suggesting a lot of variations in the existing infrastructure. These amplifiers present a gain of 25 dB. A mathematical relation between the obtained attenuations values over 1 m and the dust thickness the corresponding attenuation can be calculated, as a result we calculated the optimal distance separating amplifiers presenting a gain of 25 dB. These distances are presented in the fig.4 as shown below.

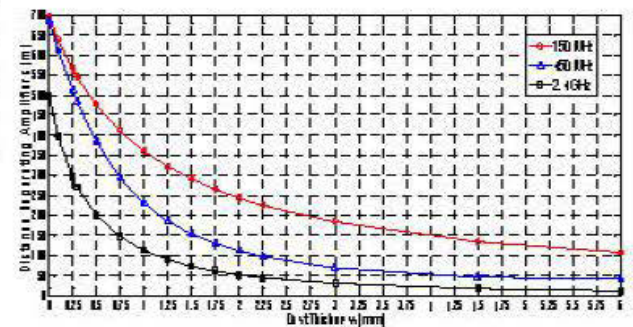


Figure 4. Distance separating amplifiers

Figure 4 presents the distance separating amplifiers (m) suggested by this solution in function of the dust thickness (mm). This work is done on different frequencies as listed in the previous text. As we can notice distances between amplifiers should decrease, when the dust thickness increases. Besides, while operating at a high frequency the distances decrease more than operating in low ones.

#### IV. CONCLUSION

In this work we presented a real encountered problem in a functional mine. Signal attenuation affects the quality and the quantity of transmitted information. So, we studied the causes behind this problem and solutions to solve it. Simulations and results show the influence of the accumulation of a dust on the LF cable used for communication in this underground mine. Thus, a solution based on determining distance separating existing amplifiers is proposed. This work can be expanded by studying different types of cables allowing choosing the best type in term of attenuation in similar environment.

#### REFERENCES

- [1] Chehri, H. Mouftah, "Radio Channel Characterization Through Leaky Feeder for Different Frequency Bands" 2010 IEEE 21st International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications.
- [2] J.B.L. Foot, "Transmission through Tunnels", *Wireless World*, vol. 56, pp. 456-8, Dec. 1950.
- [3] D.J.R. Martin, "Radio Communication in Mines and Tunnels", *Electronics letters*, vol. 6, No. 18, pp.563-4, 3rd Sept. 1970.
- [4] D.J.R. Martin, "A General Study on The LF Principle", *Radio and Electronic Engineer*, vol. 45, No. 5, pp. 205-14, May 1975.
- [5] B.L. Critchley, Q.V. Davis, "Some characteristics of a LF in a Tunnel", *Radio and Electronic Engineer*, vol.50, No.9, pp.474-478, Sept 1980.
- [6] D.J. Cree, L.J. Giles, "Practical Performance of Radiating Cables", *ibid.*, pp.215-23.
- [7] [www.trilogycoax.com](http://www.trilogycoax.com)

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Kheireddine A. "Intelligence Artificielle Appliquée aux télécommunications", Colloque international sur l'intelligence économique, UFC, 14-16 juin 2008, Alger. Disponible en ligne : <http://www.veille.ma/IMG/PDF/gouvernance-ic-actes/INTELLIGENCE-ARTIFICIELLE-Abdelkrim-Kheireddine.pdf>
- [2] Chehri A., Fortier P., Tardif P.M. "Frequency Domain Analysis of UWB Channel Propagation in Underground Mines", IEEE VTC'06-fall, September 25-28, Montreal, Canada, 2006, pp. 1-5.
- [3] "Technical planning guide for fixed broadband wireless internet access", Loma Scientific International, Disponible en ligne: [www.lomasci.com](http://www.lomasci.com)
- [4] Otmame S., "Téléopération, télérobotique et Internet : Techniques & applications", Université d'Evry Val d'Essonne CNRS-FR 2873, Disponible en ligne: <http://lsc.univ-evry.fr/~otmane>
- [5] VERTUT J., et COIFFET P., "Les Robots: Téléopération", v. 3A, et 3B, Hermès, 1984.
- [6] "Règles Bourses en Milieu de Pratique BMP Innovation", Disponible en ligne: [www.fqrnt.gouv.qc.ca](http://www.fqrnt.gouv.qc.ca)
- [7] Ndoh M., "Modélisation de la propagation des ondes électromagnétiques dans un environnement minier", Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada, 2004.
- [8] Moutairou M., "Application de réseaux mesh dans un milieu confiné", Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada, 2009.
- [9] Corbeil P., Larivière R., Montreuil P., "A Single Infrastructure Solution for Conventional Two-Way Radios and High Performances IP Communication In Underground Mine", IWWCUCA proceedings, Val d'Or, Canada, June 6-7 2005. pp. 117-121.
- [10] Lucidarme T., "Principe de radiocommunication de troisième génération", Édition Vuibert, Paris, 2002.
- [11] Bandyopadhyay LK, Chaulya SK, Kumar S, "A proposed wireless communication system for underground mines". Proceedings of the International Conference on



- Mineral Industry, Issues on Economics, Environment and Technology. Mining, Geological and Metallurgical Institute of India, Kolkata, India, 2002, pp. 317–324.
- [12] Casad J., "Sams Teach Yourself TCP/IP in 24 Hours", 2nd Edition. Sams Publishing Co., Indianapolis, 2001.
- [13] Fisahn S., Camp M., Garbe H., "Transient emission behavior of leaky section cables for wireless applications". Proceedings of International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Chicago, USA, Vol. 2, August 2005, pp. 477–482.
- [14] Kohler, Jeffery, "Monitoring, control, and communications". Chapter 12.6 in Hartmann HL (ed.), Mining Engineering Handbook, 2nd Edition, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Denver, 1999.
- [15] Disponible en ligne: [www.fibersystems.com/products](http://www.fibersystems.com/products)
- [16] Bandyopadhyay L.K., Chaulya S.K., Mishra P.K., "Wireless Communication in Underground Mines RFID-Based Sensor Networking", 2010.
- [17] Disponible en ligne :  
[http://hal.archivesouvertes.fr/docs/00/29/11/77/PDF/these\\_kb.pdf](http://hal.archivesouvertes.fr/docs/00/29/11/77/PDF/these_kb.pdf)
- [18] Disponible en ligne: <http://michaud.chez-alice.fr/principe.html>
- [19] Disponible en ligne: [www.becker-mining.com](http://www.becker-mining.com)
- [20] Disponible en ligne:  
<http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=11442>
- [21] Gressier-Soudan E., "Réseaux et QoS", Ingénierie des réseaux d'entreprise, CNAM-CEDRIC, Décembre 1999.
- [22] Abdelkader T., "QoS Routing in Wireless Mesh Networks", Mémoire de maîtrise, Université Waterloo, Ontario, Canada, 2008.
- [23] Akyildiz I. F., Wang X., "A Survey on Wireless Mesh Networks", IEEE Radio Communications, September 2005, pp.525-530.
- [24] Akyildiz I. F., Wang X., Wang W., "Wireless Mesh Networks: A Survey", Computer Networks 47, 2005, pp.445-487.
- [25] Yick J., Mukherjee B., Ghosal D., "Wireless sensor network survey", Computer Networks, vol. 52, no. 12, 2008, pp. 2292-2330.
- [26] Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E., "Wireless sensor networks: a survey", Computer Networks, vol. 38, no.4, 2002, pp.393-422.

- [27] Culler D., Estrin D., Srivastava M., "Guest editors' introduction: Overview of sensor networks", IEEE Computer, vol. 37, no. 8, August 2004, pp.41-49.
- [28] Boano C. A., Brown J., He Z., Roedig U., Voigt T., "Low-Power Radio Communication in Industrial Outdoor Deployments : The Impact of Weather Conditions and ATEX-Compliance in Sensor Applications, Experimentation, and Logistics", vol. 29 of Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 159–176.
- [29] Dargie W., Poellabauer C., "Fundamentals of Wireless Sensor Networks Theory and Practice", Wiley, 1<sup>st</sup> edition, August 2010.
- [30] Romer K., Mattern F., "The design space of wireless sensor networks", IEEE Wireless Communications, Vol.11, No.6, Dec 2006, pp. 54-61.
- [31] "Connection Internet par CATV", Disponible en ligne : [www.doc-etudiant.fr](http://www.doc-etudiant.fr)
- [32] "DOCSIS, Cable's position in the broadband market", BCI, Disponible en ligne: [www.bci.eu.com](http://www.bci.eu.com)
- [33] "Data-Over-Cable Service Interface Specifications DOCSIS 3.0, MAC and Upper Layer Protocols Interface Specification", CM-SP-MULPIv3.0-I22-130808, Disponible en ligne : <http://www.cablelabs.com>
- [34] "Mini-guide du câble rayonnant", Nexans Suisse SA, Cortaillod, November 2007, V1.2.
- [35] "Leaky Feeder Cable", Solwise Ltd, Disponible en ligne: [www.solwise.co.uk](http://www.solwise.co.uk)
- [36] Aniss H., Tardif P. M., Ouedraogo R., Fortier P., "Communications Network for Underground Mines based on the IEEE 802.11 and DOCSIS Standards", VTC04-Fall, vol. 5, September 2004, pp. 3605-3609.
- [37] Baiden G., "Combining Teleoperation with Vehicle Guidance for Improving LHD Productivity an Inco Limited", CIM Bulletin, vol. 87, no. 981, June 1994, pp. 36-39.
- [38] Boutin M., "Statistical modelling of an underground mine propagation channel", Mémoire de maîtrise, INRS-EMT, Montreal, Canada, 2004.
- [39] Knights P., Mucoz J., "Simulation of Single Operator - Multiple Vehicle Underground Haulage Systems", Proc. of the First International Symposium on

- Mine Simulation Via the Internet, A. A. Balkema, ISBN 90 5410 863 0, February 1997, p.100.
- [40] Konyukh V., "Remote Controlled LHD machine as the Medium Source for Mine Planning", Proc. of the Fourth International Conference of Mining Techniques 2005", Poland: Krakow, Sept. 2005, pp.7-13.
- [41] Konyukh V., "Strategy of Automation for Underground Mining", International Forum on Strategic Technology, 2007, pp. 615-618.
- [42] Larsson J., Broxvall M., Saffiotti A., "An Evaluation of Local Autonomy Applied to Teleoperated Vehicles in Underground Mines", 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation Anchorage Convention District May 2010, Alaska, USA, pp. 1745-1752.
- [43] Chopra N., Berestesky P., Spong M. W., "Bilateral Teleoperation Over Unreliable Communication Networks", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 16, No. 2, March 2008, pp. 304-313.
- [44] Moutairou M., Aniss H., Delisle G. Y., Misson M. "Statistical analysis of 802.11b wireless link behaviour in mining environment", International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, ICEAA Sept 2007, pp. 391-394.
- [45] Wang Q.F., Zhang S., Yang Y., Tang L., "The Application of Wireless Sensor Networks in Coal Mine", International Conference on Information, Communications and Signal Processing, ICICS 2009, pp. 1-4.
- [46] Zaarour N., "Modélisation d'un canal minier Ultra Large Bande (UWB) en utilisant les réseaux de neurones artificiels RBF", Mémoire de maîtrise, UQAT, Canada, 2013.
- [47] Djadel M., "Underground mine channel characterization at 2.45 and 18 GHz, Master thesis, INRS-EMT, Montreal, Canada, April 2002.
- [48] Nerguizian C., "Radiolocalization in an underground mine environment", Ph.D thesis, INRSEMT, 2003.
- [49] Kamenetsky M., Unbehaun M., "Coverage Planning for Outdoor Wireless LAN Systems", 2002 Int. Zurich Seminar on Broadband Comm., Feb. 2002, pp. 49-1 - 49-6.

- [50] Lee Y., Kim K., Choi Y., "Optimization of AP Placement and Channel Assignment in Wireless LANs", 27<sup>th</sup> Annual IEEE Conference on Local Computer Networks LCN 2002, pp. 831-836.
- [51] Hwang Y., Zhang Y.P., Kouyoumjian G., "Ray-Optical prediction of radio-wave propagation characteristics in tunnel environments – Part 1", IEEE Trans. Ant. Propag., Vol. 46, no. 9, Sept. 1998, pp. 1328-1336.
- [52] Ndoh M., Delisle G.Y., Le R., "A novel approach to propagation prediction in a confined and diffracting media", Int. J. Num. Mod., Elect. Net., Dev. and Fields, Vol. 16, No.6, Nov. 2003, pp. 535-555.
- [53] Benzakour A., Affes S., Despins C., Tardif P.M., "Wideband measurements of channel characteristics at 2.4 and 5.8 GHz in underground mining environments", VTC 2004-Fall, vol. 5, Sept. 2004, pp. 3595-3599.
- [54] Runciman N., "A Preliminary Study of Trammig Speeds in Multiple Tele-operated Load-Haul-Dump Scenarios Using QUEST®", 2001 Winter Simulation Conference, vol. 2, Dec. 2001, pp. 1084-1089.
- [55] Konyukh V., "Robotics for Mining", Mineral Resources Engineering, vol. 11, no. 1, 2002, pp.73-88.
- [56] Elia M., Hakem N., Ailas M., "Dust effects on leaky feeder cable in an underground mine environment", Présenté le 12 Juillet 2013 pour publication dans 2013 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI National Radio Science Meeting, Orlando, Florida, USA.
- [57] Rissafi Y., "Caractérisation d'un canal minier souterrain ultra large bande (3Ghz-10Ghz)", Mémoire de maîtrise, Université du Québec en Outaouais, Québec, Canada, Juin 2007.
- [58] Green R., "L'instrumentation RF expliquée aux nuls", Keithley Instruments, Mesures 791, Janvier 2007, Disponible en ligne : [www.mesures.com](http://www.mesures.com)
- [59] "Principes fondamentaux de l'analyse de réseaux", National Instruments, Novembre 2012, Disponible en ligne : [www.ni.com](http://www.ni.com)
- [60] "CST Microwave Studio, Workflow & Solver Overview", 2010, Disponible en ligne: <http://eee.guc.edu.eg/>
- [61] "Aircell Trilogy Radiating Cable", Disponible en ligne : [www.trilogycoax.com](http://www.trilogycoax.com)
- [62] "Varis Leaky Feeder Cable", Disponible en ligne : [www.varismine.com](http://www.varismine.com)

- [63] Nkakanou B., "Caractérisation d'un canal ultra large bande (UWB) en milieu confiné souterrain", Mémoire de maîtrise, UQAT, Québec, Canada, Octobre 2013.
- [64] Austin J., Ditmar W.P.A., Lam W. K., Vilar E., Wan K. W., "A spread spectrum communications channel sounder", IEEE Transactions on Communications, vol. 45, no. 7, Jul 1997, pp. 840-847.
- [65] "Le blindage électromagnétique", disponible en ligne : [www.jacquesdubois.com/pdf/catalogue.pdf](http://www.jacquesdubois.com/pdf/catalogue.pdf)
- [66] Disponible en ligne : [www.simplehelp.net](http://www.simplehelp.net)