



BIBLIOTHÈQUE

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

Mise en garde

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

Warning

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

Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

COMMUNICATIONS ASSISTÉES PAR RIS POUR L'ENVIRONNEMENT MINIER
SOUTERRAIN

Mémoire
présenté
comme exigence partielle
de la Maîtrise en ingénierie

Par
Aurélien Surier

Août 2025

© Aurélien Surier, 2025

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude au Docteur Nahi Kandil et au Docteur Nadir Hakem, mes directeurs de mémoire, pour leur accompagnement constant, leur disponibilité, leurs conseils précieux et leurs encouragements tout au long de ce travail.

J'aimerais exprimer ma plus profonde reconnaissance à Monsieur Michel Misson, dont le soutien constant, depuis plus d'une décennie, a été déterminant et sans lequel ce parcours n'aurait pu débuter. J'associe également ma gratitude à l'équipe du LIMOS, qui m'a offert l'opportunité d'une première expérience enrichissante dans le domaine de la recherche.

Je remercie également ma famille et mes amis, dont l'écoute, la patience et la bienveillance m'ont apporté un grand réconfort durant le programme. Merci à Zaka et son fameux biryani, à Fabrice pour nos nombreux défis, à Hussam et Clément pour leur amitié et leur soutien, ainsi qu'à Mohammed Nasr Eddine et Issam pour nos discussions tardives. Je tiens particulièrement à remercier Aurélie MT pour son amitié précieuse et inspirante. Aurélie, tu m'as aidé à élargir ma vision des choses et tu as joué un rôle essentiel dans mon retour à un mode de vie et une spiritualité qui me ressemblent.

J'adresse également mes sincères remerciements à toutes celles et tous ceux que je n'ai pas explicitement mentionnés, mais qui m'ont soutenu de près ou de loin, comme Martin, Aurélie et Catherine de la SIUQ pour leur confiance. J'exprime aussi ma gratitude à Madame Denise Lacasse, qui a su faire preuve de patience et de compréhension face à mes retards administratifs tout au long du programme — et probablement encore au-delà.

Enfin, je souhaite présenter mes excuses à mes proches, amis, collègues et connaissances pour mon absence parfois marquée par le silence, un manque de réponses ou le fait de ne pas avoir pris de nouvelles. J'apprécie profondément votre patience et votre compréhension durant cette période.

À toutes et à tous, merci.

Que Dieu nous protège et nous accompagne dans chacun de nos projets.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	II
TABLE DES MATIÈRES	IV
LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES SIGLES ET DES ABRÉVIATIONS.....	XII
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS	XIV
RÉSUMÉ	XV
INTRODUCTION	16
1. LA PROBLÉMATIQUE PROPAGATION EN MILIEU MINIER SOUTERRAIN.....	21
1.1 Description du milieu souterrain	21
1.2 Problématique de propagation dans le milieu souterrain	22
1.2.1 Atténuation due à la topologie	23
1.2.2 Effet d'ombre lié au confinement.....	24
1.2.3 Conditions environnementales.....	25
1.2.4 Multichemin important.....	25
1.3 Stratégies d'atténuation des perturbations.....	28
1.4 Exemple de déploiement de RIS dans un environnement minier souterrain	32
2. CADRE SCIENTIFIQUE ET ÉTAT DE L'ART	34
2.1 Paradigme de télécommunication traditionnel	34
2.2 Les RIS	37
2.2.1 La cellule unitaire.....	40
2.2.1.1. Structure.....	40
2.2.1.2. Coefficient de réflexion	41
2.2.2 Configuration des RIS.....	42
2.2.2.1. Moyens de contrôle	42
2.2.2.2. Intelligence et contrôle.....	43
2.3 Paradigme de télécommunication avec les RIS.....	47
2.3.1 Modélisation du canal de propagation avec les RIS.....	49
2.3.2 Considérations de déploiement et contraintes associées.....	50

2.4	La modélisation numérique d'un système de télécommunication	51
2.4.1	Évaluation du canal de propagation.....	51
2.4.2	Principe de superposition	52
2.5	Modélisation des RIS	53
3.	MÉTHODOLOGIE	57
3.1	Introduction	57
3.2	Extension de la méthode hybride pour intégrer le RIS en mode transmission 58	
3.2.1	Conception et évaluation des RIS en onde pleine.....	59
3.2.1.1.	Conception des sources RF.....	59
3.2.1.2.	Validation de l'illumination des RIS par les deux sources RF.....	62
3.2.2	Évaluation du système complet en tracé de rayon.....	64
3.3	Création, simulation des cellules unitaires et simulation du RIS complet .	68
3.4	Modélisation de l'environnement de propagation.....	75
3.4.1	Choix des paramètres de simulation pour le lancer de rayons	78
3.5	Méthode de déploiement des RIS pour la suppression des chemins destructifs.....	79
3.6	Méthode de déploiement des RIS dans un environnement confiné	80
3.7	Déploiement des RIS dans des scénarios Sionna RT	81
3.8	Système de mesure portable du WiFi et de la bande passante applicative 84	
3.9	Critères d'évaluation.....	86
3.10	Outils utilisés	87
4.	RÉSULTATS	92
4.1	Évaluation de la modélisation de l'environnement minier.....	92
4.2	Évaluation des scénarios.....	95
4.2.1	Scénario 1 : couverture ad hoc dans une intersection de tunnel NLOS à 5.8 GHz 95	
4.2.2	Scénario 2 : correction de l'effet d'ombre dans un tunnel rectiligne ..	100
4.2.3	Scénario 3 : amélioration de la couverture et de la perte en chemin dans un environnement NLOS à plusieurs couloirs	108

4.2.4	Scénario 4 : extension et amélioration de la couverture d'un réseau infrastructure dans un tunnel rectiligne en LOS	117
4.2.5	Scenario 5 : extension de la couverture d'un réseau d'infrastructure dans un tunnel courbe et NLOS	122
4.2.5.1.	Résultats expérimentaux	123
4.2.5.2.	Simulation.....	126
CONCLUSION.....		131
ANNEXE A – DONNÉES ET SCRIPTS		135
APPENDICE A – LISTE DES PUBLICATIONS.....		136
GLOSSAIRE.....		138
LISTE DE RÉFÉRENCES.....		139

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Phénomènes de propagations rencontrés dans le canal.	21
Figure 2 Topologie typique d'une mine, exemple d'une mine de fer en Chine.	22
Figure 3 Exemple de carte de connectivité pour les différents milieux rencontrés dans une mine souterraine.	24
Figure 4 Effet d'ombre dû au blocage d'un équipement minier et au confinement induit par les tunnels.	25
Figure 5 Investigation théorique d'un canal de propagation dans une mine de charbon.	27
Figure 6 Illustration de l'effet du multichemin sur la dégradation de la forme d'onde reçue.	28
Figure 7 Détails de l'utilisation du câble rayonnant.	29
Figure 8 Exemple de déploiement de répéteurs traditionnels pour couvrir des tunnels secondaires. Les RIS peuvent être des candidats pour remplacer ou assister les répéteurs.	30
Figure 9 Principe de l'adaptation du faisceau pour configurer la distance de couverture.	31
Figure 10 Principe de la formation de faisceau adaptatif.	31
Figure 11 Exemple de déploiement de nœuds supplémentaires pour améliorer la couverture (a) référence (b) nœuds déployés à proximité des tunnels secondaires.	32
Figure 12 Exemple de déploiement de RIS dans un environnement minier souterrain.	33
Figure 13 Canaux SISO, SIMO, MISO et MIMO.	35
Figure 14 Illustration du système MIMO correspondant à la matrice H.	36
Figure 15 Illustration de la configuration de l'angle de réflexion (« l'anomalie ») d'un RIS par rapport à la réflexion d'un réflecteur régulier.	37
Figure 16 Illustration des deux modes d'opération (a) réfléchissant et (b) transmettant.	38
Figure 17 Fonctions élémentaires d'un RIS.	38
Figure 18 Illustration des couches composant une cellule unitaire.	41

Figure 19 Exemple de configuration en mode lentille de focalisation pour une surface avec une quantification de 1 bit.....	44
Figure 20 Exemple de configuration en mode réflecteur pour une surface avec une quantification de (a) 1 bit et (b) 2 bits.	45
Figure 21 (a) Distribution de phase prédite (d) et diagramme de rayonnement issu de la configuration de la surface pour la formation de cinq faisceaux aux directions imposées.	47
Figure 22 Chaîne de communication complète avec la création d'un lien LOS virtuel par le RIS dans un scénario avec un lien direct en ligne de vue bloqué entre l'émetteur et le récepteur.....	48
Figure 23 Chaîne de communication complète avec la création d'un lien LOS virtuel par le RIS dans un scénario avec un lien direct en ligne de vue bloqué entre l'émetteur et le récepteur.....	49
Figure 24 Diagramme de flux présentant les étapes de déroulement de la méthode.	59
Figure 25 Modèle d'antenne cornet utilisé pour illuminer les RIS.	60
Figure 26 Diagramme de rayonnement de l'antenne cornet.....	61
Figure 27 Résultat de simulation de l'antenne dipôle.	62
Figure 28 Diagramme de rayonnement lorsque le RIS est illuminé par l'antenne cornet directionnelle (a) détail de la coupe pour $\varphi=0^\circ$, (b) 3D ; et par l'antenne dipôle omnidirectionnelle (a) détail de la coupe pour $\varphi=0^\circ$, (d) 3D.	63
Figure 29 Exemple d'échantillonnage de l'intensité du signal reçu sur la surface d'un RIS (en V/m), permettant de calculer (8).....	66
Figure 30 Diagramme de rayonnement simplifié du prototype LATYS FOCUS ($\varphi=0^\circ$) réalisé sous Aman (suite Altair Feko).....	68
Figure 31 Flux de travail pour la simulation d'une configuration d'un RIS avec une conception personnalisée de cellule unitaire simulée en onde-pleine.	70
Figure 32 Paramètres S_{11} simulés pour les deux états de la cellule unitaire (vert : état 1, rouge : état 0).	72
Figure 33 Interface graphique réalisée sous CST, qui permet de sélectionner les paramètres au lancement de la macro du générateur de la matrice.....	73

Figure 34 Illustration de la campagne de scan avec le téléphone comme scanneur.	76
Figure 35 Vues du modèle 3D complet, après avoir assemblé les sections scannées.	77
Figure 36 Modèle simplifié et simplifié avec application de la rugosité aléatoire sur les parois.....	78
Figure 37	80
Figure 38 Flux de travail sous Sionna RT.	83
Figure 39 Schéma logique du système de mesure portable.....	85
Figure 40 Points d'évaluations (carrés rouges) et position du point d'accès (ronds à droite).	92
Figure 41 Comparaison de la puissance reçue sur la trajectoire.	94
Figure 42 Illustration de l'environnement du scénario, deux véhicules (Site 1 et 2) se rapprochant tous deux de l'intersection.....	95
Figure 43 Illustration d'une sélection de chemins de propagation calculés pour différents points dans la zone cible.	97
Figure 44 Sélection des positions candidates pour l'installation de RIS.	98
Figure 45 Évaluation de la capacité du lien entre le site 1 et 2 (a) avant et (b) après le placement du RIS en mode réflecteur.....	98
Figure 46 Brouillage dans l'intersection des tunnels.....	99
Figure 47 Amélioration du SINR dans la zone d'intersection.....	99
Figure 48 Résultat de l'isolation du site 1 par un RIS absorbant.	100
Figure 49 Chargeuse comme élément bloqueur dans un tunnel de la mine Lamaque à Val-d'Or, et le plafonnier qui sert de zone utile [56].	102
Figure 50 Illustration des trois déploiements de RIS : (a) mural au milieu du tunnel, (b) mural et (c) transverse plus éloignés du transmetteur.....	103
Figure 51 Comparaison de la perte en chemin pour les 6 positions de camion, pour chacun des sites de déploiement de RIS.	104
Figure 52 Performances pour chaque site de positionnement de RIS.....	105
Figure 53 Perte en chemin moyenne simulée pour les 4 positions du camion.	106

Figure 54 Perte en chemin moyenne pour chacune des positions (C1, C2), pour chacun des déploiements de RIS.....	107
Figure 55 Illustration de la problématique à plusieurs couloirs NLOS.....	109
Figure 56 Perte en chemin simulée pour une position du camion dans un scénario NLOS à plusieurs couloirs.....	110
Figure 57 Perte en chemin simulée avec contribution de RIS dans un scénario NLOS à plusieurs couloirs.....	111
Figure 58 Vue 3D du déploiement du système dans l'environnement.....	112
Figure 59 Évolution du taux de couverture et de la perte en chemin avec et sans RIS 1, 2 et 3.....	114
Figure 60 Sélection de la couverture d'un tunnel seulement, par l'activation du RIS transverse 4 associé au tunnel 3.....	115
Figure 61 Évaluation des critères dans le tunnel 3 pour toutes les positions du camion selon le chainage de 1 contre 3 RIS transverses.....	116
Figure 62 Photographie du déploiement d'un RIS à proximité du point d'accès pour booster son signal dans une direction donnée.....	118
Figure 63 Objectifs du déploiement d'un RIS à proximité du point d'accès pour booster son signal.....	119
Figure 64 Comparaison du RSSI avec et sans RIS dans la section du tunnel en LOS.....	120
Figure 65 Comparaison du (a) MCS et (b) débit utilisateur avec et sans RIS.....	120
Figure 66 Comparaison de la couverture WiFi (a) de référence (b) avec chainage de RIS pour la section de tunnel OLOS.....	122
Figure 67 Schéma du déploiement de RIS pour courber le signal vers un tunnel orthogonal non couvert.....	123
Figure 68 Comparaison de la couverture WiFi (a) de référence (b) avec chainage de RIS pour couvrir le tunnel orthogonal.....	125
Figure 69 Simulation de la couverture du point d'accès.....	127
Figure 70 Comparaison de la couverture WiFi (a) mesurée (b) simulée.....	129
Figure 71 RSSI expérimental et simulé d'une trajectoire sur la section d'intérêt....	130

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Description des fonctions élémentaires d'un RIS	38
Tableau 2 Principales méthodes de contrôle de la réponse de la cellule unitaire	42
Tableau 3 Capacités de logiciels RF à modéliser les RIS.	55
Tableau 4 Définition des paramètres électriques de l'absorbant "parfait".	65
Tableau 5 Propriétés diélectriques du PLA utilisées pour la simulation.	71
Tableau 6 Simulation des trois configurations de RIS.	74
Tableau 7 Propriétés importantes du RIS sur Sionna RT.	84
Tableau 8 Liste des programmes du système de mesure et utilisation.	85
Tableau 9 Détails des critères d'évaluation.	87
Tableau 10 Liste des outils utilisés par tâche.	87
Tableau 11 Méthodes de simulation de propagation utilisées par WinProp.	88
Tableau 12 Analyse comparative des fonctionnalités offertes par Altair WinProp et Sionna RT.	89
Tableau 13 Paramètres de simulation RT pour l'évaluation de la modélisation de l'environnement minier.	93
Tableau 14 Comparaison des métriques pour les différentes modélisations de l'environnement 3D.	94
Tableau 15 Configuration des deux types de RIS.	112
Tableau 16 Configuration des RIS dynamiques selon la zone d'amélioration ciblée.	113
Tableau 17 Paramètres de simulation pour le scénario 5.	126
Tableau 18 Utilisation des RIS pour corriger certaines perturbations du canal.	132

LISTE DES SIGLES ET DES ABRÉVIATIONS

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
EM	Electromagnetic
FDTD	Finite Difference Time Domain (différences finies dans le domaine temporel)
FEM	Finite Element Method (méthode des éléments finis)
GPU	Graphical Processing Unit : processeur graphique
ISI	Intersymbol Interference (interférence intersymbole)
ITU	International Telecommunications Union (Union internationale des télécommunications)
LOS	Line-of-Sight (ligne de vue)
LTE	Long Term Evolution
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIMO	Multiple Input, Multiple Output
MISO	Multiple Input, Single Output
OBLOS	Obstructed Line Of Sight (Ligne de visée obstruée)
PEC	Perfect Electrical Conductor (Conducteur Electrique Parfait)
PL	Path Loss (perte en chemin)
PLA	Polylactic Acid
PLY	Polygon File Format
RCS	Radar Cross Section (Surface équivalente radar)
RF	Radiofrequency
RIS	Reconfigurable Intelligent Surface (Surface Intelligente Reconfigurable)
RSSI	Received Signal Strength Indicator (Indicateur de Puissance du Signal Reçu)
RT	Ray Tracing (Tracé de rayons)
SBR	Shooting and Bouncing Rays
SIMO	Single Input, Multiple Ouput

SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio (Rapport Signal sur Interférence plus Bruit)
SISO	Single Input, Single Output
SLL	Side Lobe Level (niveau des lobes secondaires)
SRT	Standard Ray Tracing
UTD	Uniform Theory of Diffraction

LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

A	Ampère
dB	Décibel
GHz	Gigahertz
λ	Lambda : longueur d'onde, en mètres
MHz	Megahertz
(dB)V/m	Volt/mètre

RÉSUMÉ

Les méthodes d'exploitation récentes des mines souterraines intègrent de plus en plus d'outils automatisés ou contrôlés à distance en temps réel. Ces nouvelles applications génèrent des flux importants, tels que des vidéos en direct, des données télémétriques et des boucles de contrôle-commande, nécessitant une bande passante élevée ainsi que des communications fiables et à faible latence.

Cependant, la topographie complexe des galeries et les conditions d'exploitation minière rendent le milieu de propagation particulièrement défavorable, notamment pour les technologies sans fil utilisant les ondes millimétriques.

Une approche émergente, basée sur les Surfaces Reconfigurables Intelligentes (*Reconfigurable Intelligent Surface*, RIS), promet d'améliorer les performances du canal de propagation. Ces surfaces, constituées d'un grand nombre d'éléments passifs contrôlables individuellement, permettent de manipuler dynamiquement les ondes électromagnétiques afin d'optimiser la propagation dans l'environnement proche.

Dans cette étude, nous explorons l'intégration des RIS dans plusieurs scénarios réalistes illustrant des problématiques spécifiques aux communications dans les tunnels. L'objectif est d'assister un système de télécommunication existant afin d'améliorer la couverture, la qualité des liaisons radio et la capacité globale d'un tel réseau.

Mots-clés : propagation radio, tracer de rayons, Surface Intelligente Reconfigurable, RIS, mine souterraine.

Keywords: radio propagation, ray tracing, Reconfigurable Intelligent Surface, RIS, underground mine.

INTRODUCTION

Depuis la préhistoire, l'Homme explore le sous-sol à la recherche de minéraux. Aujourd'hui, ce sont plusieurs dizaines de milliards de tonnes de matériaux qui sont extraites chaque année pour répondre aux besoins en production industrielle et énergétique. Pendant longtemps, les conditions de travail dans les mines et les accidents – explosions, incendies, éboulements – ont marqué l'actualité. Cependant, les avancées technologiques et les progrès en matière de sécurité permettent désormais aux mineurs d'évoluer dans des environnements beaucoup plus sûrs. Une part importante de ces progrès repose sur les technologies de télécommunications. Celles-ci jouent un rôle clé dans la communication entre les travailleurs, le suivi de leur position, la remontée de données en temps réel comme recommande par le CDC/NIOSH [1]. Ainsi, pour assurer la sécurité des travailleurs, il est indispensable de disposer de systèmes de communication robustes et fiables pour signaler rapidement tout incident, de demander de l'aide et de coordonner efficacement les évacuations en cas d'urgence.

La tendance actuelle est de plus en plus à l'exploitation à distance et à l'automatisation dans les mines souterraines. Les réseaux de télécommunications permettent de surveiller et de contrôler à distance les équipements miniers, ce qui réduit la nécessité pour le personnel d'être physiquement présent sous terre. Cela permet d'améliorer l'efficacité de l'exploitation, de minimiser l'exposition aux conditions dangereuses et d'améliorer la rentabilité de l'exploitation.

Ces applications génèrent un important volume de données qui requiert d'augmenter les capacités du système de télécommunication. Les opérations à distance impliquent souvent la transmission de flux vidéo en temps réel accompagnés de données télémétriques qui peuvent utiliser une large bande passante. Dans le cadre du pilotage à distance des équipements ou de l'utilisation de systèmes de contrôle basés sur des boucles d'asservissement, il est crucial de disposer de connexions à faible latence pour assurer un contrôle en temps réel de l'équipement minier. Cela permet aux opérateurs de recevoir immédiatement la rétroaction nécessaire et de réagir rapidement, notamment en situation d'urgence. Pour assurer un fonctionnement

continu et minimiser les temps d'arrêt, les opérations minières souterraines nécessitent une connectivité robuste et fiable en raison de l'environnement difficile [1, 2].

Les communications minières se divisent en deux grandes catégories : les systèmes filaires et les systèmes sans fil. Le mode sans fil, utilisant les ondes radioélectriques pour échanger des données, offre plus de flexibilité et une meilleure adaptabilité. Il permet différents scénarios de déploiement, souvent mieux adaptés à l'évolution dynamique des galeries minières. Toutefois, le principal défi à son déploiement reste la propagation difficile des ondes électromagnétiques sous terre, qui affecte la couverture radio et la qualité des communications.

Jusqu'à récemment, les efforts se concentraient principalement sur l'optimisation des communications dans un environnement radio considéré comme figé. Cependant, une approche novatrice a émergé : plutôt que de subir les contraintes du canal radio, il est désormais envisageable de le reconfigurer activement. Cette stratégie vise, par exemple, à réduire les effets néfastes du multichemin ou, au contraire, à les exploiter pour améliorer les performances.

Parmi ces solutions, les *Reconfigurable Intelligent Surfaces* (RIS) – ou surfaces intelligentes reconfigurables – se distinguent. Constituées d'éléments passifs contrôlables, elles permettent de manipuler dynamiquement l'environnement électromagnétique afin de rediriger, renforcer ou atténuer les signaux de manière ciblée. Ces surfaces offrent plusieurs avantages :

- Une optimisation de la connectivité dans des environnements complexe ;
- Une amélioration de l'efficacité spectrale (meilleure utilisation de la bande passante) ;
- La réduction de la consommation énergétique, grâce à leur fonctionnement passif ;
- Un coût de déploiement plus faible que les relais actifs traditionnels.

Problématique et objectif

Les canaux de propagation radiofréquence (RF) dans les environnements miniers souterrains diffèrent considérablement de ceux des zones ouvertes ou urbaines. Cela est dû :

- A des contraintes physiques spécifiques issues de l'exploitation de l'environnement, telles que des formes irrégulières (corridors, piliers, éboulis) et des dimensions réduites (largeur, hauteur des tunnels) ;
- A l'atténuation importante et variable du signal causée par l'irrégularité et les matériaux des parois rocheuses ;
- A la présence et aux mouvements constants d'équipements miniers tels que les foreuses, chargeuses-pelleteuses, camions souterrains, convoyeur ou autre structures métalliques.

Ces caractéristiques entraînent des phénomènes complexes de propagation, notamment la réflexion, la diffraction, la diffusion et l'atténuation importante des signaux. L'utilisation de fréquences élevées (au-delà de 2 GHz), bien que pertinente pour des applications nécessitant une large bande comme la surveillance vidéo, la téléopération ou la réalité augmentée, se heurte à des limitations majeures dans ces environnements, notamment une dégradation sévère des liaisons radio en l'absence de ligne de visée (*Non Line Of Sight*, NLOS) ou dans des configurations fortement obstruées (*Obstructed Line Of Sight*, OLOS).

Ces dernières années, les RIS ont attiré un intérêt croissant en raison de leur potentiel à soutenir le déploiement des futures technologies cellulaires, notamment la 6G. Elles pourraient en effet pallier les limitations de propagation des ondes à haute fréquence dans des environnements radio complexes, tels que les zones urbaines denses [3, 4], pour améliorer la couverture et la qualité de service. Toutefois, la transposition de cette technologie aux milieux souterrains reste peu explorée. La littérature actuelle ne traite pas adéquatement des défis spécifiques liés à l'architecture des galeries minières, aux contraintes topologiques, à l'évolutivité de l'environnement ni aux exigences critiques en matière de sécurité.

Dans ce contexte, nous proposons d'évaluer la faisabilité de l'utilisation des RIS ainsi que les gains potentiels qu'elles peuvent offrir en tant que levier technologique pour améliorer artificiellement les conditions de propagation des ondes radiofréquences en milieu souterrain. Cette évaluation s'inscrit dans des scénarios réalistes propres à l'exploitation minière souterraine, à partir desquels nous analysons dans quelle mesure l'intégration des RIS permet de compenser les limitations inhérentes à la propagation radio dans les galeries minières, notamment en ce qui concerne l'atténuation, le multitrajet, et l'absence de ligne de visée.

Nous étudions ces scénarios pour une fréquence de 5.8 GHz, utilisée notamment par le WiFi et très proche des fréquences utilisées par la technologie cellulaire LTE (bandes non licenciées de 5.2 GHz et 5.9 GHz) et intervéhiculaires (LTE-V2X, 5.9 GHz).

Cette fréquence est suffisamment sensible aux phénomènes de propagation tels que l'atténuation, la réflexion, la diffraction et le multitrajet, tout en maintenant une complexité raisonnable pour la mise en œuvre en simulation et en déploiement pratique. Les scénarios ne prennent pas en compte les effets dynamiques liés aux déplacements rapides (effet Doppler, multichemin dynamique), ceux-ci étant modélisés de manière simplifiée par un échantillonnage spatial discret de positions fixes. Les indicateurs sont évalués dans le cas d'un canal SISO.

L'analyse se limite aux performances physiques du canal par les indicateurs de performances liés, sans évaluer les répercussions de ces performances sur les couches protocolaires supérieures, ni sur l'expérience utilisateur finale. Enfin, bien que les scénarios soient formulés dans un contexte WiFi, principalement pour justifier l'usage de la bande de 5.8 GHz, les implications possibles du déploiement de RIS sur les protocoles d'accès au médium — tels que le problème du « terminal caché » ou les asymétries de couverture — ne sont pas traitées dans cette étude.

Dans la majorité des scénarios, la configuration des surfaces RIS est supposée optimale, déterminée en fonction des positions des entités du réseau (émetteur, récepteur) dans un environnement libre de toute obstruction. Cette hypothèse permet

d'évaluer le gain théorique maximal que peut offrir le déploiement des RIS dans des conditions idéales. Enfin, le contrôle de la configuration, notamment en temps réel, ne fait pas partie des objectifs de cette étude.

Structure du mémoire

Le chapitre 1 introduit le contexte général de la connectivité en milieux souterrains, en mettant l'accent sur les particularités propres aux environnements miniers. Il adopte une perspective prospective quant à l'intégration de technologies émergentes, notamment les RIS, dans les réseaux de communication souterrains.

Le chapitre 2 expose les fondements théoriques et technologiques des RIS et les principes de modélisation numériques du canal de propagation.

Le chapitre 3 présente le cadre méthodologique retenu pour la modélisation et la simulation d'un environnement minier réaliste, ainsi que des propositions de méthode de déploiement des RIS pour prendre en compte le confinement de l'environnement.

Le chapitre 4 présente les résultats des simulations ainsi que certains résultats expérimentaux pour les différents cas d'usage représentatifs abordés tout au long du mémoire.

1. LA PROBLÉMATIQUE PROPAGATION EN MILIEU MINIER SOUTERRAIN

Un canal de propagation (ici un canal radio) désigne l'environnement physique à travers lequel une onde électromagnétique (comme un signal radio) se propage entre un émetteur et un récepteur. On parle de chemin ou de trajet, l'itinéraire suivi par une onde électromagnétique dans le canal. Selon les interactions avec l'environnement, chaque chemin subit des phénomènes induits par le canal qui affectent le signal durant sa transmission, tel qu'illustré dans la figure 1 [5] :

- L'atténuation : la perte de puissance du signal avec la distance, les matériaux interagissant avec le signal et la topologie de l'environnement,
- la réflexion : rebond du signal sur des surfaces électriquement lisses,
- la diffraction : contournement d'obstacles,
- la diffusion (*scattering*) : la dispersion due à des irrégularités de la surface
- le délai de propagation

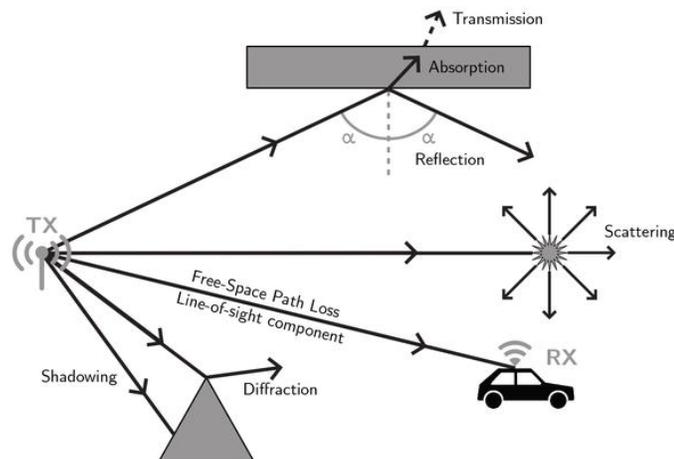


Figure 1
Phénomènes de propagations rencontrés dans le canal.

Source : [5]

1.1 Description du milieu souterrain

Les mines souterraines sont des sites d'exploitation minière situés en profondeur sous la surface terrestre. Elles permettent d'extraire des ressources minérales enfouies, telles que l'or, d'où Val-d'Or tire son nom, ou le cuivre, comme à Rouyn-Noranda. Contrairement aux mines à ciel ouvert, l'accès aux gisements nécessite la

construction d'un réseau complexe de galeries, de puits verticaux et de tunnels inclinés, adaptés à la topographie souterraine et aux contraintes géologiques.

La figure 2 illustre une topologie typique d'une mine souterraine, structurée en différentes sections fonctionnelles. Les puits verticaux assurent le transport du personnel, du matériel et du minerai entre la surface et les niveaux d'exploitation. Les galeries horizontales (*drifts*) permettent l'accès aux zones de production et servent également de voies de circulation et de ventilation. Enfin, les tunnels inclinés, communément appelés « rampes », facilitent la circulation des équipements mobiles entre les différents niveaux, tout en jouant un rôle logistique essentiel dans l'acheminement des ressources et des engins.

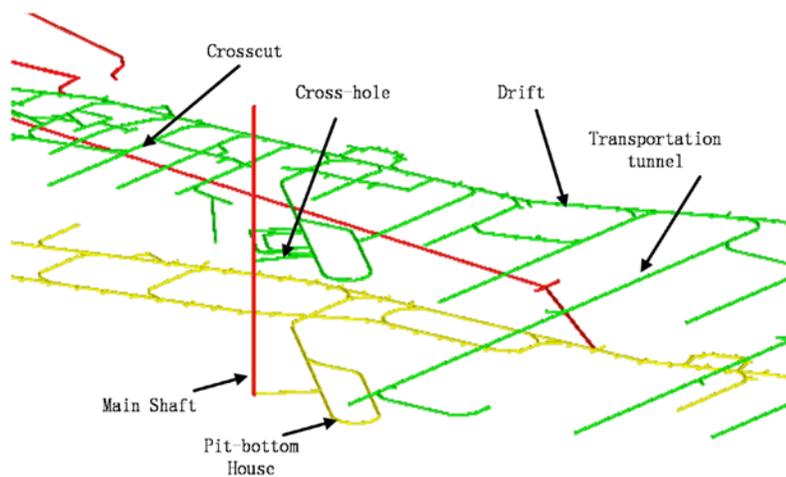


Figure 2
Topologie typique d'une mine, exemple d'une mine de fer en Chine.

Source : [6]

Les dimensions typiques des tunnels de mine souterrains varient en fonction de leur utilisation et du type d'équipement qui doit y accéder. La section transversale de galeries varie généralement entre 4 et 25 m², avec une moyenne de 12 m² [7].

La longueur des tunnels peut atteindre plusieurs kilomètres.

1.2 Problématique de propagation dans le milieu souterrain

Dans des environnements complexes tels que les mines souterraines, la propagation des ondes radiofréquences diffère profondément de celle observée en milieu ouvert. Le canal de propagation y est particulièrement difficile à modéliser, en raison de phénomènes de réflexions multiples, de la rugosité et composition hétérogène des parois rocheuses, ainsi que de la géométrie irrégulière des galeries (formes non standardisées, dimensions réduites, courbures abruptes) [8]. À cela s'ajoutent des conditions environnementales variables (humidité, poussière, température), qui influencent l'atténuation, la diffusion et la stabilité du signal. Ces facteurs contribuent à un canal marqué par une atténuation (*fading*) sévère et un multichemin prononcé, rendant la modélisation analytique moins pertinente et la modélisation empirique particulièrement complexe.

1.2.1 Atténuation due à la topologie

L'atténuation désigne la réduction globale de la puissance d'un signal à mesure qu'il se propage dans un milieu.

La cause principale de l'atténuation du signal est l'éloignement entre l'émetteur et le récepteur, mais dans cet environnement, de nombreux facteurs supplémentaires contribuent également de manière significative, tels que :

- La rugosité des parois [9] et la composition des matériaux, généralement irréguliers et présentant des pertes, augmentent l'absorption du signal et sa diffusion ;
- Les courbatures et les jonctions de tunnels génèrent des diffractions, exacerbant l'atténuation.

La figure 3 présente les résultats des mesures expérimentales de la puissance du signal reçu pour différentes topologies rencontrées en milieu minier souterrain. On observe une forte variabilité de la connectivité selon la topologie étudiée, certaines induisant une forte atténuation du signal. Il pourrait donc être pertinent d'améliorer les conditions de propagation dans les environnements tels que les tunnels (figure 3.b) et les puits (*shafts*, figure 3.c), afin de réduire cette atténuation et d'optimiser la qualité des communications.

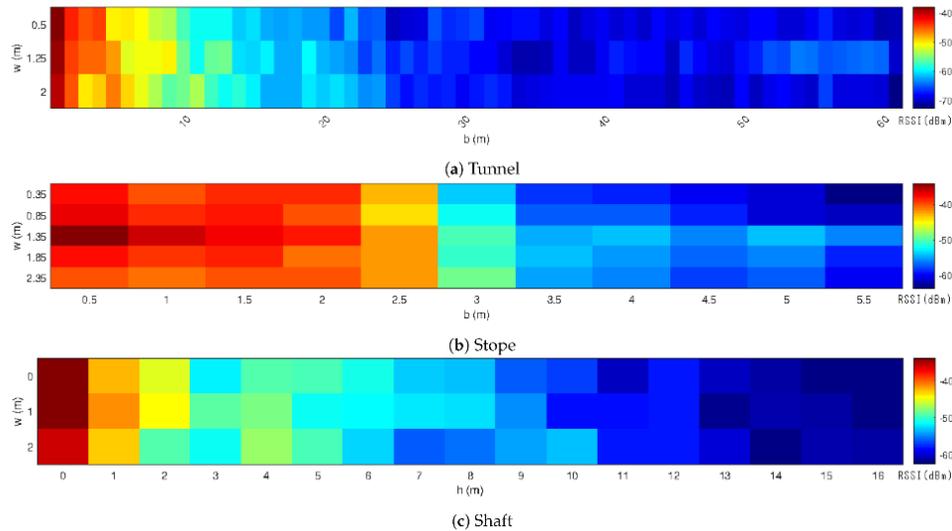


Figure 3
Exemple de carte de connectivité pour les différents milieux rencontrés dans une mine souterraine.

Source : [10]

1.2.2 Effet d'ombre lié au confinement

L'effet d'ombre correspond à un affaiblissement significatif, fluctuant du signal lorsqu'il rencontre des obstacles physiques dans son environnement de propagation. Ces obstacles peuvent inclure notamment la topologie et les parois des tunnels, ainsi que d'autres éléments de l'infrastructure pour l'exploitation minière comme les structures métalliques des conduits, les machines et autres équipements.

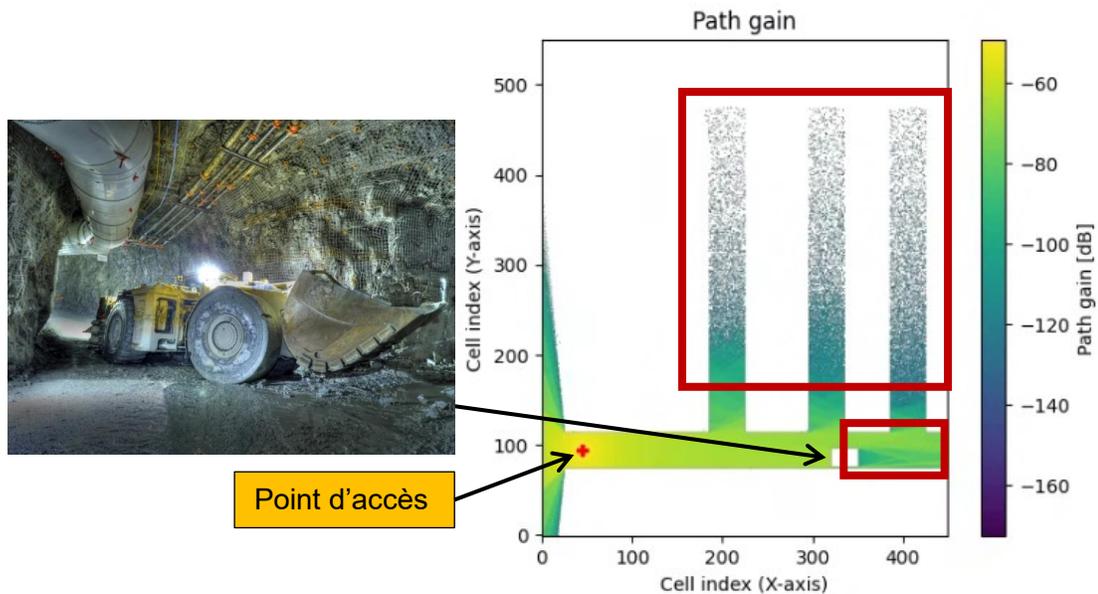


Figure 4
Effet d'ombre dû au blocage d'un équipement minier et au confinement induit par les tunnels.

1.2.3 Conditions environnementales

Les conditions environnementales, telles que l'humidité et la présence d'eau, peuvent faire varier substantiellement les propriétés électromagnétiques de la roche. En particulier, l'eau contenue dans la roche augmente la conductivité, ce qui accentue la perte de signal pour les ondes se réfléchissant sur les parois [11]. Par ailleurs, la présence de vapeur d'eau dans l'air contribue également à l'atténuation du signal.

Les particules de poussière, ici générées par les opérations de dynamitage, d'extraction et de transport du minerai, peuvent agir comme des diffuseurs (*scatterers*) et des absorbants, potentiellement réduisant la puissance du signal reçu résultant de la perte en chemin [12].

L'impact de ces facteurs — humidité, eau et poussière — sur la propagation du signal devient d'autant plus important que la fréquence du signal est élevée, en raison de la plus grande sensibilité des ondes hautes fréquences à ces conditions.

1.2.4 Multichemin important

La propagation par trajets multiples désigne le phénomène selon lequel un signal radioélectrique atteint un récepteur non seulement par le trajet direct, mais également par des trajets réfléchis, diffractés ou diffusés. Ces chemins indirects sont causés par le confinement des galeries, et la présence d'obstacles dans l'environnement, comme :

- Les parois rugueuses et irrégulières des galeries [9] ;
- Les structures métalliques [10] ;
- Les machines mobiles ou équipements fixes.

Dans un environnement souterrain confiné tel qu'une mine, les conditions sont particulièrement propices à la propagation multichemin en raison des surfaces multiples et complexes.

Cela induit un étalement du retard (*delay spread*), c'est-à-dire une différence de temps entre l'arrivée du signal direct et celle des copies retardées. Le multichemin génère :

- L'évanouissement du signal par interférence constructive et destructive entre les trajets ;
- Les Interférences intersymboles (ISI) dans les communications numériques.

Ces facteurs ont pour conséquence la réduction de la bande passante utile, ce qui limite les débits exploitables.

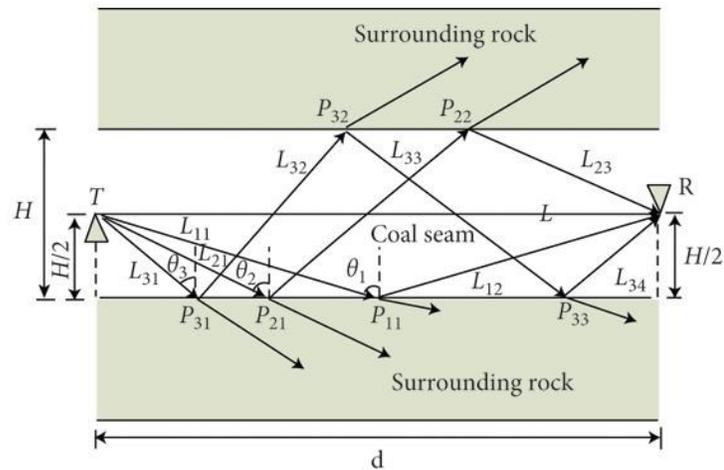


Figure 5
Investigation théorique d'un canal de propagation dans une mine de charbon.
 Source : [13]

Dans la figure 5, nous observons qu'en plus du lien direct en l'émetteur T et le récepteur R, de nombreux chemins supplémentaires sont générés par les parois du tunnel. Les chemins comme L32 ou L33, qui présentent une distance de trajet beaucoup plus long que le chemin direct, augmentent l'étalement du retard d'un point de vue temporel.

Plusieurs versions du signal transmis arrivent souvent au récepteur par des chemins différents. Certains de ces signaux se combinent de manière constructive, tandis que d'autres interfèrent de manière destructive. En conséquence, le signal combiné global au niveau du récepteur devient assez complexe et peut différer considérablement du signal original envoyé par l'émetteur, comme illustré dans la figure 6.b. Dans la plupart des cas, cette combinaison entraîne une dégradation de la qualité du signal au niveau du récepteur.

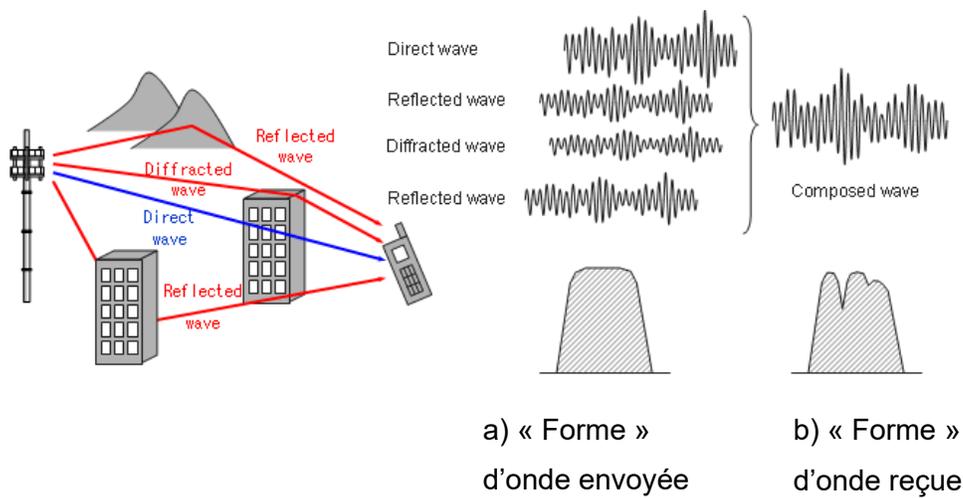


Figure 6
Illustration de l'effet du multichemin sur la dégradation de la forme d'onde reçue.

Source : [14]

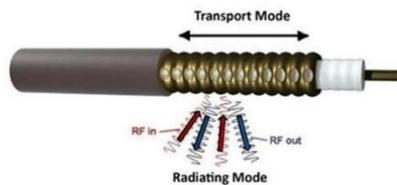
Bien que souvent perçue comme un problème, la propagation multichemin peut aussi être exploitée pour améliorer la réception grâce à la diversité spatiale [8]. Naturellement, la forme des tunnels agit comme un guide d'ondes large et irrégulier [9, 15], pouvant favoriser certaines réflexions utiles. Artificiellement, les systèmes MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) utilisent plusieurs antennes pour exploiter les trajets multiples de manière constructive, améliorant ainsi le débit et la fiabilité de la communication.

La sélectivité fréquentielle du canal de propagation entraîne une meilleure capacité de pénétration des ondes radio de basses fréquences à travers les obstacles, en raison de leur plus grande longueur d'onde. Toutefois, ces fréquences sont davantage sujettes aux interférences de type multichemin, en raison des réflexions plus marquées. À l'inverse, les hautes fréquences, caractérisées par une atténuation plus rapide due à l'absorption et aux pertes par diffraction, présentent une moindre robustesse en environnement obstrué, bien qu'elles soient en général moins affectées par les interférences de type multichemin.

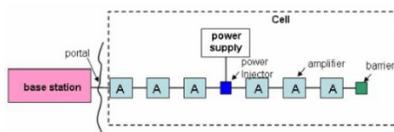
1.3 Stratégies d'atténuation des perturbations

Pour atténuer les effets négatifs liés à la sélectivité fréquentielle, à l'évanouissement et au blocage du signal dans les environnements confinés comme les mines souterraines, plusieurs stratégies techniques peuvent être mises en œuvre à travers une planification radio minutieuse et des études spécifiques du canal :

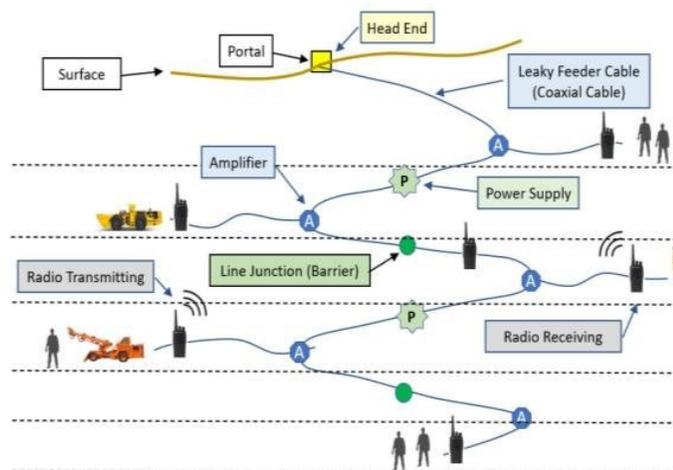
- L'utilisation de câbles rayonnants (*leaky feeder*), traditionnellement déployés dans les galeries. Agissant à la fois comme lignes de transmission et antennes distribuées, ces câbles émettent le signal sur toute leur longueur (figure 7.b et c), garantissant une couverture uniforme, y compris dans les zones dépourvues de ligne de visée (NLoS). Cette méthode présente comme principal inconvénient une complexité et un coût de déploiement assez important, surtout dans des environnements évoluant rapidement.



a) Fonctionnement du câble rayonnant.



b) Principaux composants d'un système à câble rayonnant.



c) Illustration du déploiement des câbles sur plusieurs niveaux.

Figure 7
Détails de l'utilisation du câble rayonnant.

Source : (a) [16] (b) [1] (c) [17]

- L'augmentation de la puissance d'émission, permettant une portée accrue du signal. Cette méthode est toutefois limitée par l'élévation du niveau d'interférences intercellulaires, la saturation du canal radio, ainsi que les contraintes réglementaires sur la puissance rayonnée.
- Le déploiement de répéteurs ou de relais actifs, qui amplifient et/ou retransmettent les signaux afin de compenser les pertes, mais cela implique une complexité accrue en termes de déploiement physique, de gestion de la topologie réseau et de coûts d'exploitation.

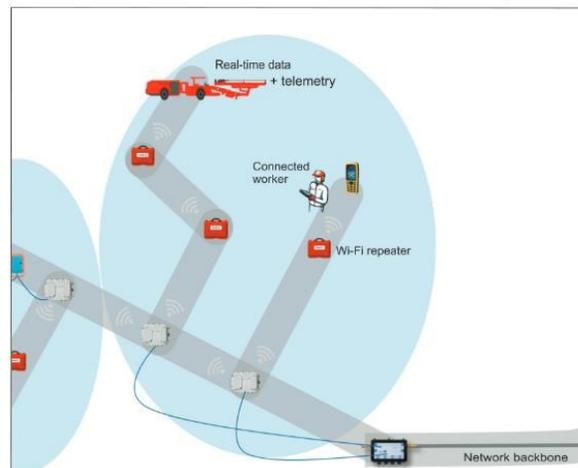


Figure 8
Exemple de déploiement de répéteurs traditionnels pour couvrir des tunnels secondaires. Les RIS peuvent être des candidats pour remplacer ou assister les répéteurs.

Source : [18]

- L'emploi d'antennes directionnelles, principalement pour les bandes de fréquence élevées. En focalisant le faisceau radioélectrique, elles améliorent le gain et la portée, mais au prix d'une couverture angulaire réduite.

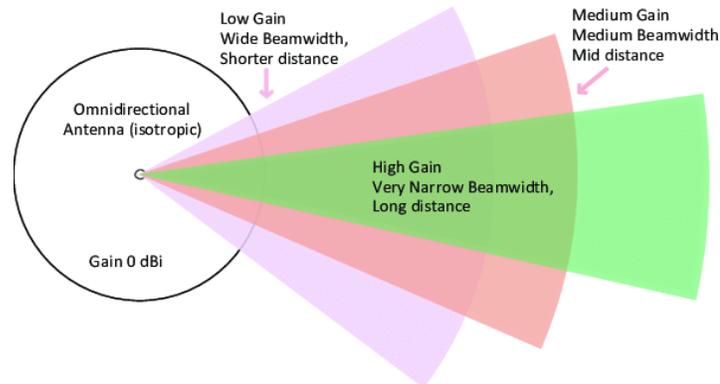


Figure 9
Principe de l'adaptation du faisceau pour configurer la distance de couverture.
 Source : [19]

Leur utilisation nécessite souvent des mécanismes de formation de faisceaux (*beamforming*) adaptatifs (figure 10), ainsi que des protocoles de synchronisation pour assurer un suivi efficace des terminaux mobiles.

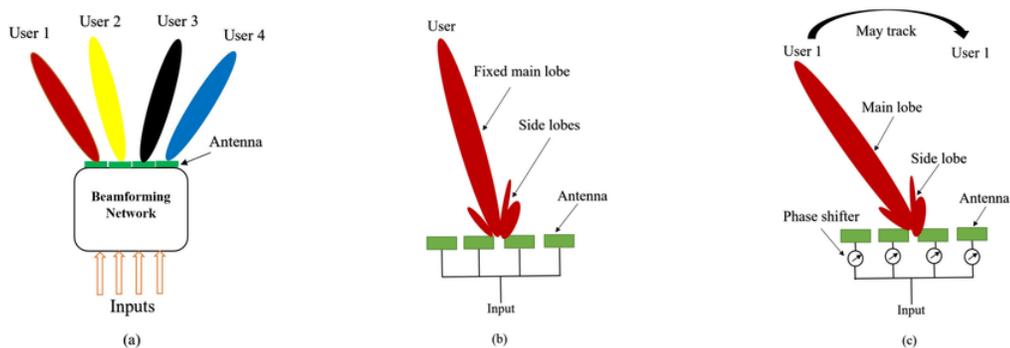


Figure 10
Principe de la formation de faisceau adaptatif.
 Source : [20]

Dans le cadre d'un déploiement « traditionnel », il est nécessaire de densifier l'installation des équipements réseau afin de compenser les effets du canal. Nous prenons ici un scénario représentatif et observons le déploiement des nœuds dans le but d'améliorer la couverture réseau au sein des tunnels de développement (figure 11.b). Cependant, d'un point de vue opérationnel, l'ajout de nœuds supplémentaires présente plusieurs inconvénients :

- Nécessite une planification préalable, ainsi que le déploiement éventuel de câbles, ce qui peut réduire la productivité;
- Génère des coûts supplémentaires liés à l'acquisition de nouveaux équipements.

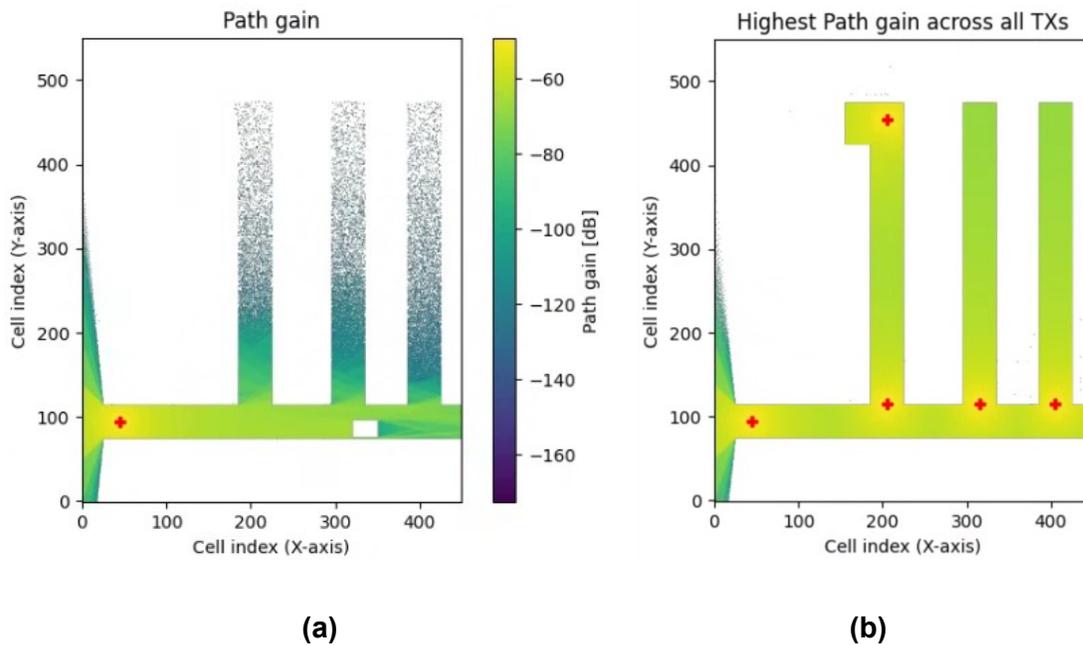


Figure 11
Exemple de déploiement de nœuds supplémentaires pour améliorer la couverture (a) référence (b) nœuds déployés à proximité des tunnels secondaires.

Comme mentionné dans la problématique, nous proposons d'étudier l'utilisation de RIS dans ce scénario ainsi que dans d'autres scénarios représentatifs, afin de se passer de ce déploiement et d'améliorer directement le canal de propagation.

1.4 Exemple de déploiement de RIS dans un environnement minier souterrain

Un exemple de scénario de réseau souterrain dans une mine est présenté dans la figure 2, avec des corridors étroits, de multiples intersections et des virages à angle droit [21]. Dans une telle configuration, les signaux des équipements actifs sont souvent bloqués ou fortement atténués, car ils doivent parcourir les murs et tourner. Les RIS (représentés en bleu sur la figure) sont positionnés à des points stratégiques

comme les intersections et les extrémités des corridors pour que les ondes RF puissent être dirigées vers les zones NLOS. Leur positionnement est choisi pour maximiser la couverture sans nécessiter de nouveaux points d'accès actifs, réduisant ainsi les coûts et la complexité du déploiement.

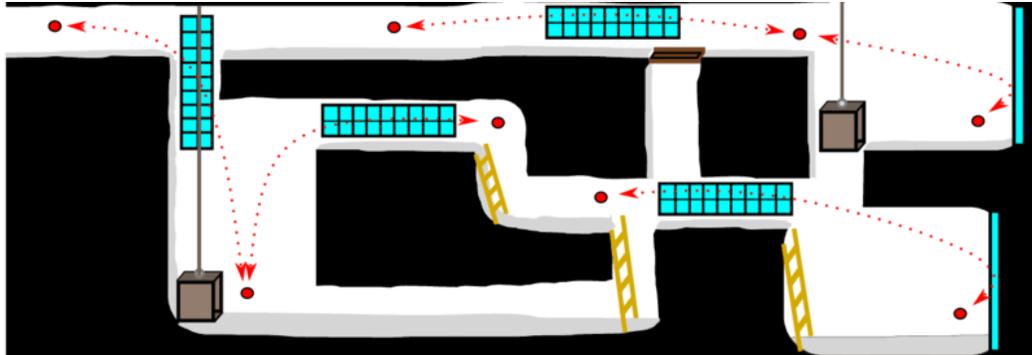


Figure 12
Exemple de déploiement de RIS dans un environnement minier souterrain.
 Source : [21]

Dans la figure 12, les chemins que doivent effectuer plusieurs signaux RF sont indiqués par les flèches rouges. Ces chemins sont bloqués par des obstacles et les sinuosités de l'environnement. Des surfaces RIS sont également installées aux intersections et dans les zones où la visibilité est compromise, permettant ainsi de dévier activement le signal RF vers les zones d'ombre. Ce scénario montre comment les RIS peuvent compenser l'absence de ligne de vue directe dans des mines à la topologie complexe, en raison des bifurcations et intersections des tunnels, sur plusieurs niveaux.

2. CADRE SCIENTIFIQUE ET ÉTAT DE L'ART

Dans cette section, nous définissons le cadre scientifique et présentons un état de l'art général sur les RIS et leur modélisation dans un environnement de simulation.

2.1 *Paradigme de télécommunication traditionnel*

Le paradigme traditionnel de la télécommunication fait référence au modèle de Shannon et Weaver, qui conceptualise la communication comme un processus linéaire composé de plusieurs éléments clés :

- Un émetteur, qui génère l'information ;
- Un transmetteur, qui converti l'information en un signal transmissible, ici un signal radiofréquence, généralement modulé, sous la forme d'une onde électromagnétique ;
- Un canal de propagation ayant des propriétés spécifiques, comme vu dans le chapitre 1, dont le rôle est de transporter le signal; qui peut se faire sous plusieurs modes ;
- Le récepteur, qui récupère le signal.

L'émetteur et le récepteur peuvent chacun utiliser une ou plusieurs antennes. Les combinaisons réalisables, illustrées en figure 13, dépendent notamment des contraintes pratiques de déploiement. Par exemple, il est maintenant courant de voir des points d'accès offrant des sorties multiples (MO), alors que l'appareil utilisateur, devant rester compact, embarque une entrée simple (SI).

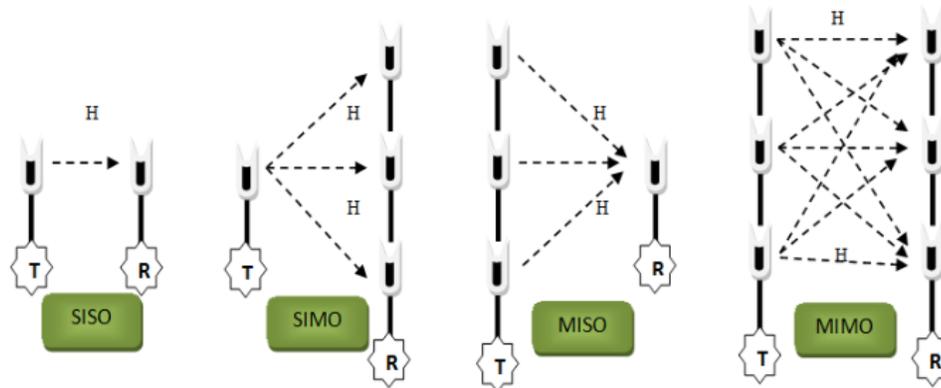


Figure 13
Canaux SISO, SIMO, MISO et MIMO.

Source : [22]

La communication au sein du canal se fait traditionnellement de deux façons :

- En ligne de vue (LOS), lorsque l'émetteur et le récepteur peuvent « se voir », ce qui est permis par l'existence d'un chemin direct dégagé entre les entités. Par simplification, dans un contexte SISO, il s'agit du cas optimal dans lequel le signal sera principalement altéré par l'atténuation due à la distance.
- En non-ligne de vue (NLOS), des obstacles bloquent le chemin direct entre les entités, et le signal atteint le récepteur par les mécanismes de réflexion, diffraction ou diffusion. Les performances du lien SISO peuvent s'en voir dégradées à cause du manque d'exploitation de la diversité spatiale requise pour atténuer les perturbations.

Dans le paradigme traditionnel des télécommunications sans fil (c'est-à-dire sans recours à des relais ou à des liaisons multisauts), le canal entre l'émetteur et le récepteur est généralement modélisé par une unique matrice de canal H . Cette matrice caractérise les effets de la propagation du signal entre les différentes antennes d'émission et de réception.

Soit un système avec :

- N antennes attribuées à l'émetteur ;
- M antennes attribuées au récepteur ;

- b le vecteur de bruit reçu des antennes du récepteur ;
- x le vecteur de N symboles,

Le vecteur de symboles reçu par le récepteur est défini comme :

$$y = Hx + b \quad (1)$$

H inclut l'information du canal tel que h_{mn} correspond à l'information du canal entre la n ème antenne de l'émetteur et la m ème antenne du récepteur.

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1} & \cdots & h_{mn} \end{pmatrix}$$

En environnement NLOS, où la ligne de vue directe entre l'émetteur et le récepteur est obstruée, les phénomènes de diffusion, de réflexion et de diffraction induisent un canal riche en multitrajets. Cela se traduit mathématiquement par une augmentation du rang de la matrice H . À l'inverse, en situation de LOS avec peu ou pas de dispersion du signal, la matrice H peut devenir mal conditionnée, ce qui nuit à la décomposition du signal spatial, ou de rang réduit, qui indique que le canal ne peut supporter plusieurs flux spatiaux indépendants. Ces facteurs limitent les gains du MIMO.

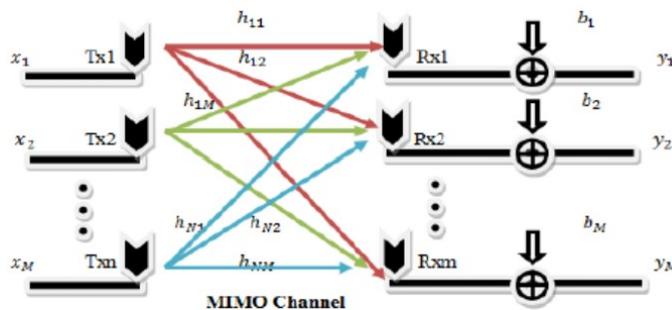


Figure 14
Illustration du système MIMO correspondant à la matrice H .

Source : [22]

Si l'on souhaite s'affranchir de la complexité liée au déploiement d'un système MIMO, des techniques comme la formation de faisceau ou le relayage peuvent être utilisées pour atténuer les limitations du lien SISO.

2.2 Les RIS

Une surface intelligente reconfigurable (RIS, Reconfigurable Intelligent Surface) est une technologie innovante dans le domaine des communications sans fil. Elle se compose d'un réseau dense plat d'éléments passifs appelés "cellules unitaires", dont la phase peut être ajustée afin de contrôler la propagation des ondes radio localement, ce qui permet de moduler le comportement des ondes électromagnétiques qui frappent la surface. On peut considérer le RIS comme un réflecteur avec anomalie, que l'on peut contrôler dynamiquement.

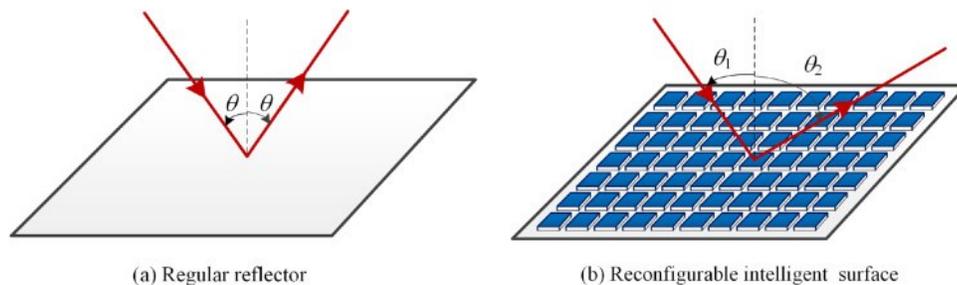


Figure 15
Illustration de la configuration de l'angle de réflexion (« l'anomalie ») d'un RIS par rapport à la réflexion d'un réflecteur régulier.

Source : [23]

Il existe trois modes d'opération des RIS :

- Réfléchissant (*reflect*) : la surface renvoie l'onde incidente vers une direction contrôlée. C'est un mode de fonctionnement idéal pour les surfaces reposant sur un support dur (par exemple, mur).
- Transmettant (*transmit*) : la surface laisse passer l'onde à travers, en modulant sa direction par la face de sortie. L'intérêt de ce mode d'opération est la possibilité de modifier le signal entre la face réceptrice et la face émettrice.
- Hybride : la surface combine les deux modes au besoin.

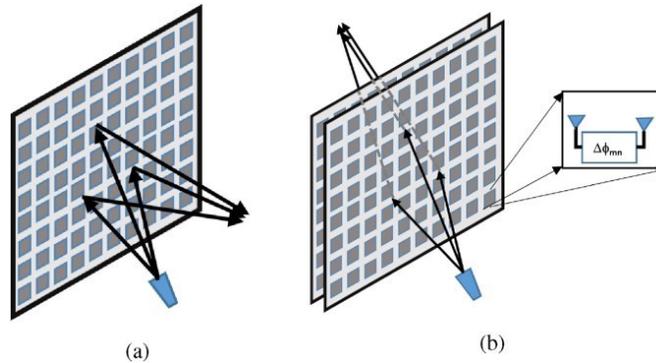


Figure 16
Illustration des deux modes d'opération (a) réfléchissant et (b) transmettant.

Source : [23]

En modifiant la phase et/ou l'amplitude des signaux qu'elle réfléchit ou transmet, la RIS est capable de diriger et de façonner de manière intelligente la direction, l'amplitude et la phase des ondes réfléchies. Le tableau 1 commente les différentes fonctions élémentaires que le RIS permet de configurer, comme illustré dans la figure 17.

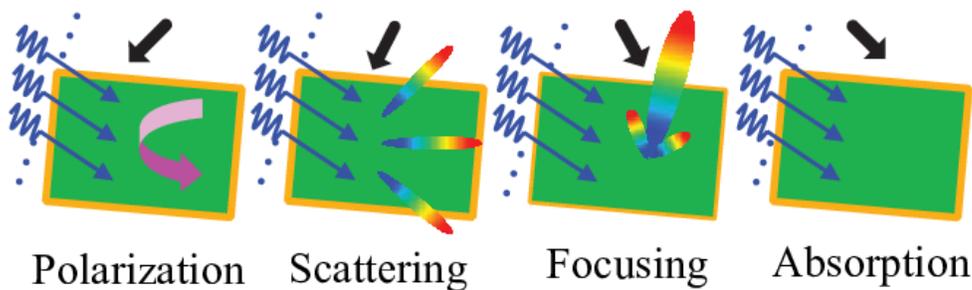


Figure 17
Fonctions élémentaires d'un RIS.

Source : [24]

Tableau 1
Description des fonctions élémentaires d'un RIS

Fonction	Description	Application
Réflexion et réfraction	Le signal incident est réfléchi ou réfracté selon un angle configuré (figure 15.b)	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration du lien vers un utilisateur - Suivi de cible

		<ul style="list-style-type: none"> - « Contournement » d'obstacle
Formation de faisceaux / diffusion	Le signal incident est séparé en plusieurs signaux réfléchis, dont l'angle de réflexion et la largeur de chaque faisceau sont contrôlés individuellement. En fonction de l'implémentation matérielle du RIS, il est également possible de contrôler le gain de ces faisceaux	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration des liens multi-utilisateurs - Génération de liens alternatifs - Accès par diversité spatiale - Confidentialité / sécurité
Focalisation du faisceau	L'énergie captée par le RIS est concentrée dans un faisceau contrôlé en direction ; gain et largeur, selon l'implémentation matérielle. Généralement, on cherche à obtenir le plus de gain possible.	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration du lien vers un utilisateur (principe illustré sur la figure 9) - Génération d'un lien fort - Accès par diversité spatiale (environnement multi-RIS)
Absorption	Le signal incident est absorbé (il n'y a pas de réflexion)	<ul style="list-style-type: none"> - Suppression de chemins interférents - Confidentialité / sécurité
Polarisation	Modification de la polarisation du signal incident	<ul style="list-style-type: none"> - Optimisation (si l'on connaît préalablement la polarisation du Tx et Rx) - Accès non-orthogonaux

Il existe deux grands paradigmes d'utilisation des RIS. Le premier vise à améliorer l'environnement de propagation, en se concentrant sur une liaison point-à-point, localisée dans l'espace et le temps, entre deux entités communicantes. L'objectif est alors d'optimiser cette liaison spécifique, souvent en recourant à des techniques telles

que la formation de faisceau (*beamforming*) ou le pilotage de faisceau (*beamsteering*). Ce paradigme est le plus largement étudié dans la littérature scientifique. Il s'appuie sur deux approches majeures issues de la théorie des réseaux d'antennes, qui seront introduites ultérieurement.

Le second paradigme d'utilisation des RIS consiste à améliorer l'environnement de propagation sans se restreindre à une liaison point-à-point spécifique. Autrement dit, l'objectif est d'optimiser les propriétés globales du canal de communication dans un espace donné, indépendamment de la localisation ou de l'existence d'un lien direct entre un émetteur et un récepteur précis. Cette approche ne sera pas abordée dans le cadre de ce mémoire, car elle constitue un domaine de recherche à part entière, nécessitant une étude approfondie.

La différence fondamentale avec le premier paradigme réside dans la connaissance préalable du lien à optimiser. En effet, dans le premier cas, on peut déterminer la configuration optimale de formation de faisceau à partir de la théorie des réseaux d'antennes, en se basant sur des informations connues telles que la position de l'émetteur et du récepteur, la géométrie de l'environnement et les obstacles présents. En revanche, dans le second paradigme, aucune de ces informations n'est a priori disponible : il s'agit d'optimiser la couverture de l'environnement de façon générale, ce qui entraîne une complexité de calcul élevée et nécessite des approches d'optimisation sans connaissance préalable de l'environnement radio.

2.2.1 La cellule unitaire

Le RIS est basé sur une structure dense d'antenne composée d'un réseau de petits éléments disposés sur une surface plane ou légèrement courbée et appelés cellule unitaire. Ces cellules unitaires sont généralement des mini-antennes isotopiques (souvent des patchs ou des dipôles) de taille et d'espacement d'environ $\lambda/2$, comme définit par la théorie des *reflectarrays* [25].

2.2.1.1. Structure

Une cellule unitaire comprend un ou plusieurs de ces éléments (figure 18) :

- Un substrat diélectrique, qui est un support physique et électrique des éléments du RIS, et détermine les propriétés de propagation des ondes qui influent sur la résonance et les pertes du RIS ;
- Une ou plusieurs pistes métalliques ou diélectriques, qui interagissent avec le champ électromagnétique ;
- Un ou plusieurs composants électroniques, mécaniques ou matériels permettant la reconfiguration des propriétés de la cellule comme sa phase ou son impédance ;
- Une couche comprenant les lignes de polarisation permettant de contrôler les composants électroniques ;
- Dans le cas des RIS en mode réfléchissant, un plan de masse pour isoler ou réfléchir l'onde.

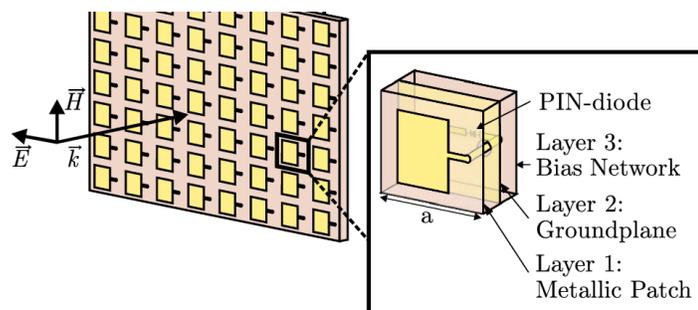


Figure 18
Illustration des couches composant une cellule unitaire.
 Source : [26]

2.2.1.2. Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion Γ est un complexe qui décrit la proportion d'une onde électromagnétique incidente et la phase, qui est réfléchi par une surface ou une interface entre deux milieux, ici entre l'air et une cellule unitaire.

Le coefficient est défini comme :

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i} \quad (2)$$

où :

- E_r est le champ électrique de l'onde réfléchié ;
- E_i est le champ électrique de l'onde incidente.

La phase de Γ , comprise entre 0 et 2π , indique comment la phase de l'onde réfléchié est modifiée par rapport à l'onde incidente.

En pratique, la valeur du coefficient de réflexion Γ n'est pas spécifiée explicitement, mais résulte des propriétés des matériaux, de la géométrie de la structure, et des conditions de couplage local.

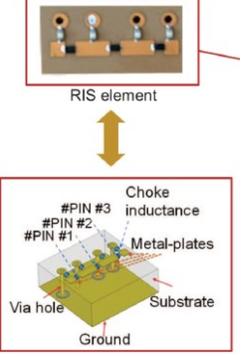
2.2.2 Configuration des RIS

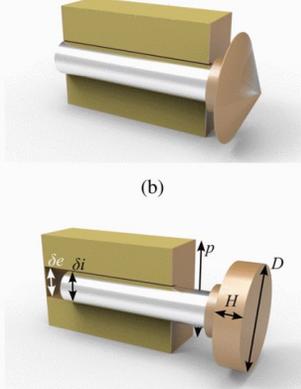
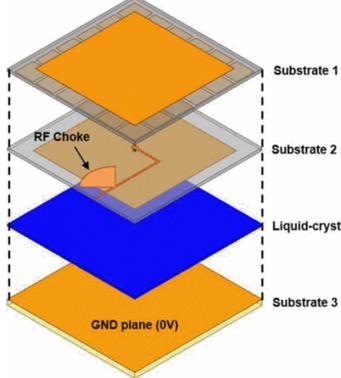
La configuration des RIS s'effectue par le contrôle de la réponse en phase de chaque cellule unitaire, dont les coefficients de réflexion peuvent être dynamiquement ajustés, généralement en phase, et parfois également en amplitude.

2.2.2.1. Moyens de contrôle

Selon la fréquence d'opération, les fonctionnalités souhaitées et la complexité du système, plusieurs méthodes peuvent être mises en œuvre pour contrôler la réponse en phase et en magnitude des cellules unitaires. Le tableau 2 décrit les principales méthodes étudiées dans la littérature.

Tableau 2
Principales méthodes de contrôle de la réponse de la cellule unitaire

Type de contrôle	Éléments mis en œuvre	Illustration
Électronique (la majorité des RIS)	Des composants électroniques : diode PIN (contrôle à états discrets), varacteur (contrôle continu), MEMS	 <p><i>Cellule multibit à diode PIN [27].</i></p>

<p>Mécanique</p>	<p>Rotation, translation de parties de cellules ou cellules de la surface</p>	 <p>(b)</p> <p>(d)</p> <p><i>Contrôle continu par translation [28].</i></p>
<p>Par matériaux</p>	<p>Utilisation de matériaux dynamique dont les propriétés électriques changent par un stimulus (courant électrique, couplage électromagnétique, flux optique) : graphène, cristaux liquides, photorésistance</p>	 <p>Substrate 1</p> <p>Substrate 2</p> <p>Liquid-crystal</p> <p>Substrate 3</p> <p>RF Choke</p> <p>GND plane (0V)</p> <p><i>Contrôle par cristaux liquides (couche bleue) [29].</i></p>

La plupart de ces méthodes nécessitent une couche dédiée aux lignes de polarisation, permettant de contrôler l'état des composants. Dans le cas d'un contrôle élément par élément, la complexité d'intégration peut augmenter considérablement — en particulier à haute fréquence, où l'impact de l'intégration devient critique et peut dégrader l'efficacité du RIS. Pour limiter cette complexité, certaines approches privilégient un contrôle par colonne, au prix d'une réduction de performance. D'autres proposent des solutions intermédiaires par cluster, visant à trouver un compromis entre complexité d'intégration et efficacité globale du système.

2.2.2.2. Intelligence et contrôle

Il existe plusieurs méthodes permettant de générer une distribution de phase adaptée à la fonctionnalité visée, notamment pour la modulation de la direction du signal — un principe connu sous le nom de formation de faisceau ou pilotage de faisceau.

Dans le cas de la formation de faisceau, deux approches principales de configuration sont couramment utilisées : la lentille de focalisation (*focusing lens*) et le réflecteur à gradient de phase (*phase gradient reflector*) [30].

La lentille de focalisation configure les cellules unitaires de telle sorte que les ondes incidentes s'additionnent de façon cohérente (constructive) en un point spatial donné. Cette technique est particulièrement employée lorsqu'il s'agit de concentrer l'énergie électromagnétique vers une cible précise.

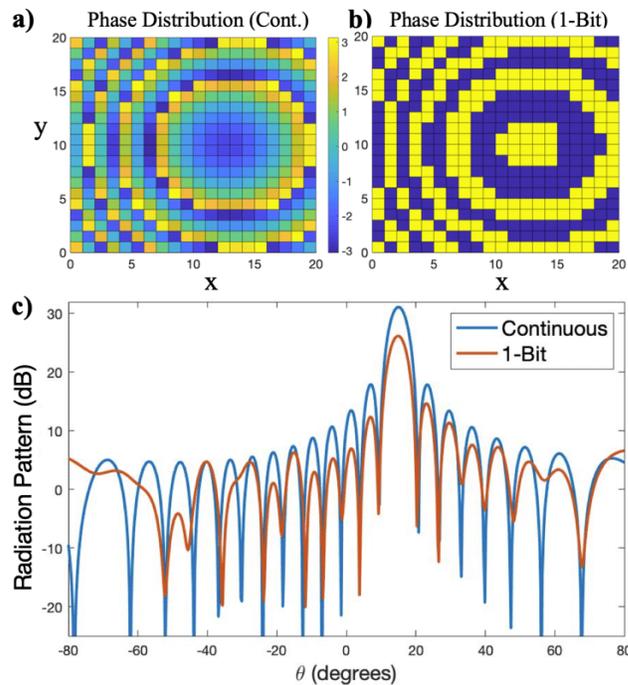


Figure 19
Exemple de configuration en mode lentille de focalisation pour une surface avec une quantification de 1 bit.

Source : [31]

La configuration par gradient de phase configure la surface comme un réflecteur à gradient de phase idéal, réfléchissant le signal dans une direction donnée. Le gradient

de phase est nécessaire pour assurer une formation optimale du faisceau principal et réduire les faisceaux secondaires.

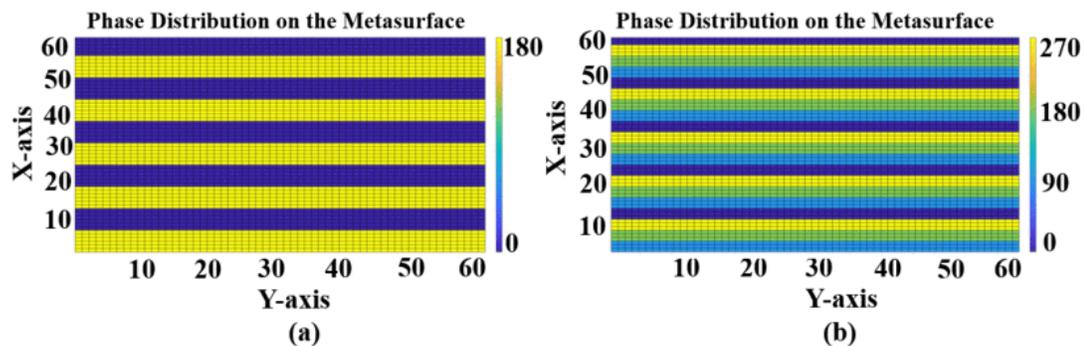


Figure 20
Exemple de configuration en mode réflecteur pour une surface avec une quantification de (a) 1 bit et (b) 2 bits.

Source : [32]

Dans les deux cas, nous remarquons que les distributions des phases sont données sous forme discrète. En effet, la majorité des implémentations pratiques de RIS permettent uniquement l'ajustement de décalages de phase discrets, en raison de limitations matérielles. Par conséquent, les valeurs de phase théoriquement optimales doivent être quantifiées sur une échelle discrète, en fonction de la résolution disponible.

Le niveau de quantification est défini par le nombre de bits de résolution du contrôleur de phase, déterminant le nombre d'états de phase réalisables. Les configurations les plus courantes incluent :

- Une quantification sur 1 bit (soit 2 états de phase distincts) ;
- Sur 2 bits (4 états) ;
- Ou sur 3 bits (8 états).

Cette quantification introduit une erreur de phase par rapport à la solution continue idéale, ce qui peut affecter les performances globales du RIS, notamment en termes de gain directionnel et de rapport signal/bruit (SNR). Dans la figure 19.c, on remarque

que l'erreur de quantification se présente sous la forme d'une perte de directivité du faisceau principal et une augmentation du niveau des lobes secondaires.

Quelle que soit la méthode de calcul des distributions des phases de la surface, le diagramme de rayonnement en champ lointain généré par une surface de M par N éléments unitaires isotropes d'amplitude A_{mn} et de phase φ_{mn} est donné par le facteur de matrice d'antenne (*Array Factor*) (éq. 3 issue de [33]).

$$AF = \sum_m^M \sum_n^N A_{mn} e^{i(k * r_{mn} - \varphi_{mn})} \quad (3)$$

Où :

- k est le nombre d'onde,
- r_{mn} la position de l'élément unitaire,

Le *beamforming* consiste à générer un ou plusieurs faisceaux (ou "*beams*") pour diriger le signal radio selon des objectifs précis, par exemple pour desservir simultanément plusieurs utilisateurs situés à différents emplacements (figure 21). Cette technique permet d'orienter l'énergie émise ou reçue dans des directions ciblées, améliorant ainsi la couverture, la capacité et l'efficacité spectrale du système.

Dans les scénarios complexes, notamment ceux impliquant des faisceaux de puissances et de directions variées, la conception des faisceaux repose souvent sur des approches d'optimisation mathématique ou sur des techniques d'apprentissage profond, qui apprennent à générer des schémas de faisceaux à partir de données d'environnement ou de canal.

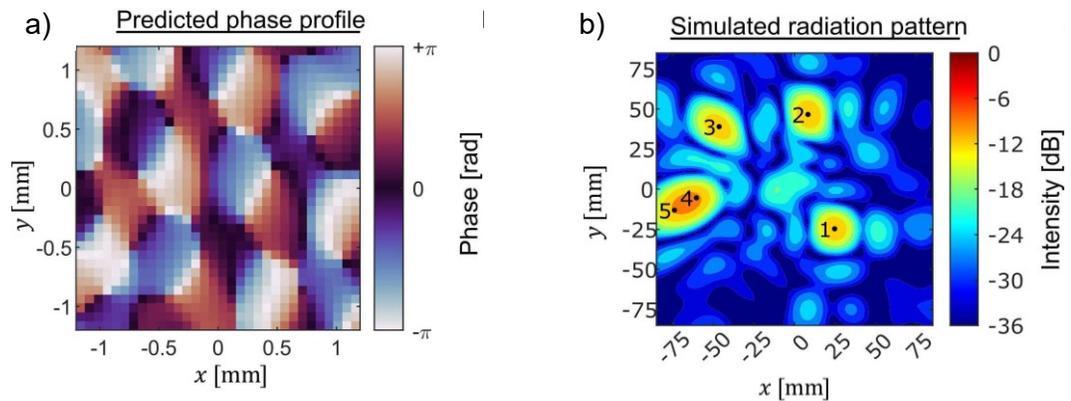


Figure 21

(a) Distribution de phase prédite (d) et diagramme de rayonnement issu de la configuration de la surface pour la formation de cinq faisceaux aux directions imposées.

Source : [34]

2.3 Paradigme de télécommunication avec les RIS

L'insertion d'un RIS dans l'environnement de propagation permet donc de modifier une partie du comportement du canal. Ainsi, comme illustré dans la figure 22, un émetteur profite de deux chemins, un direct (Tx-to-Rx) et un second généré par la configuration adéquate du RIS, qui dépend notamment de la position des acteurs du réseau.

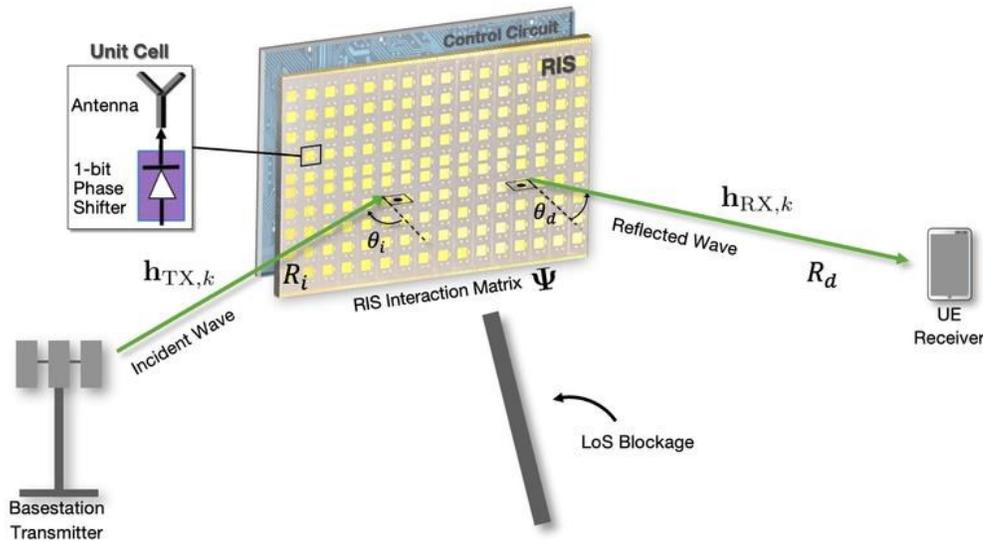


Figure 22
Chaîne de communication complète avec la création d'un lien LOS virtuel par le RIS dans un scénario avec un lien direct en ligne de vue bloqué entre l'émetteur et le récepteur.

Source : [23]

En modifiant les caractéristiques de propagation du canal sans fil, la RIS peut façonner la réponse du canal, atténuer l'évanouissement par trajets multiples et créer des conditions de propagation favorables à la transmission du signal, notamment :

- En dirigeant le signal vers le récepteur souhaité, permettant notamment de réduire les effets du blocage en créant de la diversité spatiale (figure 23.a et 23.b) ;
- En contenant ou améliorant l'effet du multichemin, par exemple en filtrant les chemins destructifs et priorisant les chemins constructifs (figure 23.b et 23.d) ; ce qui a pour effet d'améliorer le rapport signal sur interférence plus bruit (SINR) au niveau du récepteur.

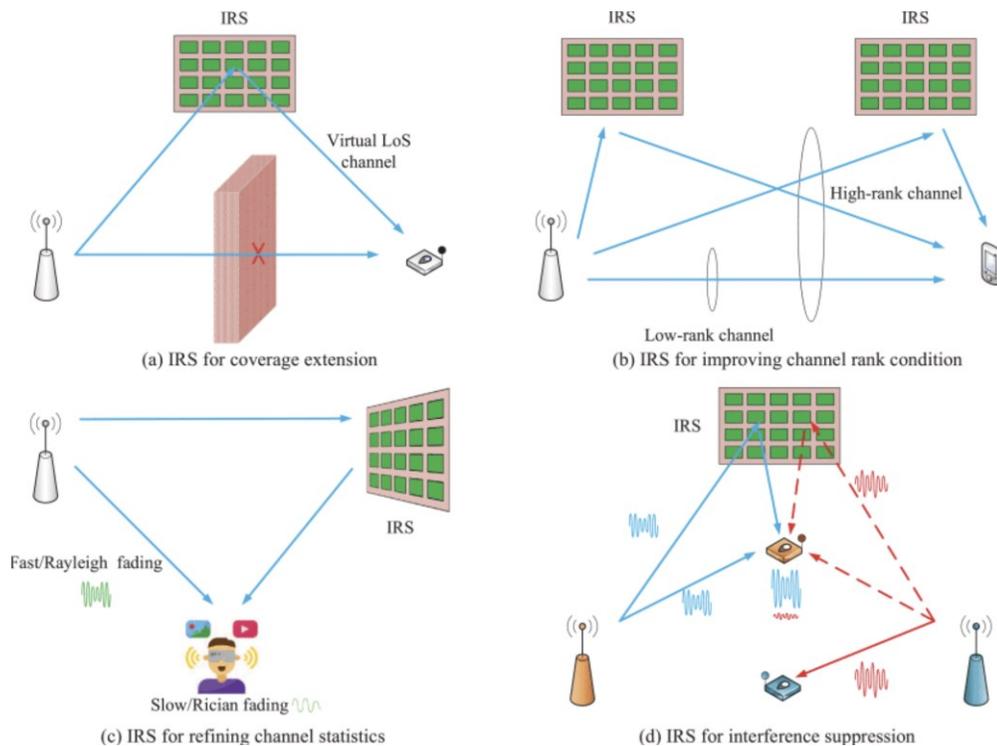


Figure 23

Chaine de communication complète avec la création d'un lien LOS virtuel par le RIS dans un scénario avec un lien direct en ligne de vue bloqué entre l'émetteur et le récepteur.

Source : [35]

Ainsi, en prenant en compte les nouveaux liens générés par le RIS, on dérive la formulation du canal complet pour un système SISO, d'après [35]:

$$H_{total} = H_{Tx,RIS} \Phi H_{RIS,Rx} (H_{Tx,Rx}) \quad (4)$$

Où Φ est la matrice de la distribution des phases des cellules unitaires du RIS, $H_{Tx,RIS}$ le canal entre le transmetteur et le RIS, $H_{RIS,Rx}$ le canal entre le RIS et le récepteur, et $H_{Tx,Rx}$ le composant optionnel selon l'existence d'un lien direct entre le transmetteur et le récepteur.

2.3.1 Modélisation du canal de propagation avec les RIS

Le modèle de propagation le plus couramment utilisé pour représenter un RIS inclut les liens Tx-RIS (transmetteur vers RIS) et RIS-Rx (RIS vers récepteur). Le lien direct

Tx-Rx (émetteur vers récepteur) est pris en compte uniquement lorsqu'il n'y a pas d'obstacles entre ces deux points.

Nous nous intéressons ici au cas de formation de faisceau dirigé, que l'on peut assimiler à une réflexion spéculaire anormale, rendue possible grâce à la configuration spécifique des déphasages des cellules unitaires du RIS. La perte en chemin (*Path Loss PL*) est modélisée par l'équation (5) [23], laquelle dépend notamment :

- De la taille du RIS (paramètres M , N , le nombre d'éléments en colonne et ligne, et d_x et d_y l'espacement des éléments) ;
- De la position relative de l'émetteur, du récepteur, et du RIS (définissant les angles d'incidence θ et de réflexion φ) ;
- Du diagramme de rayonnement des cellules unitaires (noté F).

$$PL_{farfield-beam} = \frac{16\pi^2(d_1d_2)^2}{G_t G_r (MNd_x d_y)^2 F(\theta_t, \varphi_t) F(\theta_r, \varphi_r) A^2} \quad (5)$$

Si l'on connaît la distribution des phases complète du RIS, il est possible d'approximer la perte en chemin du lien généré par le faisceau.

2.3.2 Considérations de déploiement et contraintes associées

La nécessité de planifier le déploiement d'un RIS est motivée par l'existence de nombreuses contraintes du fait que le RIS est éloigné des émetteurs et récepteurs du système point-à-point.

La contrainte la plus forte concerne l'illumination du RIS, étant donné que sa configuration est calculée en fonction d'une illumination optimale. Si l'illumination réelle diffère, par exemple si la position du transmetteur est incorrecte ou si le transmetteur ne pointe pas sur le centre du RIS, les phases appliquées par les éléments du RIS ne correspondent plus au scénario prévu. Cette erreur de correspondance provoque une erreur de pointage du faisceau ou l'apparition de lobes secondaires indésirables.

D'après l'équation (5), on remarque que la perte en chemin Tx-RIS-Rx dépend de la position relative du RIS par rapport au Tx et Rx, et on déduit que les positionnements du RIS minimisant la perte en chemin sont proches soit du Tx, soit du Rx, les pertes en chemin du système total étant multiplicatif.

En raison des limitations physiques des *reflectarrays*, l'angle total du trajet entre l'émetteur et le récepteur via le RIS (soit $\theta_i + \theta_d$, voir Figure 22) est limité par la capacité maximale de déviation angulaire des faisceaux sans perte de performance (gain, largeur de faisceau, largeur de bande), généralement estimée à 120° dans la littérature [36-38]. En plus du phénomène de déviation fréquentielle des faisceaux (*beam squint*), l'efficacité des *reflectarrays* diminue fortement lorsque les angles de réflexion deviennent élevés (au-delà de 45°). Dans ces configurations, les réflexions spéculaires parasites ainsi que les phénomènes de diffusion deviennent prépondérants, ce qui dégrade significativement la performance globale du système [39, 40].

Enfin, la contrainte de déploiement sur le site, notamment dans les lieux confinés, peut réduire les bénéfices du RIS, notamment par rapport au relais [41]. En règle générale, pour obtenir des performances similaires à celles d'un relais, un RIS avec un nombre d'éléments plus élevé (~ 200) est nécessaire [42].

2.4 La modélisation numérique d'un système de télécommunication

2.4.1 Évaluation du canal de propagation

Il existe différentes approches pour évaluer le canal de propagation. Les deux plus courantes sont les méthodes analytiques et les méthodes numériques 3D.

Les méthodes analytiques reposent sur des hypothèses généralement simplifiées, qui permettent d'obtenir de bonnes approximations et une large applicabilité. Toutefois, leur principal inconvénient réside dans leur manque de précision lorsqu'il s'agit de modéliser des environnements complexes ou des scénarios d'utilisation réalistes [23].

Les méthodes numériques 3D, telles que la technique des éléments finis (FEM), la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) ou encore les

méthodes basées sur le lancer de rayons, permettent une modélisation beaucoup plus précise du canal de propagation. Ces approches prennent en compte les caractéristiques géométriques et électromagnétiques complexes de l'environnement, ce qui les rend particulièrement adaptées aux milieux confinés et irréguliers, comme les environnements souterrains miniers.

Cependant, cette précision accrue se fait au prix d'un coût de traitement élevé, tant en termes de temps de calcul que de ressources matérielles. De plus, la mise en œuvre de ces simulations peut requérir des modèles détaillés de l'environnement, ce qui peut limiter leur applicabilité dans des contextes où peu de données sont disponibles ou lorsque des changements fréquents de la topologie du site sont observés. Concernant ce point, nous verrons plus tard qu'il est correct d'utiliser des modèles 3D simplifiés.

2.4.2 Principe de superposition

Le principe de superposition, qui s'applique directement dans un système linéaire, indique que la réponse totale à plusieurs signaux est égale à la somme des réponses individuelles de chacun des signaux pris séparément : le champ électromagnétique dans un point de l'espace correspond à la somme vectorielle des champs créés par chaque source EM. Un exemple simple est le calcul de la propagation totale dans un environnement contenant plusieurs émetteurs. Le simulateur calcule le champ produit par chaque émetteur individuellement, puis fournit à l'utilisateur le champ total résultant.

Il existe deux façons de calculer la superposition : avec ou sans cohérence. La cohérence implique que l'on prend en compte la phase des signaux (deuxième partie de l'équation 6), ce qui peut conduire à des interférences constructives ou destructives. D'un point de vue analytique, l'étude de la cohérence permet de mettre en évidence les zones d'évanouissement profond (*fading*), où les signaux se neutralisent partiellement ou totalement. L'équation 6 montre le calcul du champ total issu de la superposition du champ électrique de chacun des rayons (E_i), incluant leur amplitude et leur phase :

$$E_{total}(t) = \sum_i E_i(t) = \sum_i A_i \cos(\omega t + \varphi_i) \quad (6)$$

D'un point de vue pratique, en raison du comportement du système radio influencé par divers facteurs environnementaux et mouvements des utilisateurs, un effet de « moyennage » se produit naturellement. Ainsi, la superposition sans cohérence (c'est-à-dire en additionnant uniquement les puissances sans tenir compte des phases) est souvent préférée pour l'évaluation globale du canal (équation 7).

$$P_{total} = \sum_i P_i = \sum_i |E_i|^2 \quad (7)$$

2.5 Modélisation des RIS

L'intégration des RIS dans les systèmes de calcul numérique reste encore peu répandue. Cette situation a conduit, ces dernières années, plusieurs chercheurs à implanter des modèles de RIS dans des plateformes de simulation ou de calcul déjà existantes sur le marché. On distingue trois niveaux d'échelle de modélisation, définis en fonction du degré de modélisation et de détail retenus, et déterminés par le niveau de précision visé ainsi que par les ressources disponibles [43-45].

À l'échelle élémentaire, une modélisation fine de chaque cellule unitaire du RIS est réalisée. Comme évoqué précédemment, une surface intelligente reconfigurable est composée d'éléments rayonnants électriquement petits, le plus souvent de nature élémentaire tels que des dipôles ou des patches. L'approche la plus intuitive consisterait alors à représenter le RIS dans un logiciel de simulation comme une matrice explicite de ces éléments unitaires physiques. Cette approche permet d'atteindre un haut niveau de précision, car elle permet de prendre en compte les phénomènes électromagnétiques locaux (propriétés électriques de matériaux, couplage, pertes ohmiques), mais présente plusieurs inconvénients majeurs qui la rendent particulièrement lourde à mettre en œuvre. Tout d'abord, la configuration individuelle de la phase de chaque élément est variable et complexe, ce qui rend lourd le paramétrage dans le simulateur [46]. De plus, elle est particulièrement coûteuse en ressources de calcul : chaque reconfiguration peut nécessiter un recalcul complet de

la propagation du RIS — une tâche pratiquement irréalisable à grande échelle. La complexité de modélisation à cette échelle provient également de la compatibilité du simulateur utilisé. Utiliser un solveur onde-pleine (résolution complète des équations de Maxwell) est peu adapté pour l'objectif, car il fournit seulement le champ EM, ce qui limite les possibilités d'analyse du canal. D'un autre côté, très peu de simulateurs de propagation peuvent intégrer la modélisation physique de la cellule unitaire. Un compromis peut être réalisé en simplifiant l'intégration de la cellule unitaire par une antenne élémentaire équivalente, optionnellement intégrée au sein d'une matrice d'antenne dont la fonctionnalité est gérée nativement par le simulateur de propagation. Dans ce cas, il reste la lourdeur de configuration des matrices et le problème de la simplification.

Également, dans le cas de modélisation des RIS dans des outils de planification radio plus généralistes, comme WinProp ou Matlab, une méthode hybride permet d'améliorer localement la précision du modèle de RIS, tout en étant compatible avec les fonctionnalités de bases des simulateurs de propagations généralistes. Ainsi, le réalisme du RIS est plus fidèlement retranscrit par l'usage de son diagramme de rayonnement ou RCS, calculé au préalable par méthode onde pleine, permettant ainsi de prendre en compte :

- Des phénomènes locaux comme les pertes physiques des matériaux, et le couplage entre les éléments ;
- La sélectivité en angle et la polarisation par le diagramme de rayonnement des cellules unitaires ;
- La possibilité d'ajouter un circuit électrique, par exemple un circuit d'amplification.

Les principaux inconvénients inclus :

- La non-prise en compte des défauts d'illumination du RIS constitue une limite importante, car les simulations du diagramme de rayonnement sont généralement réalisées en espace libre. Toutefois, il est possible d'améliorer

la fidélité des résultats du diagramme de rayonnement en intégrant l'environnement proche du lien Tx–RIS dans une simulation en onde pleine.

- La non-prise en compte des chemins secondaires dans l'illumination du RIS constitue une approximation qui peut affecter l'estimation de l'énergie réellement reçue par la surface.
- L'absence de modélisation du comportement du RIS vis-à-vis des chemins secondaires peut conduire à une sous-estimation de son impact réel. Une approche plus fidèle consisterait à déterminer ces chemins secondaires via une analyse par lancer de rayons, puis à évaluer la contribution de chacun en superposant leurs effets au niveau de la surface RIS.

Enfin, une modélisation macroscopique permet de représenter la RIS comme une surface continue dotée de propriétés effectives (par exemple une matrice de réflexion ou de diffusion), ce qui réduit considérablement la complexité, mais au prix d'une perte de fidélité. Dans ce cas, le solveur doit étendre sa méthode de tracé de rayons pour tenir compte des interactions avec la surface « virtuelle ». Le projet PYRIS prend en compte le diagramme de rayonnement personnalisé (qui peut être mesuré ou simulé dans un flux de travail en onde-pleine), mais le projet n'est pas publié. Le logiciel commercial de planification Wireless InSite modélise les surfaces passives par des matrices synthétiques dont on peut configurer un profil de phase.

Tableau 3
Capacités de logiciels RF à modéliser les RIS.

Logiciel / bibliothèque / outils	Niveau de modélisation	Inconvénient
CST, ... (onde-pleine)	Cellule unitaire	Requiert une grande capacité de calcul
WithRay (RT)	Surface	Non disponible, RIS réfléchissant seulement
Sionna RT (RT)	Surface (cellule unitaire : nécessite une caractérisation préalable)	RIS réfléchissant seulement, fonctionnalités d'analyses réduites, manque de modélisation d'autres équipements radio, manque d'audit

Matlab Antenna Toolbox (hybride)	Surface et simplifié	RIS réfléchissant seulement, pas de solveur 3D pour les RIS
simRIS	Modèle simplifié	RIS réfléchissant seulement, pas de solveur 3D, simplification par modèle de canal

Dans la section 2.2, nous avons vu que le RIS propose deux modes de fonctionnement : réfléchissant et transmettant. Les projets présentés permettent uniquement de modéliser les RIS de type réfléchissant. Il sera donc nécessaire d'étendre le modèle pour prendre en compte les modes transmissif ou hybride, ce que nous présentons dans la section 3 – Méthodologie.

3. MÉTHODOLOGIE

3.1 Introduction

Nous définissons plusieurs scénarios concrets que l'on peut retrouver pendant l'exploitation d'une mine souterraine et qui mettent en exergue les principaux impairement du canal. Nous y évaluerons les indicateurs de performances clés. La modélisation des scénarios et l'évaluation des critères nécessitent l'utilisation de méthodes différentes, pour des raisons de simplifications ou des incompatibilités pratiques de modélisation.

Par exemple, l'évaluation de scénarios de dimensions très larges électriquement (très large par rapport à la longueur d'onde de la fréquence de l'onde radio étudiée, c'est-à-dire supérieures à plusieurs dizaines de fois la longueur d'onde) n'est pas réalisable par des méthodes élémentaires seulement, car la discrétisation de l'environnement entier demanderait une utilisation mémoire et un temps de calcul inenvisageables. En revanche, il est possible de considérer des solutions hybrides (entre le niveau de modélisation élémentaire et macroscopique, par exemple), permettant de prendre en compte des phénomènes locaux où cela est nécessaire, et de simplifier les zones peu détaillées ou présentant peu d'intérêt.

Dans une méthode hybride, si la fidélité de la modélisation en méthode élémentaire est acquise, il est plus difficile d'évaluer le réalisme de la modélisation 3D de l'environnement requis pour obtenir un résultat fidèle. Ainsi, comme premier sous-objectif requis pour répondre à la problématique, nous présenterons la démarche adoptée pour modéliser l'environnement.

De plus, la topologie de l'environnement, en l'occurrence les tunnels des mines souterraines, est très différente de celles des espaces libres ou même urbains, dans lesquels l'installation des RIS est plus couramment étudiée. Or, les topologies de la mine apportent une plus grande complexité, comme discuté dans la section 1. Afin de prendre en compte la topologie de l'environnement et d'obtenir une modélisation aussi fidèle que possible, la seule méthode de simulation de propagation réellement adaptée est la simulation 3D par lancer de rayons (*ray tracing*). Malheureusement,

nous constatons que la modélisation des RIS, particulièrement le RIS opérant en mode transmission, n'est pas prise en charge nativement dans les simulateurs disponibles sur le marché et éprouvés en pratique [30, 43, 46] — en dehors de certains outils de niche [43], certains non disponibles [44] (section 2.4).

Le bénéfice apporté par l'utilisation de RIS dépend de nombreux facteurs, parmi lesquels leur positionnement dans l'environnement joue un rôle déterminant. Bien que nous ne proposons pas ici de méthode de déploiement optimisée, nous introduirons deux approches de déploiement supervisé adaptées à certains scénarios. En pratique, nous verrons qu'un déploiement non supervisé présente l'avantage d'être le plus flexible et le plus adaptable à la mobilité des équipements utilisant le réseau. À l'inverse, un déploiement supervisé repose sur une connaissance préalable du canal et des équipements (caractéristiques radiofréquences, dimensions, positions), ce qui permet notamment de déterminer de manière stratégique les emplacements des RIS.

3.2 *Extension de la méthode hybride pour intégrer le RIS en mode transmission*

Nous proposons d'étendre la méthode hybride proposée dans [45] pour modéliser le comportement d'un RIS en mode transmission. Nous appliquons les étapes clés de modélisation par antenne équivalente en tenant compte des particularités du *transmitarray*, qui dispose d'une fonctionnalité de récupération de l'énergie reçue du signal frappant sa surface côté Rx, d'une fonction d'émission de l'énergie par sa surface Tx, et une fonctionnalité optionnelle de modifier le signal entre le Rx et Tx (par exemple, l'amplification).

On peut alors profiter du principe de superposition pour considérer le RIS comme un émetteur, fonctionnalité native du simulateur, qui a pour paramètres :

- Sa puissance d'émission, qui dépend de l'énergie reçue à sa surface et au gain côté Rx ;
- Son diagramme de rayonnement, qui correspond à la réponse du RIS selon la configuration donnée et son illumination, correspondant au côté Tx du diagramme de rayonnement.

La figure 24 schématise les étapes nécessaires au déroulement de la méthode hybride. La section en jaune correspond à la partie en simulation onde-pleine, permettant de simuler le comportement de la surface seule. Une fois cette étape préalable réalisée, le résultat de la section jaune est intégré dans les étapes suivantes utilisant la méthode de tracé de rayon permettant de prendre en compte un modèle plus fidèle de l'environnement en 3D.

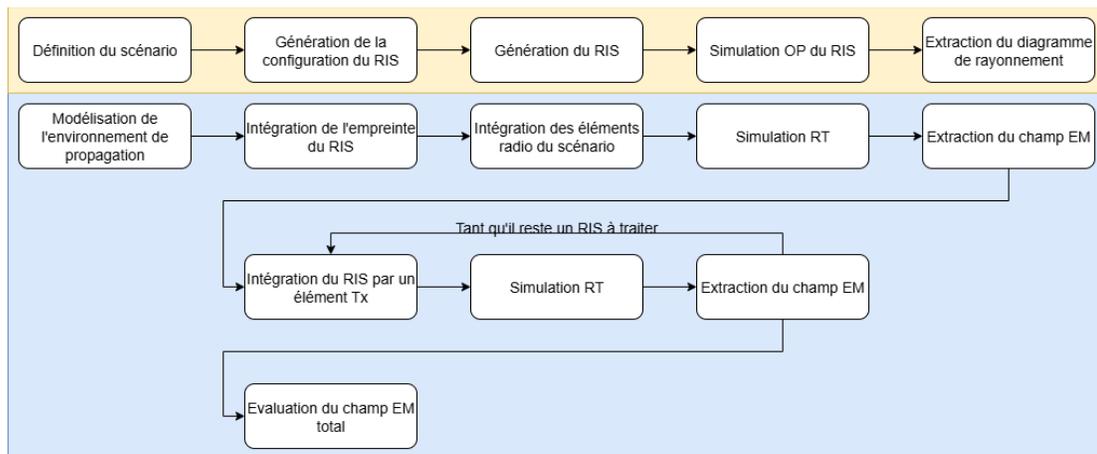


Figure 24
Diagramme de flux présentant les étapes de déroulement de la méthode.

3.2.1 Conception et évaluation des RIS en onde pleine

3.2.1.1. Conception des sources RF

Il est tout d'abord nécessaire de simuler le comportement du RIS dans une configuration spécifique de type transmetteur–RIS–récepteur (Tx–RIS–Rx), afin d'en extraire le diagramme de rayonnement résultant. Bien qu'il soit courant de modéliser l'illumination du RIS à l'aide d'une onde plane — approximation acceptable en champ lointain —, nous privilégions ici une modélisation physique explicite de la source émettrice, dans le but de reproduire fidèlement les conditions d'illumination réelles.

La littérature scientifique évalue généralement les performances des RIS dans des conditions optimales en utilisant une source directive, typiquement une antenne cornet, afin de concentrer l'énergie incidente sur la surface reconfigurable. Toutefois, dans les déploiements réels, l'utilisation d'antennes cornets demeure rare en raison

de leur encombrement et de leur directivité élevée, qui compliquent la génération d'un lien efficace entre l'émetteur et le récepteur.

Dans cette optique, les antennes omnidirectionnelles — plus compactes, polyvalentes et couramment intégrées dans les équipements — constituent une alternative pragmatique. Nous proposons ainsi de comparer les schémas d'illumination du RIS obtenus respectivement à partir d'une antenne directive (type cornet) et d'une antenne omnidirectionnelle, en vue d'évaluer la robustesse et la pertinence du fonctionnement du RIS dans des conditions réalistes d'implantation.

a. Antenne cornet directive

Une antenne cornet est constituée d'un guide d'ondes alimenté par une source RF (zone rouge dans la figure 24) qui s'élargit progressivement pour former un cône ou une pyramide. Les dimensions en largeur du guide d'onde connectant la source RF définissent la fréquence de fonctionnement de l'antenne. La directivité ou largeur du faisceau est configurable par la longueur du cône ou de la pyramide.

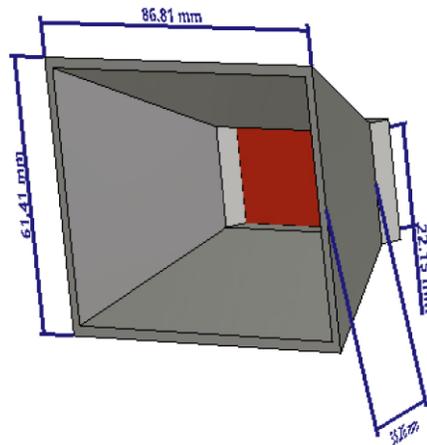


Figure 25
Modèle d'antenne cornet utilisé pour illuminer les RIS.

Nous nous appuyons sur les dimensions d'une antenne cornet de type DRG-118/A, utilisée au sein du laboratoire, dont les caractéristiques ont été optimisées à l'aide du

solveur électromagnétique intégral CST. Cette optimisation vise à atteindre une directivité supérieure à 12 dBi ainsi qu'une largeur de faisceau d'environ 60°.

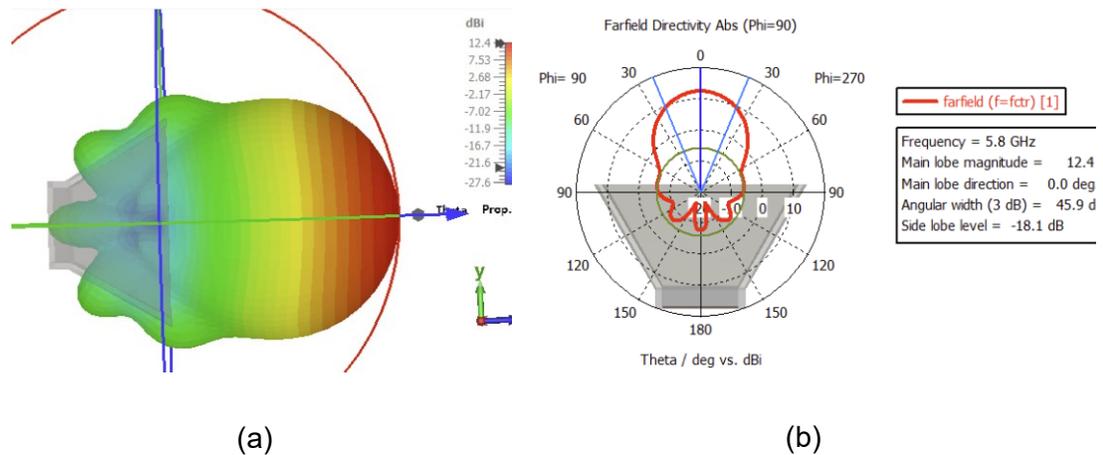


Figure 26
Diagramme de rayonnement de l'antenne cornet.

b. Antenne omnidirectionnelle dipôle

Un dipôle est généralement constitué de deux brins conducteurs (ou bras), de longueur égale, alimentés au centre par une source RF. Le diagramme de rayonnement simulé présente une directivité d'environ 2.3 dBi, en accord avec les valeurs théoriques attendues.

Ses dimensions sont optimisées via le solveur pour maximiser son coefficient de réflexion, inférieur à 20 dB à 5.8 GHz (figure 27) pour assurer une très bonne adaptation.

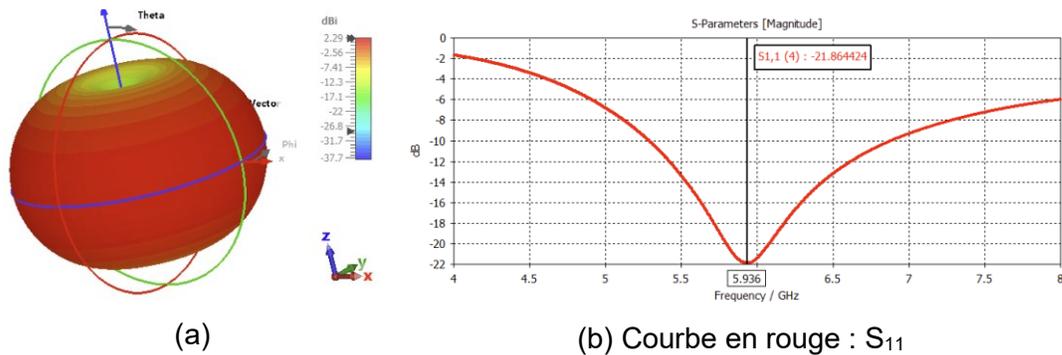
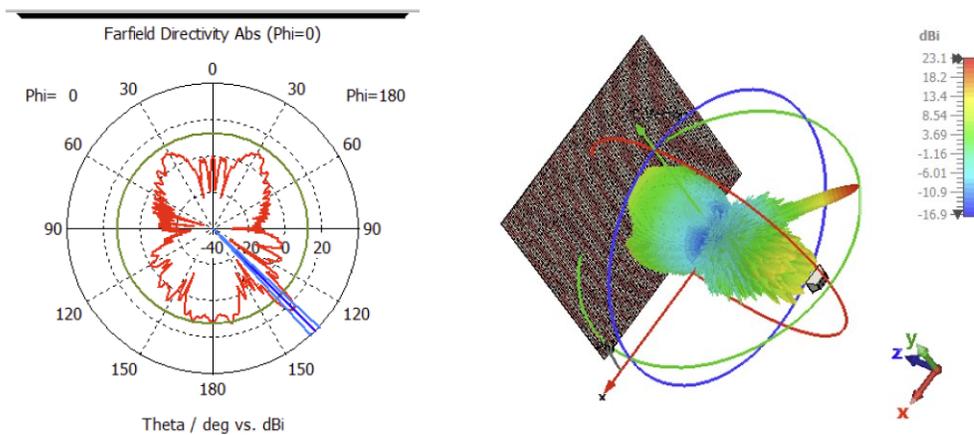


Figure 27
Résultat de simulation de l'antenne dipôle.

3.2.1.2. Validation de l'illumination des RIS par les deux sources RF

Nous évaluons les performances des surfaces RIS dans deux configurations d'alimentation en espace libre : à partir d'une source directionnelle et d'une source omnidirectionnelle. Dans la littérature, l'évaluation repose majoritairement sur une source directionnelle, ce qui permet de mettre en évidence la capacité des surfaces à former et orienter un faisceau.

Cependant, ce scénario reste peu représentatif des conditions réelles, dans lesquelles les équipements mobiles sont le plus souvent munis d'antennes omnidirectionnelles, afin de limiter les contraintes liées à leur positionnement.



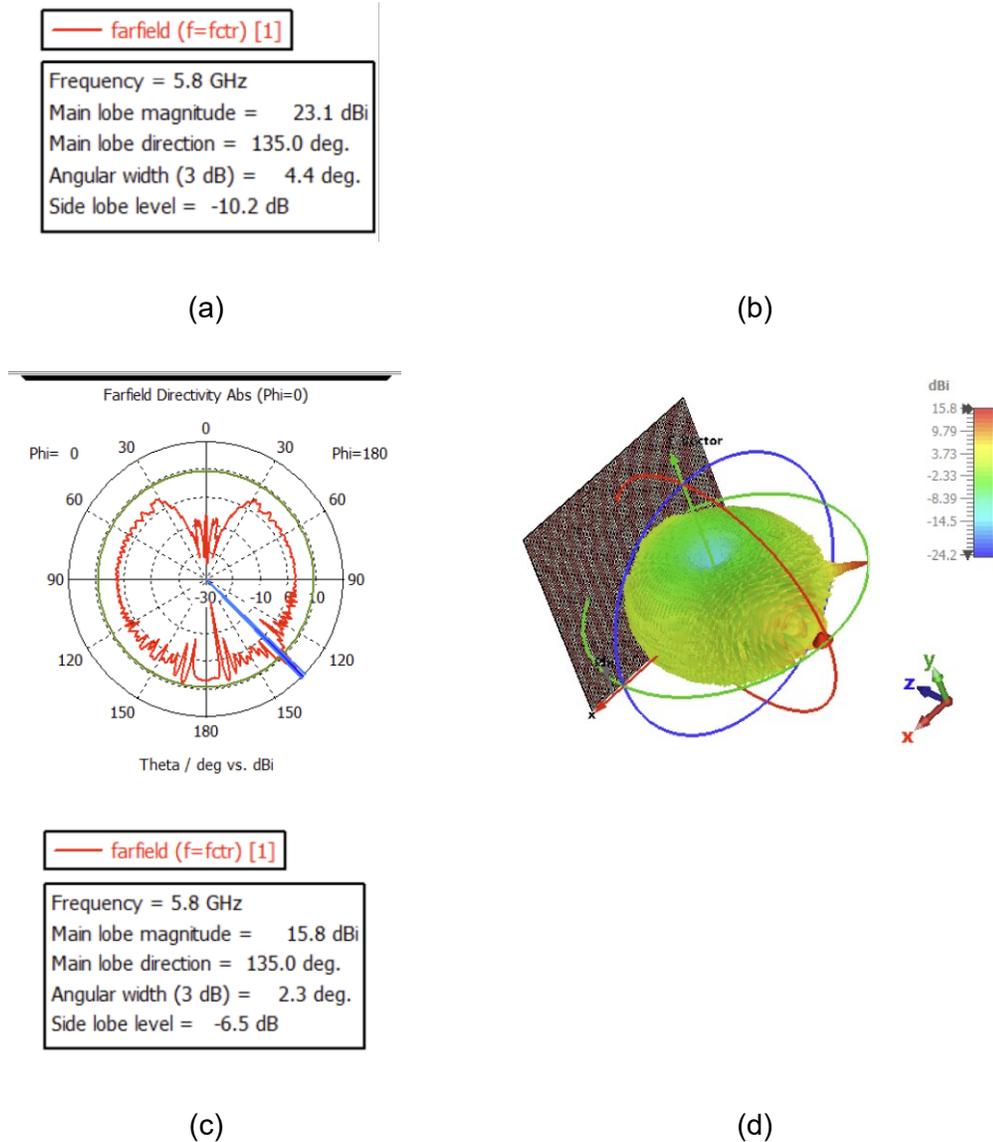


Figure 28

Diagramme de rayonnement lorsque le RIS est illuminé par l'antenne cornet directionnelle (a) détail de la coupe pour $\varphi=0^\circ$, (b) 3D ; et par l'antenne dipôle omnidirectionnelle (a) détail de la coupe pour $\varphi=0^\circ$, (d) 3D.

On observe bien, pour les deux types d'illumination, un faisceau orienté à 45° (relatif à l'angle d'incidence de l'illumination, orthogonale à la surface).

Dans le cas de l'illumination directive, la concentration de l'énergie dans le faisceau permet de réduire le niveau des lobes secondaires, et d'augmenter le gain du faisceau

de 10.7 dB. Ce n'est pas un niveau optimal : on remarque un important lobe orthogonal à l'angle d'illumination qui impacte le faisceau utile. Cela indique une certaine désadaptation, qui peut provenir de plusieurs facteurs :

- L'erreur liée intrinsèquement à la quantification (ici 1 bit);
- L'erreur liée aux dimensions de la cellule unitaire : la réponse en phase ne couvre pas totalement 2π ;
- La désadaptation entre la configuration de la surface et le positionnement de l'antenne et son diagramme de rayonnement (la distribution des chemins sur chacune des cellules unitaires);
- Les erreurs de discrétisation du maillage de la simulation complète, même si nous choisissons les paramètres de maillage pour suréchantillonner le domaine.

Le gain en directivité est plus marqué pour l'illumination par une antenne omnidirectionnelle : à partir d'une source à 2.3 dBi, il est possible de réaliser un faisceau de 15.8 dBi. On observe une réduction de la largeur du faisceau, ce qui peut ne pas être pertinent en pratique, car en cas d'erreur d'estimation de la position de la cible vers laquelle le faisceau est dirigé (ce qui est très plausible dans notre contexte environnemental), une erreur de quelques degrés peut suffire pour que la cible ne soit plus couverte. Ainsi, il sera très probablement nécessaire d'optimiser la configuration des phases avec d'autres méthodes (cf. section 2.2.2.2) afin d'augmenter la largeur du faisceau, au prix d'une directivité réduite.

Même si, généralement, dans la littérature, les *reflectarrays* fonctionnent conjointement avec des antennes directives, ces deux simulations permettent de valider l'utilisation d'une source d'illumination omnidirectionnelle.

3.2.2 Évaluation du système complet en tracé de rayon

Nous pouvons donc aborder l'étape suivante de notre flux de travail en nous consacrons à la partie propagation.

- a) Étape 1 : considération du champ électrique issu de l'émetteur

La première étape consiste à obtenir le champ électrique issu de l'émetteur. Ainsi, le solveur de tracé de rayon calcule les chemins de propagations ayant pour origine l'émetteur. Il est possible de vérifier qu'il existe un chemin de propagation, optionnel, vers le récepteur dans le scénario considéré.

Il est nécessaire de vérifier l'existence d'un chemin de propagation vers le RIS, ou le premier RIS d'un chainage de RIS. En effet, si aucun chemin n'existe, alors le RIS ne peut pas contribuer au système ($H_{Tx,RIS} = 0$) et le système complet $H_{Tx,RIS,Rx}$ n'est pas réalisable. Dans le cas contraire, c'est-à-dire si l'établissement du chemin Tx-RIS s'avère impossible dans l'environnement et le scénario considérés, la méthode ne peut pas être poursuivie.

Contrairement à un RIS réfléchissant, un RIS en mode transmission n'a pas vocation à être adossé à un support physique. Afin de prendre en compte son empreinte physique dans la simulation du lien Tx-Rx (les rayons ne doivent pas traverser la surface), nous modélisons le RIS comme une surface absorbante à l'aide d'un matériau virtuellement quasi parfait [47]. Dans ce cadre, le RIS est considéré comme un obstacle bloquant toute transmission et réflexion.

Tableau 4
Définition des paramètres électriques de l'absorbant "parfait".

Paramètres empiriques	Valeur
Pertes en transmission	60 dB
Pertes en réflexion	60 dB
Pertes en diffraction	60 dB

La simulation est exécutée dans le simulateur de propagation dont le champ électromagnétique calculé correspond au lien Tx-Rx (s'il existe).

Les étapes 2a et 2b sont déroulées pour chaque RIS du scénario considéré. Dans le cas de chainage de RIS, on considérera l'ordre de traitement selon la proximité du

RIS avec le transmetteur, en commençant par le premier RIS directement illuminé par le transmetteur.

b) Étape 2a : Considération de l'énergie reçue à la surface

On enregistre la distribution de l'énergie reçue (en V/m) à la surface du RIS virtuel (l'empreinte absorbante) pour mesurer la puissance de l'énergie reçue.

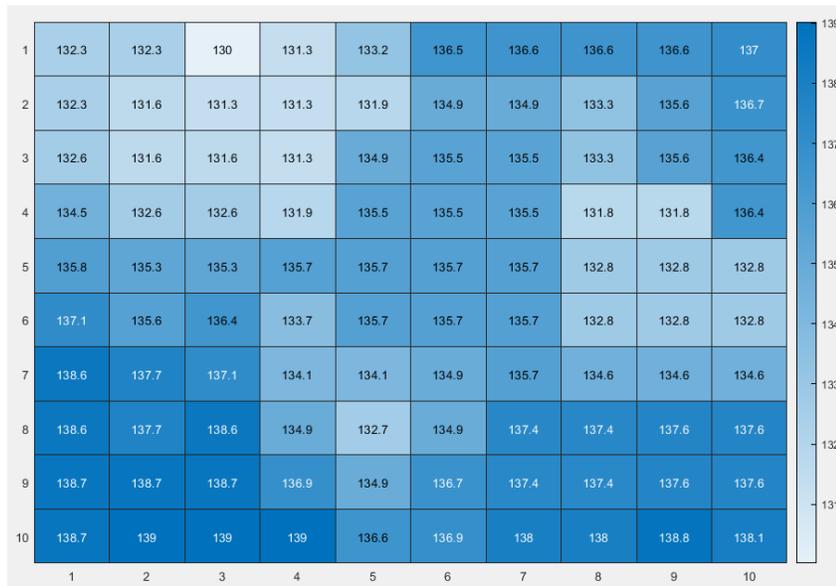


Figure 29
Exemple d'échantillonnage de l'intensité du signal reçu sur la surface d'un RIS (en V/m), permettant de calculer (8).

Pour ce faire, la face est discrétisée en $N \times M$ cellules de taille de la cellule unitaire repose pour le RIS (généralement, autour de $\lambda/2$), et la valeur du champ électrique est lue au centre de chacune des cellules, comme illustré dans la figure 28.

La puissance totale absorbée par le RIS, via les chemins de propagation calculés par le solveur de lancer de rayon, est ensuite déterminée par l'équation (8) [45]:

$$P_{total} = \frac{1}{2\eta_0} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |E_{i,j}|^2 \Delta S \quad (8)$$

c) Étape 2b : Considération du diagramme de rayonnement côté Rx

Le RIS en mode transmission présente également un diagramme de rayonnement côté Rx, qu'il est essentiel de prendre en compte. Or, la modélisation initiale par une surface virtuelle absorbante (étape 1) ne tient pas compte de la configuration réelle du RIS côté Rx. Ainsi, pour estimer la puissance effectivement récupérée P_r (équation 9) par la surface, on s'inspire de l'équation des télécommunications, en intégrant les caractéristiques de rayonnement simulées côté Rx.

$$P_r = P_t G_t(\theta_t, \phi_t) G_r(\theta_r, \phi_r) \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (9)$$

Puissance équivalente recherchée

Ces deux termes sont déjà calculés par le tracé de rayon (inclue dans la mesure de l'énergie sur la surface du RIS)

Cette approximation montre qu'il suffit d'ajouter le gain du diagramme de rayonnement (G_r dans (9)) du côté Rx pour calculer la puissance réellement absorbée par le RIS.

Pour cela, on considère le chemin principal calculé par le solveur de lancer de rayons d'origine Tx qui frappe le RIS en son centre. On lit sur le diagramme de rayonnement côté Rx le gain de l'antenne aux angles θ_r et ϕ_r correspondant à l'angle d'arrivée du chemin principal sur le RIS.

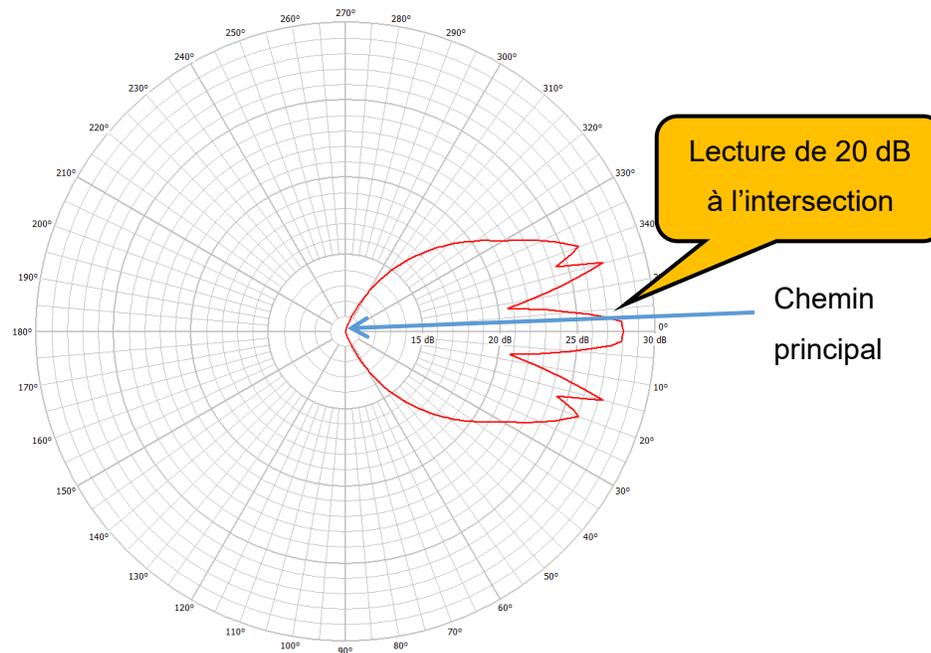


Figure 30
Diagramme de rayonnement simplifié du prototype LATYS FOCUS ($\varphi=0^\circ$)
réalisé sous Aman (suite Altair Feko).

À présent, la puissance d'émission de l'antenne équivalente au RIS est connue.

d) Étape 2b : Considération du diagramme de rayonnement côté Tx

Une fois l'empreinte physique du RIS prise en compte, la surface est supprimée et remplacée, en son centre, par un émetteur natif. À l'instar du RIS en mode réflexion, le diagramme de rayonnement du côté Tx du RIS préalablement simulé en plein-onde, est appliqué comme diagramme de rayonnement de cet émetteur équivalent.

3.3 Création, simulation des cellules unitaires et simulation du RIS complet

Dans le cadre de la méthode hybride, et pour étudier les différents points d'utilisation des RIS (type alimentation RF, erreurs d'illumination), il est nécessaire de créer et de simuler les cellules unitaires qui seront intégrées dans une matrice.

La portée du mémoire n'étant pas sur la création et l'optimisation de la cellule unitaire dynamique, notre choix se porte sur la simulation de type de cellule de bases

statiques, c'est-à-dire non reconfigurables : une antenne patch traditionnelle et une cellule en diélectrique. Cette dernière approche permet une meilleure maîtrise des coûts ainsi qu'une fabrication simplifiée par impression 3D, notamment à l'aide de PLA ou d'ABS. Cela nous permet de nous affranchir de l'intégration de composants actifs et de lignes de polarisation dans une surface RIS, nécessitant une grande précision et une excellente reproductibilité, et où toute imprécision peut altérer la réponse en phase des éléments. Pour la suite, d'après notre expérience, il est recommandé de confier la fabrication complète (impression du circuit imprimé et montage des composants) à un service spécialisé. Cela représente un coût estimé à environ 3000 CAD pour un prototype de 20×20 cellules (soit une surface d'environ $0,011 \text{ m}^2$ à 28 GHz, ou $0,25 \text{ m}^2$ à 5,8 GHz). De plus, cette approche permet de comparer l'efficacité des RIS et des surfaces statiques dans certains scénarios (voir Scénario 5), en tant que méthode de déploiement hybride, afin d'optimiser les coûts de mise en œuvre d'une telle solution dans l'environnement cible.

La figure 31 schématise le flux de travail pour la simulation en onde plane d'une surface intégrant des cellules unitaires de conception arbitraire.

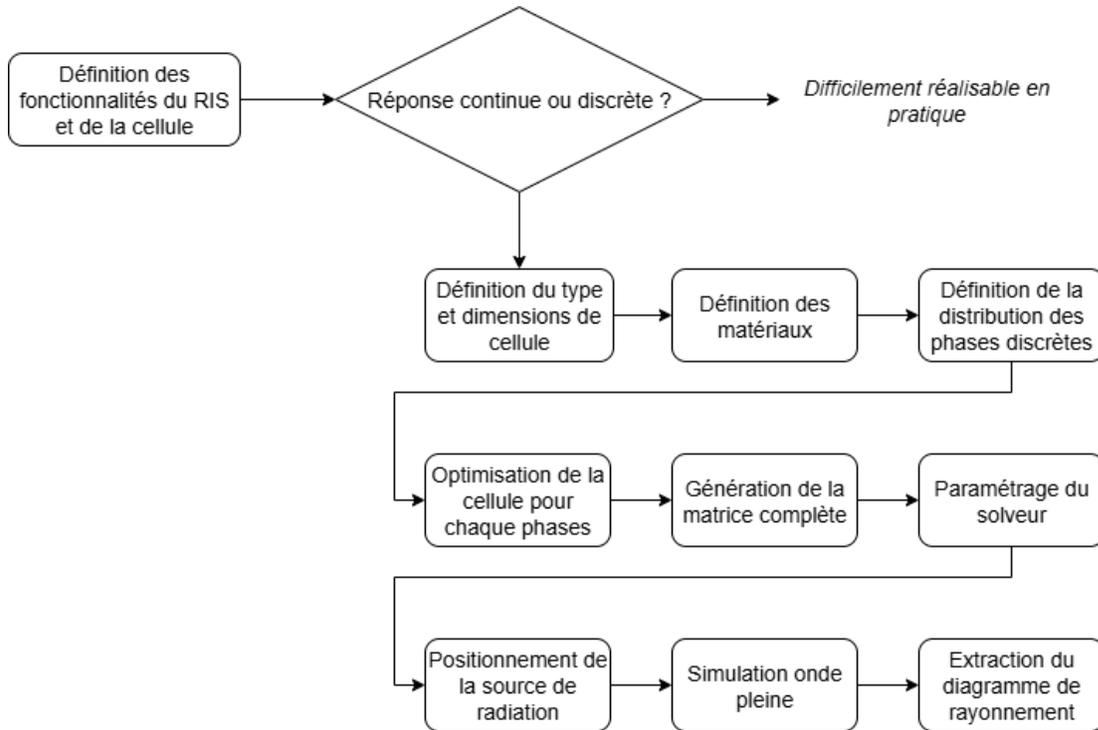


Figure 31
Flux de travail pour la simulation d'une configuration d'un RIS avec une conception personnalisée de cellule unitaire simulée en onde-pleine.

Après avoir défini la fréquence de travail, une cellule unitaire est conçue sous CST Studio pour intégrer une réponse de phase de référence. Ses dimensions initiales avant optimisation sont définies selon la théorie associée à chaque type de cellule.

Plusieurs études traitent des propriétés électriques des matériaux PLA et ABS dans le contexte de l'impression 3D, en soulignant que certains paramètres tels que la méthode d'impression et la densité de remplissage influencent également ces propriétés [48]. Dans ce travail, nous retenons une densité de remplissage de 100 % (structure solide), car les motifs d'impression associés à des densités inférieures devraient être modélisés explicitement dans chaque cellule 3D afin de refléter fidèlement leur influence, ce qui alourdirait considérablement la modélisation. D'après les propriétés diélectriques du PLA utilisées pour la simulation, définies dans le tableau 5, le plus grand inconvénient de l'utilisation de ce matériau est le facteur de dissipation $\tan\delta$, assez élevé à cette fréquence.

Tableau 5
Propriétés diélectriques du PLA utilisées pour la simulation.

Propriété	Description	Valeur
ϵ_r	Permittivité relative ou constante diélectrique	2.75
μ	Perméabilité magnétique	1 (toujours 1 dans les simulations, certains solveurs n'utilisant pas ce paramètre pas important dans notre cas d'étude)
$\tan\delta$	Facteur de pertes du matériau selon la fréquence (doit être le plus faible possible)	0.0225 @ 5.8 GHz

Source : [48]

L'objectif étant de couvrir un intervalle discret de phases sur $[0, 2\pi]$, nous paramétrisons les dimensions et exécutons l'optimiseur de CST pour générer les dimensions adaptées.

La réponse en phase est vérifiée pour les deux états possibles (1/0). La figure 32 montre que la configuration géométrique de la cellule, soit la hauteur du diélectrique, permet d'obtenir ces phases, pour un écart total se rapprochant de 360° (321.54°) :

- -162.58° pour la configuration de la cellule à l'état 0;
- 158.96° pour la configuration de la cellule à l'état 1.

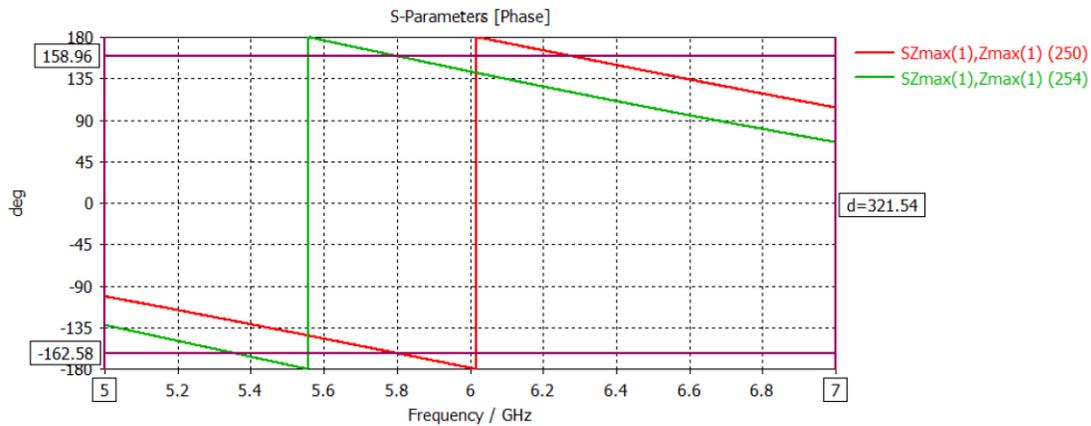


Figure 32
Paramètres S_{11} simulés pour les deux états de la cellule unitaire (vert : état 1, rouge : état 0).

Les configurations des cellules sont ensuite vérifiées dans un contexte de simulation de contrôle de directivité du faisceau par une matrice complète de 35x35 cellules unitaires illuminée par une source directionnelle positionnée dans l'espace selon le scénario considéré.

Une fois les dimensions fixées, la distribution des phases au sein de la matrice est calculée à l'aide de la méthode de la lentille. Pour cela, nous développons un script MATLAB prenant en entrée les dimensions physiques du RIS. Cette méthode fournit une solution optimale en phase continue, ce qui reste irréalisable en pratique (cf. état de l'art). La distribution des phases continue calculée par le script est ensuite discrétisée selon un niveau de quantification défini par l'utilisateur, puis la matrice est enregistrée dans un fichier texte.

Nous développons une macro utilisable par le logiciel de simulation onde-pleine CST Studio 2024 permettant, à partir de la définition des états programmes de cellules unitaires et de la distribution de phase ciblée générée par le script MATLAB dans un fichier, de construire le modèle 3D de la matrice.

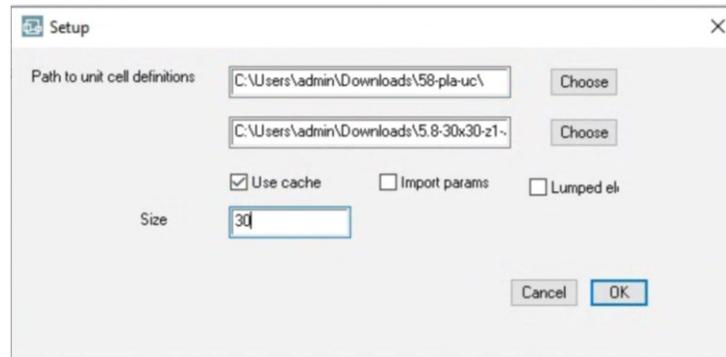


Figure 33
Interface graphique réalisée sous CST, qui permet de sélectionner les paramètres au lancement de la macro du générateur de la matrice.

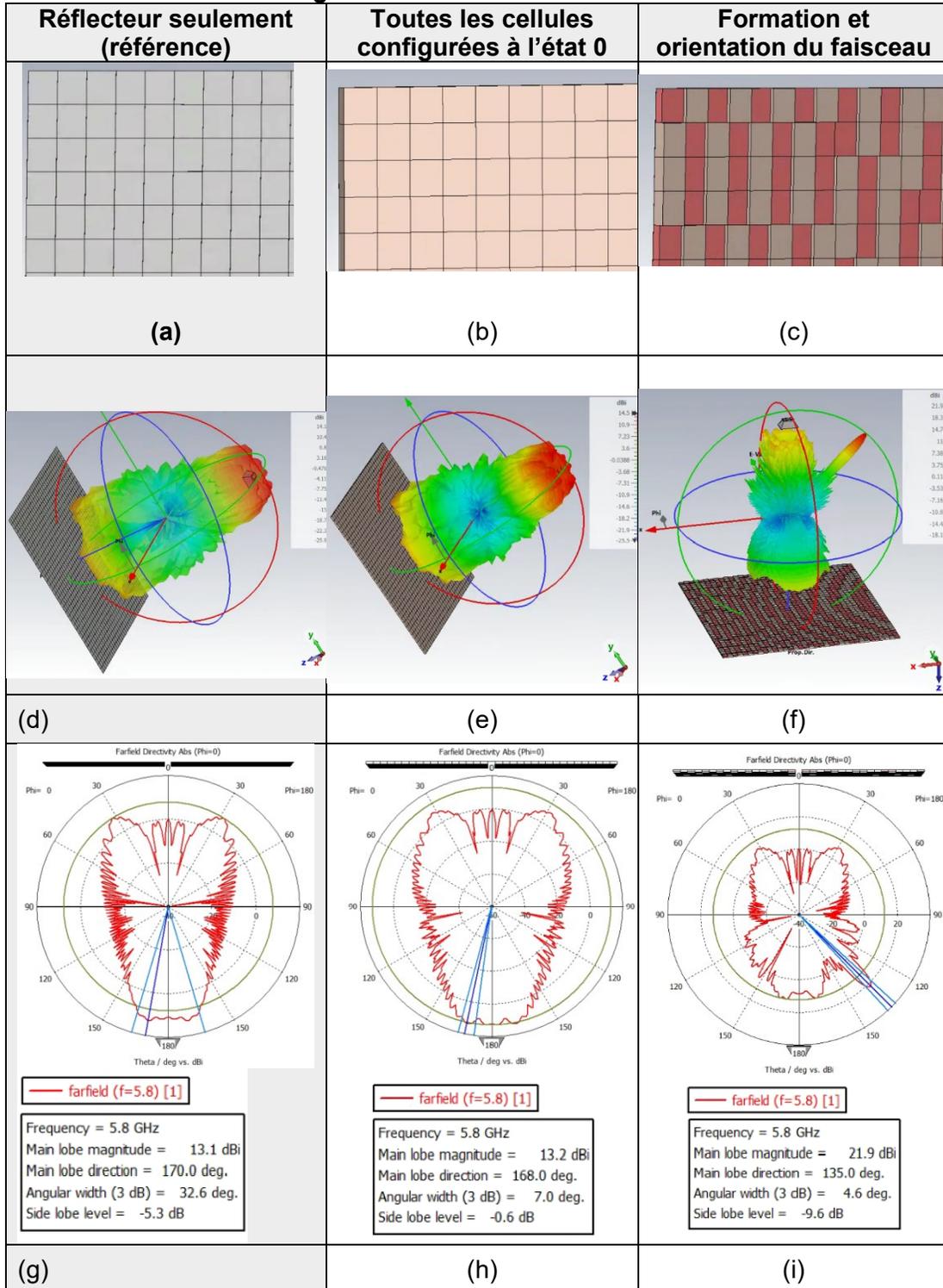
Pour prendre en compte les effets de l'illumination par une antenne directive, nous modélisons une antenne cornet reprenant les dimensions de l'antenne de référence utilisée au laboratoire qui est excité par un guide d'onde (cf. 3.2.1.1).

La simulation en onde pleine utilise le solveur en domaine temporel de CST Studio 2024. Pour réduire le temps de simulation, l'adaptation du maillage est désactivée, ce qui requiert une configuration et une vérification manuelle de la résolution du maillage.

Nous définissons un scénario mettant en œuvre l'antenne directive, orientée orthogonalement et centrée sur la surface. La distribution de phase est générée de manière à orienter le faisceau à 45° .

Afin de vérifier la capacité de formation de faisceau, nous comparons les diagrammes de rayonnement simulés pour les trois configurations définies dans le tableau 6 :

Tableau 6
Simulation des trois configurations de RIS.



La première ligne du tableau présente le détail de la configuration du RIS :

- Une surface en conducteur parfait est utilisée comme référence ;
- Pour valider le fonctionnement du RIS en mode réflecteur régulier, la distribution des cellules est fixée à l'état 0 sur l'ensemble de la surface ;
- Enfin, une distribution spécifique appliquée pour permettre la formation d'un faisceau dirigé à 45°.

Les diagrammes de rayonnement (Tableau 6.d,e,g,h) permettent de valider un comportement assurant une réflexion spéculaire, aussi bien avec un réflecteur parfait qu'avec un RIS configuré en mode réflecteur régulier. Dans ce dernier cas, on observe la formation d'un faisceau très faible. Ce phénomène peut s'expliquer par plusieurs facteurs :

- Une phase non optimale appliquée à chaque cellule ;
- L'effet de l'interface entre le diélectrique et le conducteur parfait ;
- Divers phénomènes liés au volume de la structure.

3.4 Modélisation de l'environnement de propagation

Étant donné que nous utilisons un solveur basé sur une méthode 3D, la manière dont l'environnement de propagation est modélisé a un impact significatif sur les résultats de simulation. Cependant, il est difficile d'évaluer le niveau de réalisme requis pour que cette modélisation 3D produise un résultat fidèle.

Il est naturel de penser qu'un environnement très détaillé — par exemple avec un maillage de taille très fine par rapport à la longueur d'onde — garantirait une meilleure fidélité. Toutefois, dans le cas de scénarios de grande dimension (plusieurs dizaines de mètres), cela entraîne une charge de calcul très élevée.

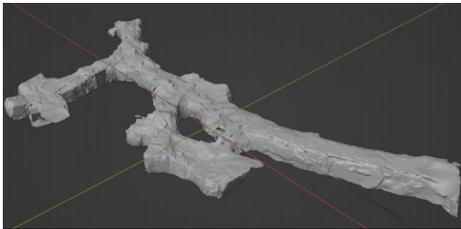
Afin d'obtenir un modèle de référence, nous avons réalisé une campagne de scan 3D d'une section représentative de la mine de la Cité de l'Or à l'aide du capteur LiDAR d'un iPhone 13 Pro Max. Ce capteur offre une précision satisfaisante (< 3 cm [49]),

pour un coût réduit et une plus grande accessibilité qu'un outil de mesures LiDAR traditionnel.



Figure 34
Illustration de la campagne de scan avec le téléphone comme scanneur.

Le modèle 3D complet obtenu à partir du scan reflète fidèlement la rugosité et l'irrégularité des parois, comme le montre la figure 35.a,b,c. Il comporte certaines discontinuités, correspondant à des sections manquantes, qui devront être corrigées. De plus, l'utilisation des capteurs inertiels du scanner permet de prendre en compte la différence de niveau tout au long du scan.



(a)



(b)



(c)

Figure 35
Vues du modèle 3D complet, après avoir assemblé les sections scannées.

À partir de ce scan de référence, nous proposons d'évaluer la fidélité de modèles simplifiés dérivés du modèle complet. L'objectif est double : réduire l'empreinte de calcul des simulations tout en allégeant la complexité de manipulation des données 3D (assemblage des morceaux de scan, correction des points aberrants, reconstructions des zones manquantes). En effet, bien que le modèle complet obtenu par LiDAR offre un haut niveau de détail, son utilisation directe dans les solveurs 3D implique des coûts en mémoire et en temps de calcul très élevés, surtout pour des scènes de grandes dimensions.

La démarche consiste donc à extraire de ce modèle complet plusieurs versions simplifiées (figure 36), en appliquant différentes techniques de réduction de complexité géométrique : simplification, décimation de maillage, lissage et suppression de détails non critiques.

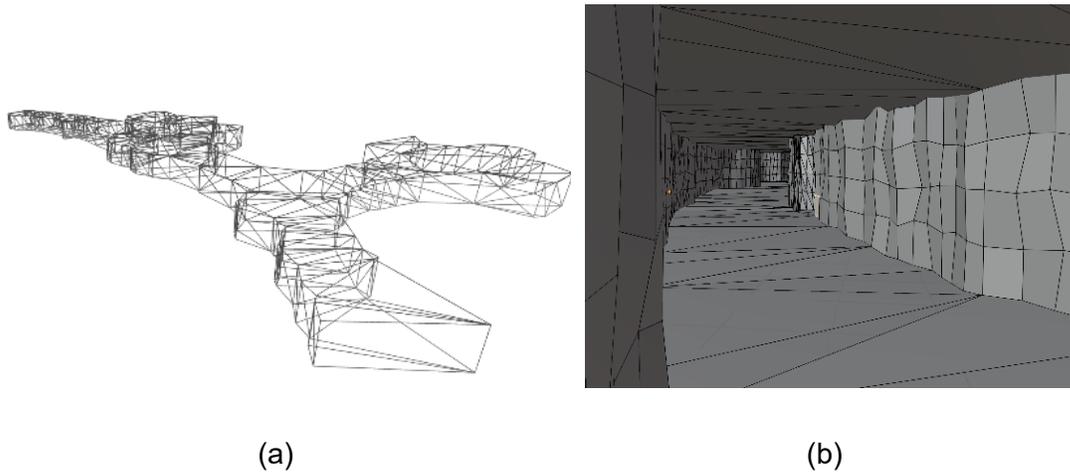


Figure 36
Modèle simplifié et simplifié avec application de la rugosité aléatoire sur les parois.

L'utilisation d'un second modèle 3D simplifié avec les parois plates altérées par un processus aléatoire pour simuler une certaine rugosité de la paroi (figure 36.b) est proposée pour étudier l'effet de la rugosité ou de l'irrégularité des parois (d'après [9, 50]).

Chaque version sera ensuite utilisée dans des simulations électromagnétiques, et les résultats obtenus (RSSI) seront comparés à ceux issus de la campagne de mesure expérimentale menée par Ali Khalaf [51]. Cela permettra d'identifier le niveau de simplification acceptable au regard des écarts de performances, et d'atteindre un compromis pertinent entre fidélité physique et efficacité numérique.

3.4.1 Choix des paramètres de simulation pour le lancer de rayons

À ce jour, aucune méthode standardisée ne fait consensus dans la littérature concernant le choix des paramètres de simulation du lancer de rayons, notamment en ce qui concerne le nombre d'interactions entre les rayons et l'environnement. Néanmoins, certaines recommandations générales peuvent être suivies :

- La majorité des logiciels de simulation adoptent par défaut un nombre d'interactions jugé suffisant pour des scénarios standards, égal à trois ;

- Ce nombre doit toutefois être augmenté dans le cas de scènes complexes [15], en particulier celles comportant de nombreuses courbures ou des géométries irrégulières, comme c'est le cas dans nos simulations.

Les paramètres liés au nombre d'interactions dans une simulation de lancer de rayons jouent un rôle déterminant, car ils conditionnent la terminaison de la simulation. Un nombre d'interactions trop faible peut empêcher certains rayons d'atteindre des zones pourtant couvertes dans la réalité, ce qui conduit à une interprétation erronée des résultats — notamment par la détection de faux positifs de zones supposées non couvertes.

À l'inverse, un nombre d'interactions trop élevé induit deux problèmes majeurs :

- Une augmentation exponentielle de la complexité des calculs, tant en temps qu'en mémoire, ce qui devient particulièrement contraignant lorsqu'un modèle 3D détaillé de l'environnement est utilisé ;
- La génération de trajets dits "inutiles", c'est-à-dire de chemins associés à des pertes supérieures à 150 dB, proches du bruit de fond, et donc non significatifs du point de vue de la couverture radio. Dans ce cas, il est nécessaire de définir des critères d'arrêt supplémentaires.

Pour déterminer un nombre d'interactions plus adapté et pertinent à un environnement donné, nous proposons une méthode basée sur la convergence de la stabilité de la couverture radio comme critère de sélection. Soit un intervalle de valeurs réalisables de nombre d'interactions dans la simulation. La couverture radio est calculée pour chaque valeur d'interaction dans l'intervalle définie. À chaque itération, la différence de couverture entre les itérations i et $i-1$ est mémorisée afin d'évaluer un critère de stabilité. Lorsque ce critère devient en dessous d'une valeur seuil — ou que le nombre maximal d'interactions est atteint — le nombre d'interactions optimal est considéré comme trouvé.

3.5 Méthode de déploiement des RIS pour la suppression des chemins destructifs

Nous proposons une méthode de déploiement des surfaces RIS visant à identifier les positionnements les plus profitables dans l'environnement dans le cadre de mitigation des chemins destructifs causés par la topologie de l'environnement. Cette approche permet d'agir de manière ciblée sur les trajets de propagation couvrant une zone cible identifiée.

L'algorithme utilise le principe de la superposition des chemins cohérente pour identifier les chemins destructifs.

```

Sélectionner une zone dont la couverture est à améliorer
Calculer les chemins de propagation depuis le Tx vers un ensemble de points
sélectionnés aléatoirement dans la zone
Pour chacun des points
    Pour chacun des chemins de Tx vers ce point
        Calculer la somme cohérente des chemins (eq qq)
        Si la somme diminue, marquer le chemin comme destructif
Trouver des clusters à partir des points d'interaction des chemins avec
l'environnement
Placer les RIS absorbants aux centres des clusters sur la paroi de l'environnement.

```

Figure 37
Pseudocode de l'algorithme de placement des RIS pour mitiger les chemins destructifs.

3.6 Méthode de déploiement des RIS dans un environnement confiné

La méthode de déploiement que nous proposons cible les environnements confinés, dans lesquels les effets indésirables du canal — tels que l'effet d'ombre, les pertes de visibilité directe et les interférences liées aux trajets multiples — sont souvent amplifiés. Cette approche vise à améliorer la robustesse de la couverture radio dans de tels contextes.

L'objectif est de réallouer une partie de l'énergie issue de zones peu critiques vers des zones présentant des perturbations de propagation, grâce à la sélection d'un

positionnement et à la configuration du RIS. Cette approche cherche également à limiter les effets indésirables du placement du RIS sur les autres zones sensibles.

Pour ce faire, nous prenons connaissance des chemins issus de l'émetteur et servant un nombre de points dans les zones d'intérêts. Les zones d'interactions de ces chemins avec l'environnement permettent de définir celles qui ne doivent pas être perturbées par l'ajout d'un RIS par exemple. Pour couvrir une nouvelle zone, on sélectionne des zones possibles de déploiement des RIS (parois, objets), excluant les zones non perturbables sélectionnées précédemment. Le RIS est positionné dans la zone candidate, puis configuré selon les angles d'arrivée du chemin au point de positionnement et de départ vers la zone à couvrir.

3.7 Déploiement des RIS dans des scénarios Sionna RT

Sionna RT présente l'avantage majeur d'intégrer directement, dans son flux de travail, les méthodes de configuration des RIS basées sur les approches de lentille et de gradient de phase. Cette intégration native permet une configuration rapide et cohérente des surfaces intelligentes. En outre, le support multi-RIS de Sionna facilite la mise à l'échelle, ce qui en fait un outil particulièrement adapté à l'évaluation de scénarios impliquant plusieurs surfaces RIS dans des environnements réels.

Nous proposons deux types de déploiement. Le déploiement dit « supervisé » repose sur des méthodes optiques de base (par exemple, en ligne de visée – LOS), ainsi que sur les approches décrites en sections 2.4 et 2.5. Il permet d'intégrer les RIS en tenant compte explicitement des caractéristiques géométriques de l'environnement, notamment lorsque des conditions de visibilité ou des trajectoires directes peuvent être exploitées pour orienter les surfaces. Le déploiement « non supervisé » est adapté aux scénarios où l'environnement est soit peu caractérisé, soit trop variable pour permettre un déploiement déterministe fiable. Il est justifié ici par la topologie confinée des environnements miniers (en particulier en tunnels), qui limite naturellement le domaine de recherche.

Dans ce cas, les surfaces RIS sont déployées de manière périodique dans l'environnement, avec ici une distribution de phase naïve, définie simplement à partir de la position relative entre l'émetteur et le récepteur.

La figure 38 illustre le flux de travail pour la mise en place d'un scénario de simulation en tracer de rayon 3D utilisant Sionna RT. La scène est définie par un modèle 3D, constitué d'un ensemble de maillages, chacun représentant un objet au format 3D standard (PLY), ainsi qu'un fichier de description associé. Ce fichier permet notamment d'associer, pour chacun des objets de la scène, un identifiant d'objet permettant une manipulation dynamique dans le script et un identifiant de matériau dont les propriétés électriques sont configurées dans le script.

Les éléments radio sont ensuite insérés dans la scène à l'aide de coordonnées arbitraires dans l'espace (x, y, z) et d'une orientation. Ils sont ensuite configurés. Les émetteurs peuvent être personnalisés en termes de polarisation et de diagramme de rayonnement, ce qui permet d'appliquer des diagrammes spécifiques. Dans ce scénario, nous utilisons des antennes isotropes pour les émetteurs.

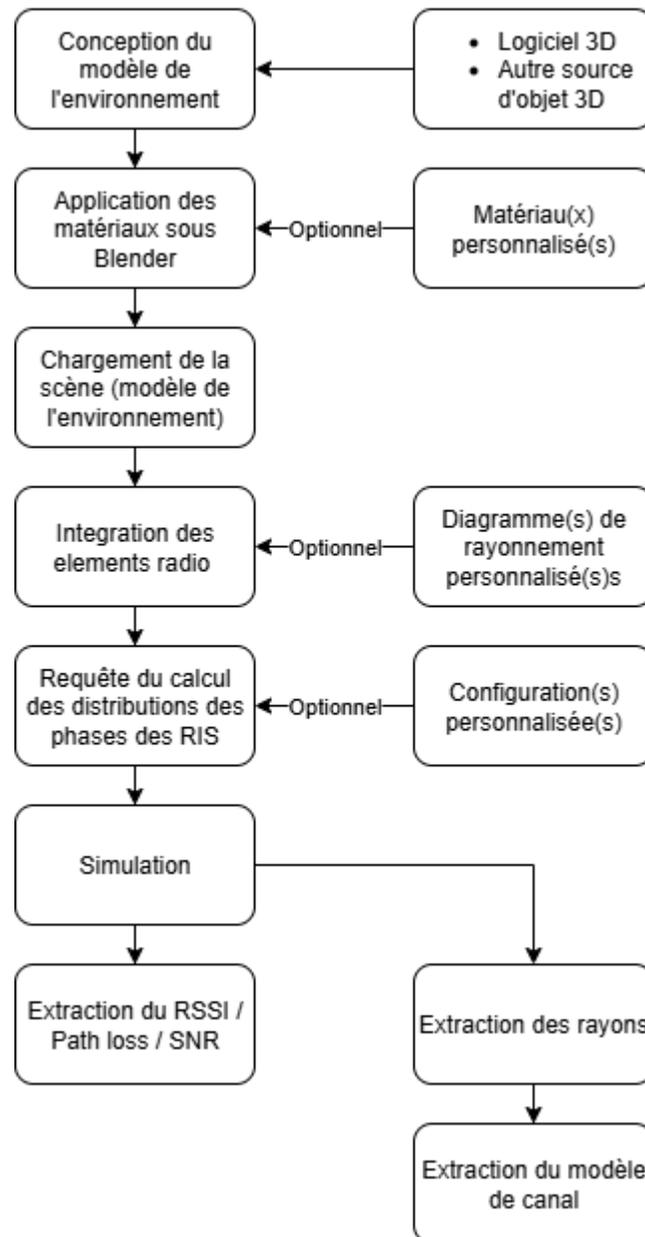


Figure 38
Flux de travail sous Sienna RT.

Les surfaces intelligentes reconfigurables (RIS) sont définies par les propriétés suivantes :

Tableau 7
Propriétés importantes du RIS sur Sionna RT.

Propriété	Description
<i>num_rows</i>	Nombre ligne de cellules unitaires
<i>num_cols</i>	Nombre de colonnes de cellules unitaires
<i>num_mode</i>	Nombre de modes de fonctionnement du RIS. À chaque mode est associé un profil d'amplitude et de phase, permettant plusieurs modes d'opération simultanés.

La taille physique de chaque surface RIS est calculée à partir du nombre de cellules et de la fréquence définie dans la scène, en supposant un espacement de $\lambda/2$ entre les éléments.

Le profil d'amplitude et de phase de chacune des cellules et chacun des modes peut être configuré de trois façons :

- En utilisant des fonctions utilitaires telles que *focusing_lens(source, cible)*, qui permet de diriger de façon cohérente les chemins issus de la source et du RIS vers la cible, ou *phase_gradient_reflector(sources, targets)* (voir section 2.2.2.2) ;
- En appliquant directement une matrice d'amplitude (valeurs comprises entre $[0, 1]$) et une matrice de phase (valeurs comprises entre $[0, 2\pi]$) de dimensions $[num_rows, num_columns]$;
- En définissant un ensemble de points échantillonnés sur la surface avec un certain espacement, à partir desquels Sionna interpolera automatiquement les matrices de profil.

3.8 Système de mesure portable du WiFi et de la bande passante applicative

Nous proposons un système portable de mesure des paramètres WiFi essentiels (RSSI, MCS) et de la bande passante applicative, utilisant exclusivement du matériel

commercial. Ce dispositif permet d'évaluer ces critères du point de vue de l'utilisateur final.

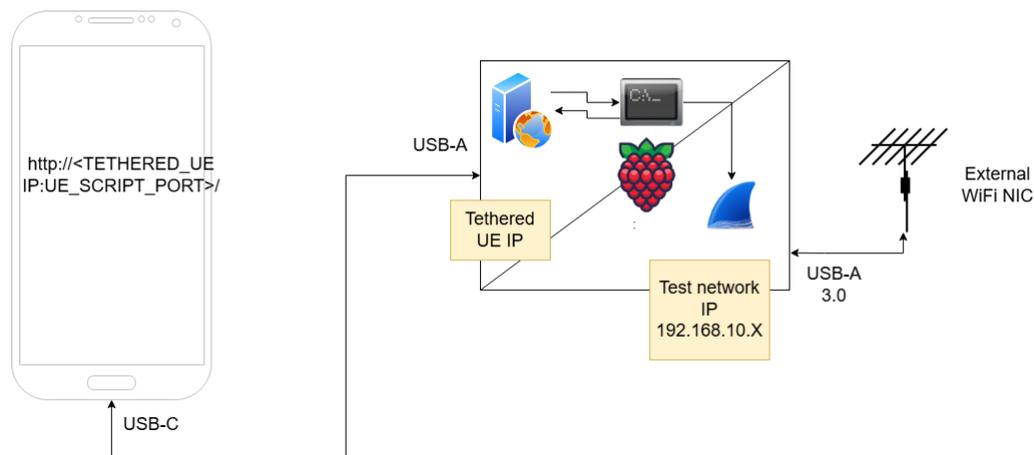


Figure 39
Schéma logique du système de mesure portable.

Le système utilise un micro-ordinateur Raspberry Pi, alimenté par une batterie externe, auquel est connectée une antenne WiFi externe via un port USB 3.0. Le système embarque une suite de programmes qui sont exécutés automatiquement à chaque point de mesure :

Tableau 8
Liste des programmes du système de mesure et utilisation.

Programme	Utilisation
Tshark	Capture des paquets de l'interface WiFi
Iperf (client)	Évaluation de la bande passante utilisateur (trafic UDP)
Script shell	Log des propriétés du lien WiFi (RSSI, MCS) dans un fichier

Chaque mesure est initiée par l'utilisateur via une application PHP exécutée sur le serveur Apache du Raspberry Pi. Cette interface est accessible depuis le navigateur web d'un téléphone connecté au Raspberry Pi par *tethering* USB.

L'interface, simple et intuitive, permet à l'utilisateur de :

- Nommer le point de mesure (par exemple, en indiquant les coordonnées x, y) ;
- Lancer la mesure ;
- Consulter les logs de la mesure en cours.

3.9 Critères d'évaluation

La complexité du canal de propagation, telle que décrite précédemment, souligne les défis majeurs liés au déploiement d'un réseau de télécommunications apte à satisfaire les contraintes opérationnelles propres à l'exploitation minière souterraine. Dans ce contexte, trois critères de haut niveau — auxquels l'expérience utilisateur est particulièrement sensible — sont généralement pris en compte : fiabilité, débit et latence.

Chacun de ces critères est directement influencé par les caractéristiques du canal de propagation :

- Débit et capacité : les phénomènes de multitrajets, de pertes de signal et de présence d'interférences impactent directement le débit utile et la capacité du réseau ;
- Latence : les phénomènes de multitrajets, les retards de propagation, la nécessité de retransmissions et le débit (dû au protocole ou à l'applicatif), liés aux conditions du canal, influencent la réactivité des applications critiques et de téléopération ;
- Fiabilité de la connexion : le canal de propagation affecte la stabilité du lien radio, notamment en raison des réflexions, diffractions et atténuations spécifiques dues au confinement de l'environnement. La topologie de l'environnement et les obstacles rencontrés constituent un facteur majeur de réduction de la zone de couverture, en raison de l'absence de ligne de visée et des effets d'ombre.

Tableau 9
Détails des critères d'évaluation.

Critère	Indicateur clé	Description	Influe sur...
Débit	RSSI, MCS	Un RSSI élevé indique que le signal reçu est fort, ce qui rend le lien moins sensible au bruit. Dans ce cas, le canal peut supporter un MCS plus élevé, tel que défini par le protocole, ce qui se traduit par une plus grande capacité de transmission.	<ul style="list-style-type: none"> - La téléopération - Le rendement en exploitation
Latence	MCS	Un MCS élevé traduit un canal de bonne qualité, permettant de transmettre davantage de données par unité de temps et de réduire la latence, grâce à un risque moindre de retransmissions.	<ul style="list-style-type: none"> - La téléopération - La sécurité - Le rendement en exploitation
Fiabilité / connectivité	Taux de couverture	Un meilleur taux de couverture permet de réduire les retransmissions	<ul style="list-style-type: none"> - La sécurité en exploitation - La liberté de déplacement des machines téléopérées ou autonomes - Le rendement

3.10 Outils utilisés

La réalisation des différentes tâches des flux de travail proposés en méthodologie nécessite l'utilisation de plusieurs logiciels. Un aperçu de ces outils est présenté dans le tableau 10, que nous détaillons dans les sections suivantes.

Tableau 10
Liste des outils utilisés par tâche.

Tâche	Logiciel	Commentaire
Scan 3D	Polycam	Application iPhone, interface avec le capteur LiDAR et génération de maillages en ligne. Export de fichiers 3D avec la version Pro.
Traitement des scan 3D	Blender	Nettoyage et réparation des maillages issus des scan 3D

Modélisation de l'environnement 3D	Blender	Préparation des scénarios pour Sionna RT
	CST Studio	CAD pour la définition de scénario simples
	Trimesh (Python)	Génération de modèles 3D paramétriques
Simulation EM	CST Studio	Solveurs en onde complète seulement (problèmes électriquement petits)
Planification radio	Altair WinProp	Utilisation de solveur de tracé de rayons. Import des maillages 3D arbitraire dans un format propriétaire. Incompatible avec le GPU.
	Sionna RT	Import du maillage 3D via Blender (plug-in). Version 0.19.2 qui intègre les RIS. Compatible GPU.
Analyse des données	Python + modules	-

Blender est un logiciel libre et gratuit de modélisation 3D, très puissant et utilisé aussi bien par des amateurs que des professionnels dans divers domaines nécessitant la création et la manipulation d'objets 3D comme les arts numériques et l'imagerie scientifique ou architecturale. Ici, Blender nous utilisons principalement pour manipuler et corriger les modèles 3D.

Altair WinProp est un logiciel propriétaire spécialisé dans la modélisation de la propagation radio et la prédiction de couverture sans fil. Il est souvent utilisé en complément de Feko dans la suite Altair pour simuler comment les ondes électromagnétiques se propagent dans des environnements réels (bâtiments, villes, forêts, tunnels, etc.).

Il intègre de nombreuses méthodes de simulation :

Tableau 11
Méthodes de simulation de propagation utilisées par WinProp.

Nom de la méthode	Type de simulation	Usage
Tracé de rayons	Optique	<ul style="list-style-type: none"> - Quand la précision est requise - Tient compte du comportement des matériaux

COST-Hata, Okumura, Kniff-edge	Empirique	<ul style="list-style-type: none"> - Rapidité de simulation - Adapté aux domaines de simulations larges - Très simplifié, utilise des pertes estimées empiriquement
Monte-Carlo	Statistique	<ul style="list-style-type: none"> - Pour les réseaux denses ou à forte variabilité

Sionna RT est un *framework* ouvert python développé par NVIDIA pour simuler des systèmes de communications sans fil physiques, en particulier pour la 5G, la 6G, les systèmes MIMO massifs, et les RIS. Nous utilisons ce programme pour faciliter l'étude de certains scénarios utilisant des RIS réfléchissants.

Tableau 12
Analyse comparative des fonctionnalités offertes par Altair WinProp et Sionna RT.

	WinProp	Sionna RT
Calcul sur GPU	Non	Oui
Accès aux données via API	Complexe	Directement via le script Python
Simulation <i>link-layer</i>	Oui (définition d'interfaces air d'après les standards)	Oui (ciblé sur l'OFDM, la 5G et le MIMO)
Méthodes de lancer de rayon	SRT et SBR (et variantes dites « intelligentes »)	SBR
Matériaux personnalisés	Oui : Fresnel et empiriques (définition des pertes par interaction)	Oui : Fresnel seulement
Interactions	Transmission, réflexion, diffraction, diffusion, UTD. Nombre limité d'interactions	Réflexion, diffusion et diffraction. Illimités en nombre
Intégration des RIS	Aucun : nécessite une méthode approximative (ici, la méthode hybride)	Oui, réfléchissant seulement (multi-mode)
Extraction du CIR	Oui	Oui (accessible directement aux simulations <i>link-layer</i>)

Modélisation de l'environnement (3D)	Oui, en partie propriétaire. Peu facile d'utilisation, manipulation d'objet difficile	Par outils externe (Blender), puis importation dans un format de métadonnée interne
Matériaux	Standards de base + personnalisable	Jeu de matériaux ITU + personnalisable (<i>callable*</i>)
Dynamisme	Oui (complexe à mettre en place, défini préalablement à la simulation)	Oui : positionnement des objets possibles pendant l'exécution
Visualisation des rayons	Oui, avec filtrage et sélection locale	De base (affichage seulement)
Diagrammes de rayonnement	Élémentaires et importation de diagrammes personnalisés via Aman	Élémentaires et callable*
Fonctionnalités de post-traitement, analyse, statistique	Oui (outils de base)	Avec Python
Évaluation des résultats	Surface, trajectoire et points arbitraires dans le plan cartésien en 3D	Surface seulement

* Le terme *callable* indique qu'un objet est évalué dynamiquement pendant l'exécution de la simulation, potentiellement via une fonction définie par l'utilisateur. Cela permet, par exemple, de modifier dynamiquement la valeur retournée par le *callable* en fonction du contexte ou de l'état de la simulation.

L'analyse comparative des fonctionnalités offertes par Altair WinProp et Sionna RT (tableau 12) met en évidence un avantage notable de Sionna RT pour l'étude du déploiement des surfaces intelligentes reconfigurables (RIS), en raison de sa capacité à permettre la programmation dynamique de l'environnement au cours de la simulation.

Néanmoins, aucune des deux solutions n'intègre, à ce jour, la prise en charge native des RIS transmissifs, rendant nécessaire leur implémentation dans les deux environnements de simulation.

Par ailleurs, Altair WinProp se distingue par une suite d'outils plus complète et mieux adaptée aux besoins de la planification radio. Dans cette perspective, il est proposé d'y intégrer une méthode hybride de modélisation des RIS, afin de combiner les atouts de cette plateforme avec une approche de simulation plus représentative des déploiements réels.

4. RÉSULTATS

4.1 Évaluation de la modélisation de l'environnement minier

Nous évaluons les différentes méthodes de modélisation pour les mêmes paramètres de simulation et la définition d'une interface air correspondant aux paramètres de la liaison WiFi définie pour l'expérimentation. Le critère « *Signal Strength* » est évalué en simulation sur un ensemble de points dont les positions approximatives sont estimées pour correspondre aux emplacements retenus pour les mesures expérimentales. La figure 40 montre les points de mesures paramétrés dans l'environnement de simulation utilisant le modèle 3D scanné complet.

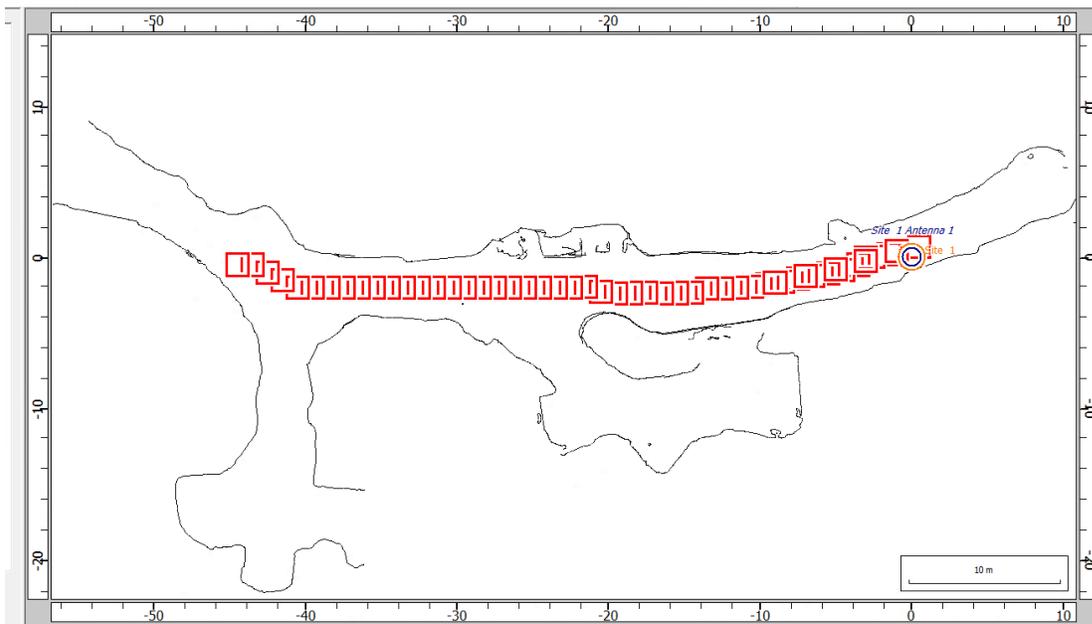


Figure 40
Points d'évaluations (carrés rouges) et position du point d'accès (ronds à droite).

Les paramètres de simulation RT (non calibrés pour l'environnement pour le moment) sont définis dans le tableau 13 :

Tableau 13
Paramètres de simulation RT pour l'évaluation de la modélisation de l'environnement minier.

Paramètre	Valeur	Commentaire
Fréquence	5.8 GHz	Même configuration que le point d'accès pour l'expérimentation
Largeur de bande du canal	40 MHz	Même configuration que le point d'accès pour l'expérimentation
SNR	Calculé dans la simulation	
Méthode de tracé de rayon	SBR	
Superposition des rayons	Cohérente	Pour évaluer l'évanouissement profond
Nombre max. interactions / transmissions / réflexions / diffractions	3 / 2 / 1 / 2	
Diffusion (<i>scattering</i>) additionnelle	Non	<i>L'utilisation de ce paramètre n'a pas encore fait l'objet d'une analyse préalable permettant d'évaluer sa pertinence d'utilisation.</i>
Matériau de la mine	Béton ($\epsilon_r = 6$, <i>cond.</i> 0.01 S/m)	Partiellement valide, car sections avec béton projeté sur les parois. Tout de même représentatif des propriétés des matériaux que l'on peut retrouver dans les mines [52, 53]

La figure 41 [54] permet de comparer la puissance reçue aux différents points définis le long de la trajectoire, pour chacune des modélisations : le modèle issu du scan 3D (en rouge), le modèle simplifié (en jaune), et le modèle simplifié avec rugosité (courbe verte). Ces résultats sont confrontés aux mesures expérimentales représentées par la courbe bleue.

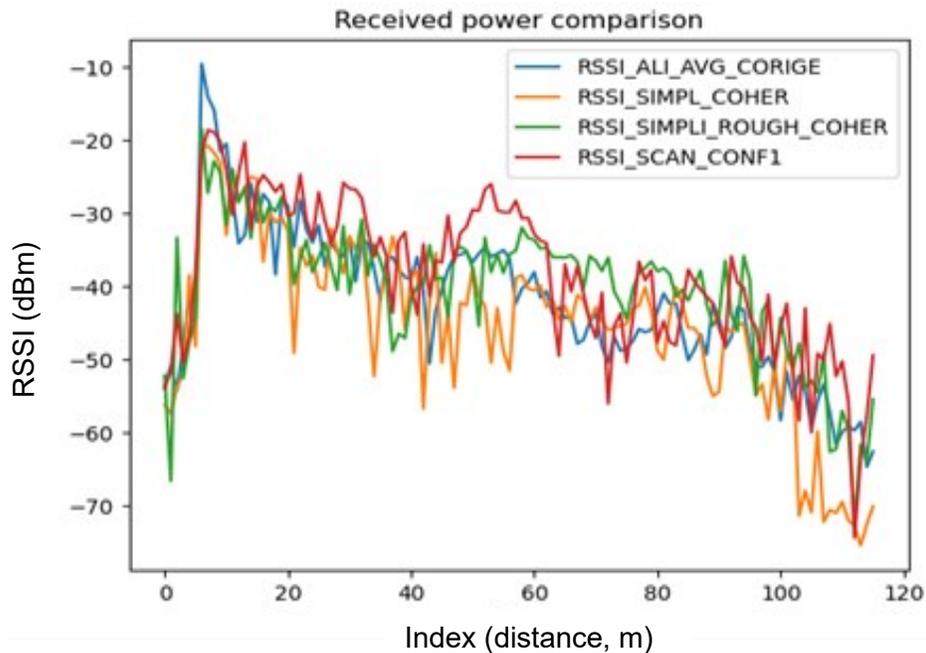


Figure 41
Comparaison de la puissance reçue sur la trajectoire.

Pour évaluer la précision et la fiabilité des modèles de simulation, deux indicateurs d'erreur clé ont été calculés : l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de corrélation de Pearson (r). Ces métriques fournissent des informations complémentaires sur la performance de chaque modèle, en évaluant à la fois l'amplitude des erreurs et la relation linéaire entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites.

Tableau 14
Comparaison des métriques pour les différentes modélisations de l'environnement 3D.

Modélisation	Temps de calcul	Corrélation de Pearson	RMSE (dB)
Simplifiée	< 30 min	0.8387	7.035
Simplifiée avec rugosité aléatoire	< 30 min	0.7778	6.83
Scan 3D	> 3 h	0.8439	6.75

On observe une certaine similarité dans la forme, particulièrement avec la modélisation utilisant le scan 3D. Moins naturellement, l'erreur de la version simplifiée est très faible, ce qui lui confère un certain avantage en termes de compromis fidélité/temps de calcul.

Dans les trois cas, le maillage n'a pas fait l'objet d'une segmentation permettant d'extraire les sections ou objets ayant des matériaux différents de ceux des parois, notamment les tuyaux. Il sera donc nécessaire d'effectuer cette segmentation et d'appliquer les matériaux adéquats afin d'affiner notre modèle.

4.2 Évaluation des scénarios

4.2.1 Scénario 1 : couverture ad hoc dans une intersection de tunnel NLOS à 5.8 GHz

Le scénario étudié s'inspire d'une section désaffectée de la mine de la Cité de l'Or, caractérisée par deux couloirs parallèles se rejoignant à une intersection. Deux véhicules sont positionnés aux site 1 et site 2 et évoluent dans un environnement statique dépourvu d'infrastructure réseau. L'objectif est de générer ou d'améliorer un lien radio potentiel entre ces deux véhicules, même en l'absence de visibilité directe, et d'augmenter la capacité théorique du canal dans leur voisinage en améliorant le rapport signal sur bruit. Ce scénario a également fait l'objet d'une étude à 28 GHz pour APS 2023 [55].

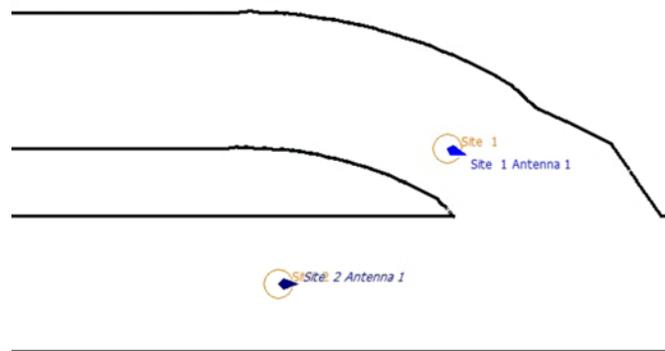


Figure 42
Illustration de l'environnement du scénario, deux véhicules (Site 1 et 2) se

rapprochant tous deux de l'intersection.

Pour ce faire, nous adoptons une méthode de modélisation simplifiée des surfaces RIS. En effet, la topologie locale autour des emplacements candidats pour le RIS, ainsi que les angles d'incidence associés, ne permettent pas une modélisation élémentaire réaliste de la surface seule.

Le RIS en mode réflexion est modélisé par un réflecteur parfait, orienté de manière à rediriger le signal provenant du trajet principal vers le récepteur, conformément aux principes de contrôle passif de la direction de réflexion.

Le RIS en mode absorbant, utilisé pour annuler les contributions de trajets potentiellement destructifs, est modélisé par une surface en matériau virtuel parfaitement absorbant, caractérisé par une réflexion négligeable.

Préalablement, nous avons déroulé l'algorithme défini à la section 3.5. Nous évaluons plusieurs cas d'utilisation des fonctions élémentaires d'un RIS réfléchissant dans un flux de travail standard de planification radio dans un scénario représentatif de l'environnement minier souterrain :

- (a) Anomalie (pilotage) de la réflexion pour générer artificiellement un chemin entre deux sites en non-ligne de visée ;
- (b) Anomalie (pilotage) de la réflexion pour favoriser un chemin de propagation pour réduire les interférences ;
- (c) l'absorption de chemins de propagation pour isoler une zone.

- a) Amélioration de la capacité du canal par génération d'un lien entre Site 1 et Site 2 normalement NLOS

Nous utilisons une variante de 3.5 pour identifier les chemins réalisables, qui ne nous retourne aucun résultat pour la zone d'intérêt (flèche orange dans la figure 45.a), car les chemins issus du site 1 ne couvrent pas la zone d'intérêt.

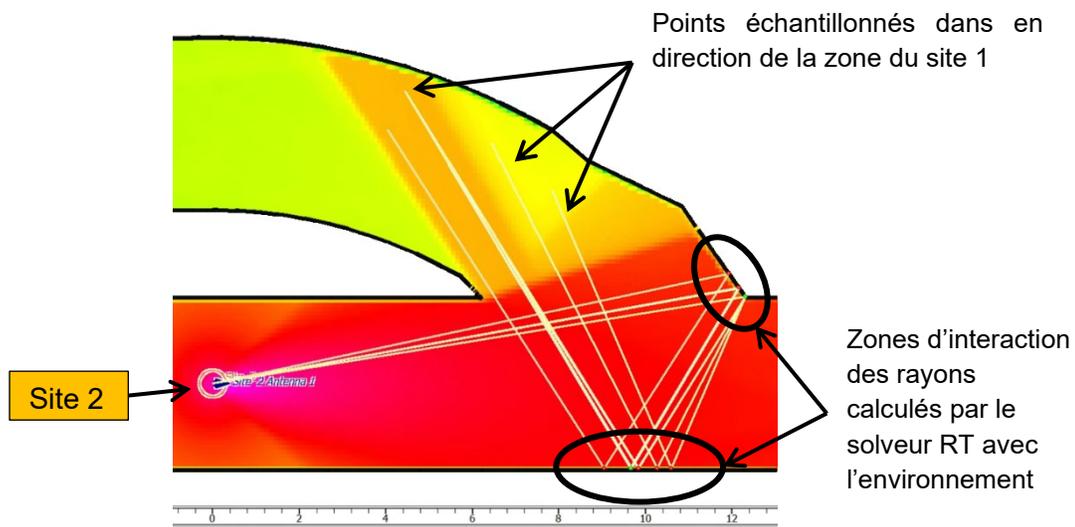


Figure 43
Illustration d'une sélection de chemins de propagation calculés pour différents points dans la zone cible.

En revanche, nous remarquons que le plusieurs chemins existent entre le site 2 et le site 1, nous notons les zones d'interactions avec l'environnement, ce qui permet de définir des positions candidates pour booster le signal ou générer un nouveau lien entre le site 1 et le site 2 (figure 44).

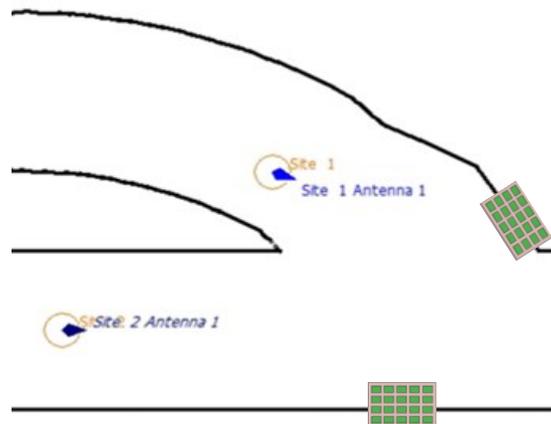


Figure 44
Sélection des positions candidates pour l'installation de RIS.

Le RIS est ensuite positionné et la simulation exécutée pour le site 1 transmetteur. On observe sur la figure 45.b qu'une partie importante de la zone originellement en NLOS, à proximité du site 2, devient atteignable par le site 1.

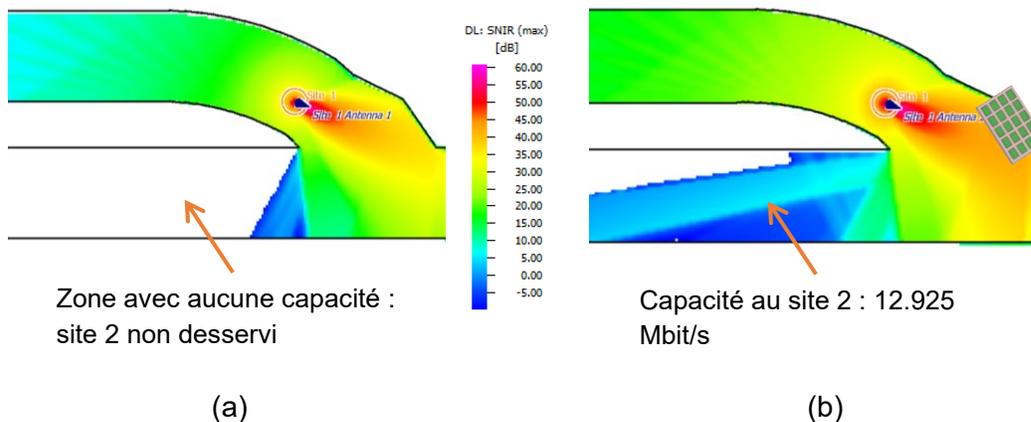


Figure 45
Évaluation de la capacité du lien entre le site 1 et 2 (a) avant et (b) après le placement du RIS en mode réflecteur.

b) Amélioration de la capacité par réduction des interférences

Lorsque les sites 1 et 2 se rapprochent tout en émettant sur la même bande de fréquences, ils deviennent susceptibles de générer des interférences mutuelles. On observe alors, à l'intersection des deux tunnels (figure 46), une importante zone de

brouillage (*jamming*) due aux réflexions sur une portion de la paroi du tunnel. Contrairement au point a), l'objectif ici est de réduire, voire d'éliminer, les trajets de propagation en provenance du site 1 qui interfèrent avec le site 2.

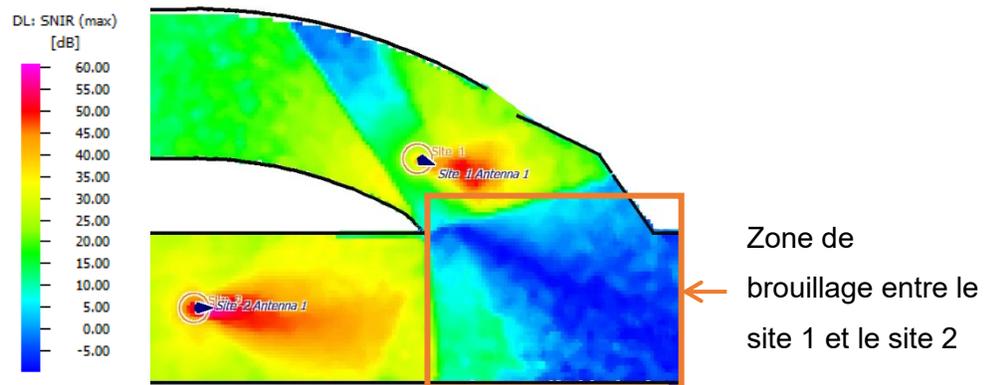


Figure 46
Brouillage dans l'intersection des tunnels.

L'ajout d'un RIS configuré en mode réflexion permet d'améliorer le SINR, entraînant un gain de capacité de l'ordre de 4 à 5 bit/s/Hz (voir la formule de Shannon pour un canal gaussien, éq. (10), selon la position candidate choisie, au niveau de l'intersection du tunnel, ce qui indique une réduction des chemins interférant.

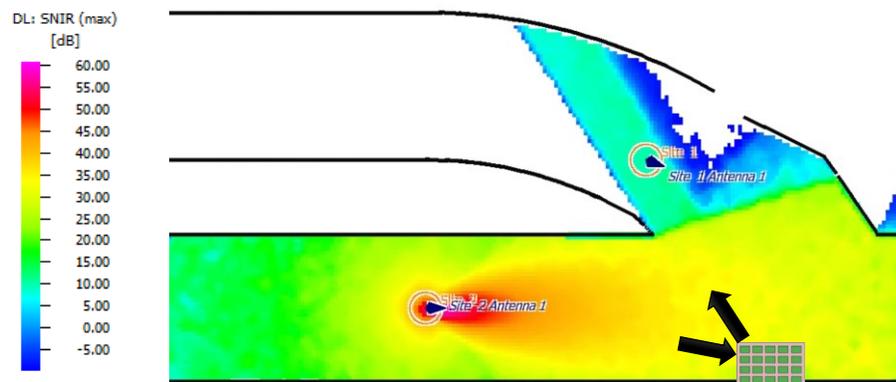


Figure 47
Amélioration du SINR dans la zone d'intersection.

$$\text{Capacite du canal} = B \times \log_2(1 + \text{SINR}) \quad (10)$$

c) Isolation d'un site

Nous proposons ici d'utiliser le RIS pour isoler le site 1 du trafic émis depuis le site 2, c'est-à-dire que le signal généré par l'émetteur situé sur le site 2 ne doit pas être recevable par le récepteur du site 1.

Pour cela, un matériau absorbant (Tableau 4) est appliqué au niveau du RIS, placé sur l'une des positions candidates préalablement sélectionnées. La simulation, réalisée avec l'émetteur actif sur le site 2, montre que les chemins de propagation ont été absorbés, ce qui a permis d'éliminer les chemins existants (zones blanches près du site 1 sur la figure 48) ou de réduire de manière significative le niveau reçu des chemins proches du site 1.

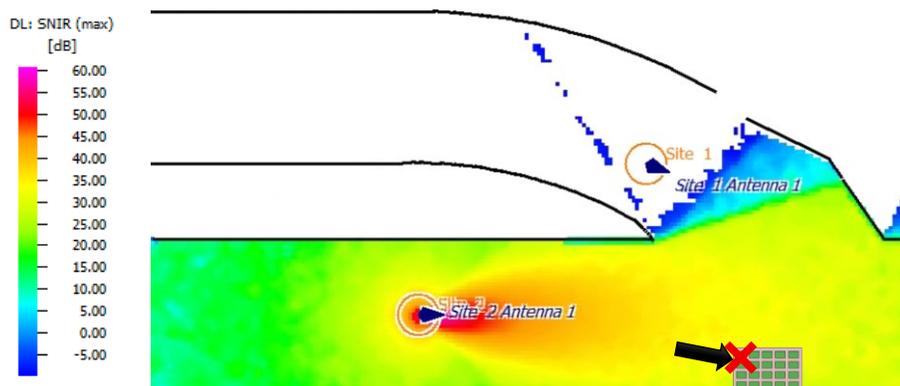


Figure 48
Résultat de l'isolation du site 1 par un RIS absorbant.

d) Analyse des résultats

À travers ce scénario, nous avons mis en œuvre deux des fonctionnalités du RIS : la réflexion dirigée pour générer un lien et améliorer localement le SINR (et par extension, la capacité du canal), et l'absorption pour réduire les interférences en isolant un site. Il est à noter que le mode réflexion n'utilise pas le principe de focalisation ni de formation de faisceau, ce qui aurait pourtant pu contribuer à une plus importante augmentation du SINR.

4.2.2 Scénario 2 : correction de l'effet d'ombre dans un tunnel rectiligne

Le déplacement d'un ou plusieurs véhicules dans un tunnel rectiligne (ou *drift*, comme illustré dans la figure 2) constitue un scénario représentatif des conditions

d'exploitation typiques en environnement minier. Nous proposons d'étudier la couverture de deux modes de fonctionnement de réseau conventionnellement utilisés pour les réseaux véhiculaires :

- En infrastructure, l'objectif étant d'améliorer les liens entre les antennes de chacun des véhicules et le point d'accès ;
- En ad hoc, d'améliorer le lien entre les antennes des deux véhicules.

Ce scénario présente un intérêt particulier car il intègre deux facteurs problématiques fréquemment rencontrés dans les environnements miniers souterrains :

- Le confinement imposé par la géométrie du tunnel : ce confinement limite fortement le déploiement efficace des RIS muraux. En effet, les performances de ces surfaces réfléchissantes sont fortement dégradées lorsque les angles d'incidence et de réflexion du signal sont trop obliques, ce qui est souvent le cas dans des galeries étroites avec des trajectoires non alignées ;
- Le positionnement contraint de l'antenne sur l'équipement mobile : l'antenne est souvent fixée à un emplacement prédéterminé sur les véhicules ou machines, selon des contraintes mécaniques ou de sécurité. Ce positionnement imposé n'est jamais optimal pour la réception du signal, et l'antenne peut être même placée dans une zone d'ombre, selon la configuration du réseau ou des RIS.

Une modélisation simplifiée du tunnel a été utilisée et importée dans l'outil de simulation Sionna RT, conformément au flux de travail défini dans la figure 38. Ce modèle offre une représentation suffisamment précise des contraintes physiques, tout en restant compatible avec des simulations efficaces.

Dans le cadre de cette étude, pour chacun des types de réseau considérés — réseau ad hoc et réseau en mode infrastructure — le déploiement des deux modes d'opération des RIS est exploré en mode non supervisé :

- Mode réfléchissant: les RIS sont installés sur les parois latérales du tunnel, agissant comme réflecteurs passifs avec anomalie ;
- Mode transmettant : les surfaces sont positionnées de façon transverse au tunnel, en mode transmission, en s'appuyant sur l'hypothèse qu'un espace libre est disponible entre le plafond du tunnel et le gabarit d'évolution des équipements miniers (véhicules, machines).

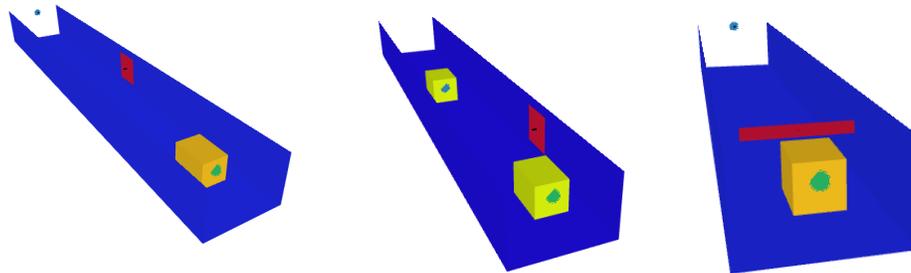
La figure 49 présente une galerie souterraine de mine avec un chargeur souterrain en marche. Habituellement, les différents tuyaux de service et la conduite de ventilation sont installés au plafond, dans une zone dégagée des opérations.



Zone potentielle
de déploiement
des RIS
transverses

Figure 49
Chargeuse comme élément bloqueur dans un tunnel de la mine Lamaque à Val-d'Or, et le plafonnier qui sert de zone utile [56].

Pour chacun des scénarios suivants, nous choisissons trois déploiements :



RIS mural de 100x100
éléments ($s = 6.25 \text{ m}^2$) au
milieu de du tunnel

(a)

RIS mural de 100x100
éléments, éloigné

(b)

RIS transverse de 20x170
éléments ($s = 2.125 \text{ m}^2$),
éloigné

(c)

Figure 50

Illustration des trois déploiements de RIS : (a) mural au milieu du tunnel, (b) mural et (c) transverse plus éloignés du transmetteur.

L'analyse des résultats porte sur la couverture mesurée à proximité immédiate de l'antenne de réception du camion. Cette couverture est évaluée sur une zone de $40 \times 40 \text{ cm}$ centrée sur l'antenne.

a) Résultats pour un seul camion et le réseau en mode infrastructure

La figure 51 présente la perte en chemin moyenne (où une valeur plus élevée indique une meilleure performance) pour les six positions de camion et les trois types de positionnement de RIS, comparée à la couverture obtenue sans RIS.

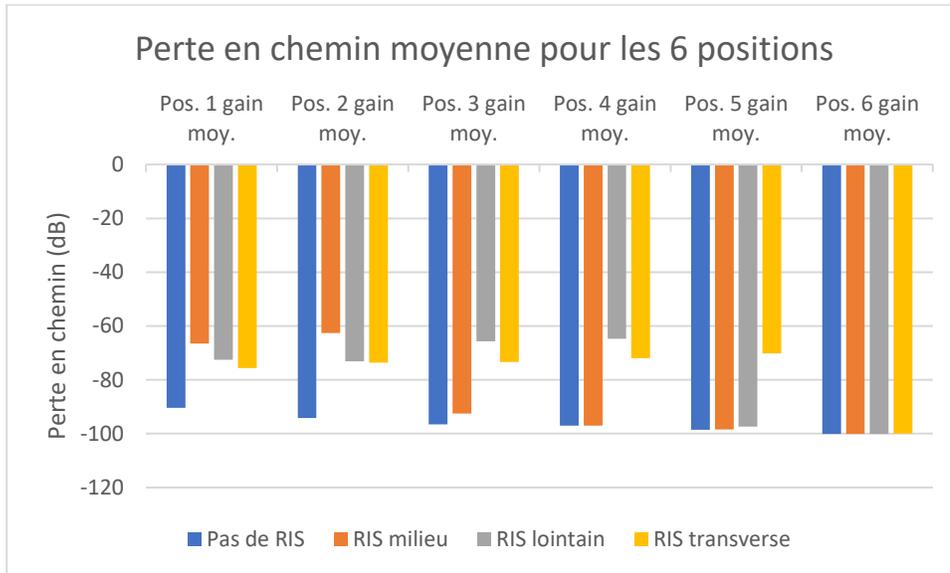


Figure 51
Comparaison de la perte en chemin pour les 6 positions de camion, pour chacun des sites de déploiement de RIS.

Pour les deux dernières positions, le positionnement des RIS muraux peine à couvrir les liens en raison des angles d'incidence élevés et des zones d'ombre. L'ajout d'un RIS permet généralement de réduire la perte en chemin, sauf dans le cas de la dernière position du camion. Dans ce scénario, le véhicule se trouve soit derrière le RIS transversal (voir figure 50.c), ce qui explique la valeur aberrante observée dans la figure 51, soit l'angle formé entre l'émetteur et le récepteur est trop important (figure 50.b), combiné au fait que l'antenne de réception est dans une zone d'ombre, ce qui empêche la formation d'un chemin réfléchi Tx-RIS-Rx efficace.

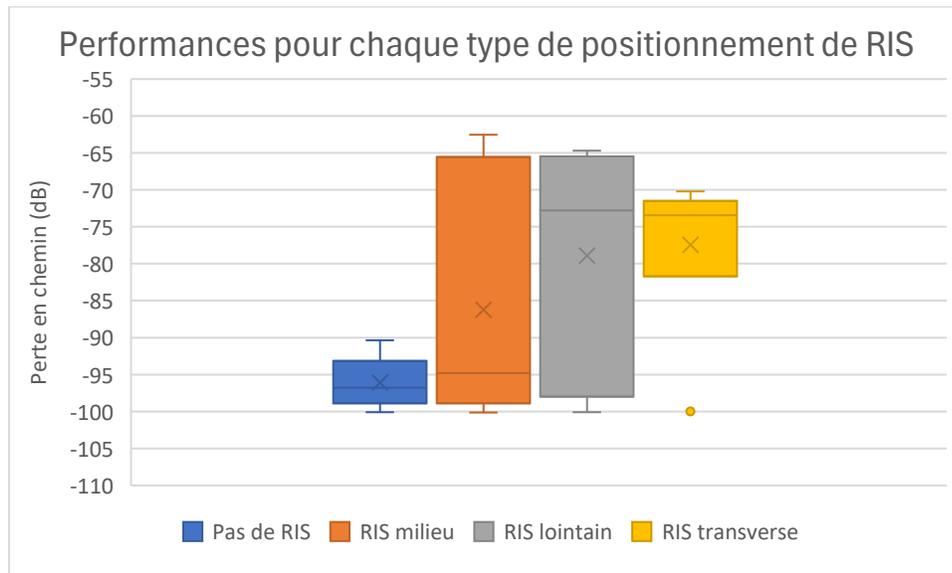


Figure 52
Performances pour chaque site de positionnement de RIS.

Sans surprise, le positionnement avec le RIS transversal présente à la fois la meilleure stabilité et l'une des meilleures performances médianes, malgré une surface nettement inférieure à celle des RIS muraux. Cette performance s'explique principalement par deux facteurs :

- Le faible angle Tx–RIS–Rx, qui maximise la réflexion de l'énergie vers le récepteur ;
- Le lien Tx–RIS, situé dans une zone dégagée, échappe au blocage causé par le camion et bénéficie d'un éclairage direct de la source.

En comparaison, le RIS mural central s'avère globalement moins performant. Pour les déploiements muraux, bien que le chemin réfléchi Tx–RIS–Rx soit plus long, les RIS placés en dehors de l'axe direct Tx–camion offrent en moyenne de meilleurs résultats, grâce à des angles d'incidence plus favorables et à une réduction des obstructions sur les trajets incidents et réfléchis.

- b) Résultats pour deux camions et le réseau en mode infrastructure

Nous évaluons la perte en chemin pour le mode infrastructure. L'antenne Tx est placée à une position fixe d'une hauteur de 3.8 m à l'entrée de la section du tunnel évaluée.

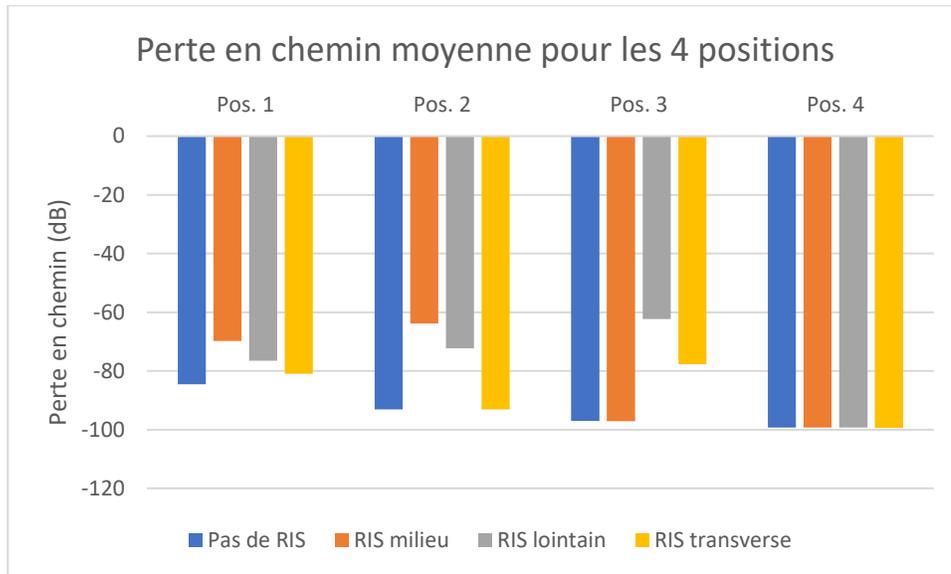


Figure 53
Perte en chemin moyenne simulée pour les 4 positions du camion.

Le RIS transverse est ici globalement moins performant, ce qui peut indiquer que le deuxième camion a un effet d'obstacle, exacerbé par le fait de sa surface relativement petite.

Le positionnement le plus efficace correspond au RIS lointain, pour les mêmes raisons de désaxement et de réduction des angles du système Tx-RIS-Rx.

c) Deux camions et réseau en mode ad hoc

Dans cette section, nous évaluons la perte en chemin dans un scénario de communication ad hoc. L'antenne émettrice (Tx) est placée sur le camion mobile C1, tandis que l'antenne réceptrice (Rx) est positionnée sur le camion mobile C2. Les deux antennes sont installées à une hauteur fixée à de 1.5 m en avant des camions, conformément aux conditions illustrées dans la figure 50.

Nous reprenons ici les dimensions et positions des surfaces RIS utilisées dans les scénarios précédents. Afin d'explorer de nouvelles configurations, nous proposons de tester un placement éloigné d'un RIS mural, en conservant les dimensions du RIS transverse pour confirmer les avantages observés précédemment avec le RIS transverse.

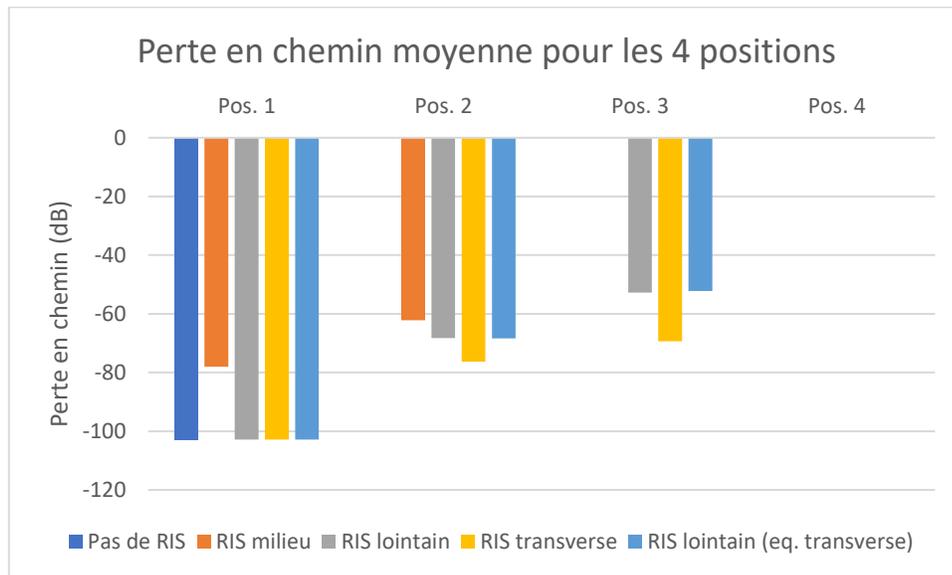


Figure 54
Perte en chemin moyenne pour chacune des positions (C1, C2), pour chacun des déploiements de RIS.

On remarque tout d'abord que le RIS transverse, ainsi que le RIS "lointain" et "lointain équivalent transverse", permettent de générer un lien utilisable entre Tx et Rx pour les positions 2 et 3, là où aucun lien de communication n'existe initialement (le tracé de rayon n'a pas identifié de chemin entre ces positions), en raison d'un blocage accru lié à la hauteur des antennes.

Naturellement, on observe que l'avantage d'utiliser un RIS transverse, comme proposé au point a), n'est plus valable. Cela est également dû au blocage lié à la hauteur des antennes.

Enfin, il est intéressant de noter que, bien que la surface du RIS "lointain équivalent transverse" soit presque trois fois inférieure à celle du RIS "lointain", les performances

restent comparables. Cela ne suit pas la règle théorique attendue concernant la performance des RIS en fonction de leur taille [57] si l'on utilise des modèles trop simplifiés. Ainsi, il est nécessaire d'évaluer l'importance de critères supplémentaires tels que les dimensions (longueur et largeur), l'angle d'incidence et de réflexion, ainsi que la manière dont le RIS est illuminé pour optimiser les dimensions des RIS et maîtriser les coûts de leur déploiement.

4.2.3 Scenario 3 : amélioration de la couverture et de la perte en chemin dans un environnement NLOS à plusieurs couloirs

Ce scénario s'inspire d'une problématique concrète observée dans une mine souterraine en activité située à Val-d'Or. L'infrastructure minière est organisée en plusieurs niveaux, chacun composé d'un couloir principal desservant plusieurs galeries orthogonales, comme représenté dans la figure 2.

Pendant l'exploitation minière, de nouveaux segments de tunnel sont régulièrement creusés, s'éloignant progressivement de l'infrastructure réseau principale. Cette extension engendre une dégradation progressive du signal radio, due principalement à l'absence de ligne de vue directe, aux réflexions et diffractions multiples, ainsi qu'aux pertes liées à l'atténuation sur de longues distances et à la géométrie des tunnels. Ces conditions rendent le déploiement de solutions de localisation et de suivi des équipements particulièrement complexe dans ces zones.

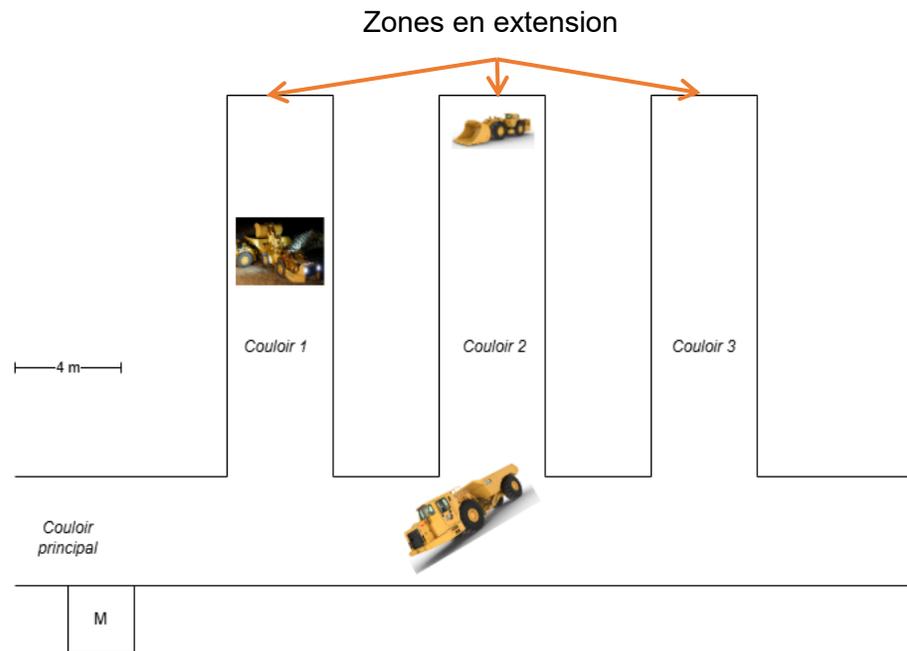


Figure 55
Illustration de la problématique à plusieurs couloirs NLOS.

Nous évaluons le taux de couverture radio et la perte en chemin des 3 zones d'intérêt, ce pour tous les échantillons de position du camion mobile, avec et sans RIS. On considère le déploiement d'un point d'accès émettant à 5.8 GHz proche de l'entrée du couloir principal, qui était alors en cours de construction.

a) Simulation de propagation de référence sans RIS

On observe la perte en chemin simulée pour une position du camion sur la figure 56. Les zones blanches situées profondément dans les couloirs secondaires montrent qu'aucun chemin de propagation depuis l'émetteur n'est identifié pour ces zones. Si l'on considère un gain d'antenne de 2.3 dBi pour les antennes émettrices et réceptrices, une puissance de transmission standard de 30 dBm, et un seuil de réception du signal de 100 dB par le récepteur, alors les zones ayant une perte en chemin supérieur à 135 dB ne sont pas considérées comme permettant une connectivité par le protocole radio. Ainsi, seulement le couloir principal et l'entrée des couloirs secondaires sont des zones de connectivité.

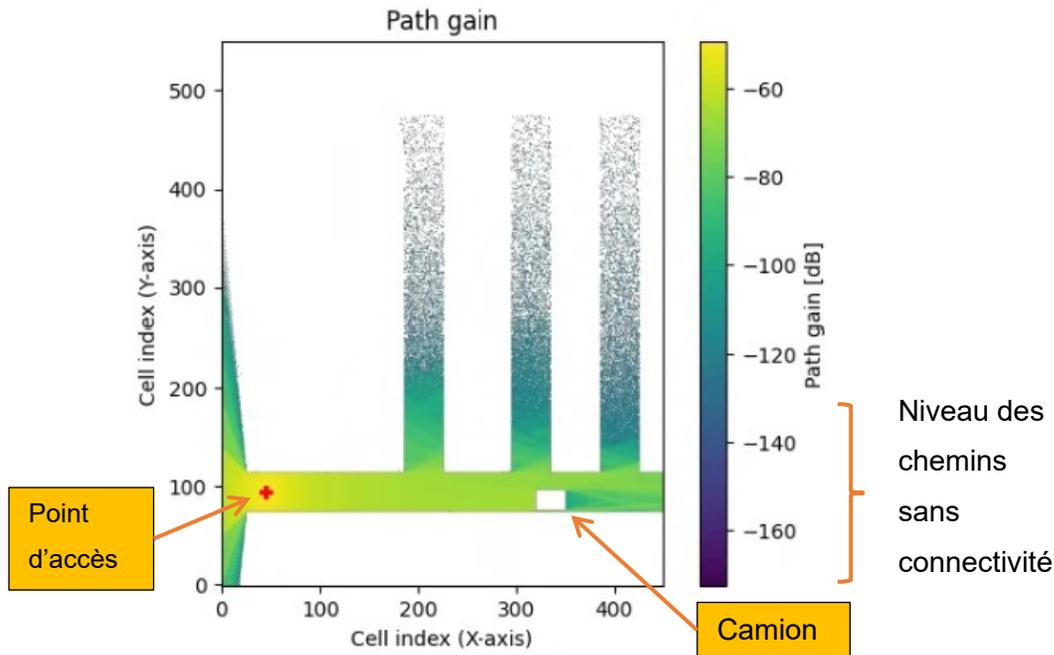


Figure 56
Perte en chemin simulée pour une position du camion dans un scénario NLOS à plusieurs couloirs.

Au cours du déplacement du camion, le taux de couverture dans les couloirs varie entre 36% et 41% et la perte en chemin entre -83 et -89 dB. Les résultats de simulations montrent peu d'impact du camion sur les critères observés dans les couloirs (< 2 points pour chacun des critères).

À partir des données issues du tracer de rayon, nous adoptons deux stratégies de déploiement des surfaces RIS dans le couloir principal, dans le but d'améliorer la couverture radio au sein des tunnels secondaires. Le choix de concentrer ce déploiement uniquement dans le couloir principal se justifie par plusieurs facteurs. D'une part, pour maximiser leur efficacité, les surfaces RIS doivent être positionnées soit à proximité de l'émetteur, soit près du récepteur. Or, cette seconde option s'avère peu pertinente dans notre cas, en raison d'un faible taux de couverture dans ces zones ainsi que de pertes de signal importantes. D'autre part, cette contrainte volontairement imposée permet de restreindre le domaine de recherche, pour faciliter l'optimisation du positionnement des RIS dans un environnement aussi atypique.

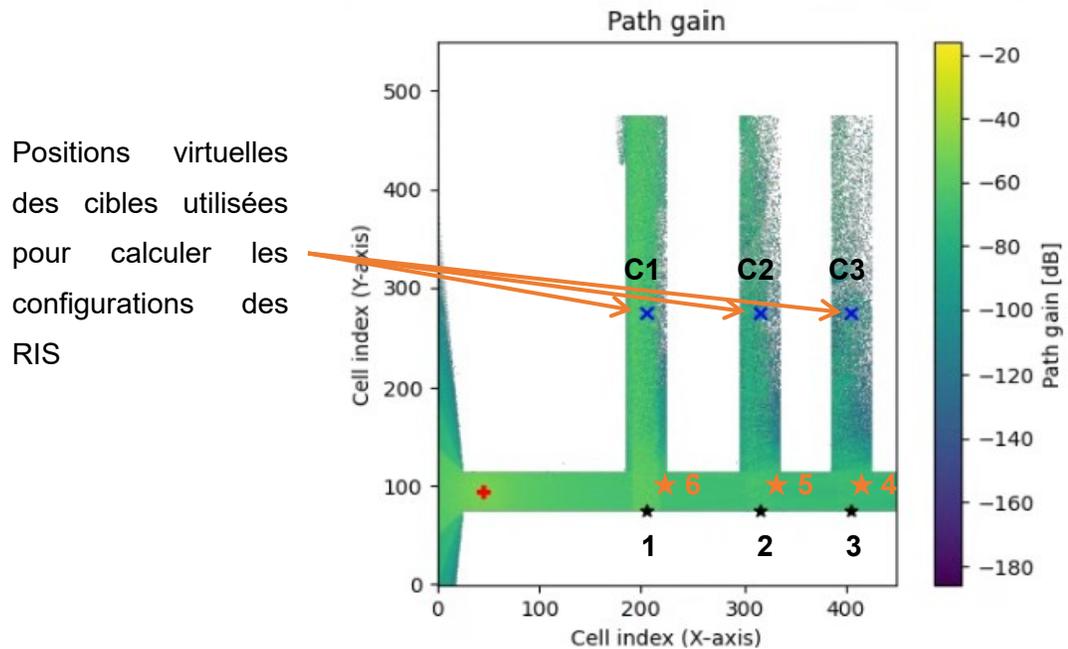


Figure 57
Perte en chemin simulée avec contribution de RIS dans un scénario NLOS à plusieurs couloirs.

Les dimensions des RIS muraux (Tableau 15) sont contraintes par la hauteur du tunnel principal et par la largeur des tunnels secondaires, cette dernière étant limitée en raison du risque de blocage du lien RIS–camion par les sections de paroi adjacentes à l’entrée du tunnel secondaire.

Les dimensions des RIS transversaux (Tableau 15) sont, quant à elles, contraintes en hauteur par la distance disponible entre la hauteur des machines et du plafond, et en largeur par la largeur du couloir. Ces RIS transversaux sont volontairement orientés autour de l’axe z afin de réduire l’angle total d’incidence et de réflexion, et d’augmenter la surface effective exposée au signal.

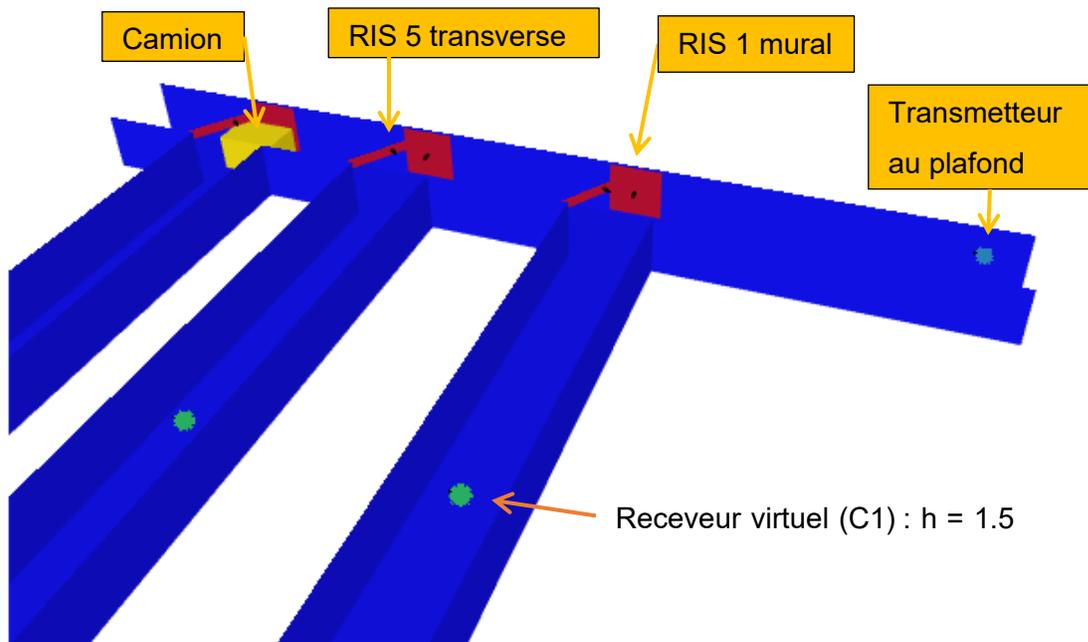


Figure 58
Vue 3D du déploiement du système dans l'environnement.

Les RIS 1, 2, et 3 sont configurés statiquement pour réfléchir les chemins vers les points représentant la localisation C1, C2 et C3, de la chargeuse respectivement. En pratique, pour réduire le CAPEX/OPEX, ils pourraient être déployés sous la forme de réflecteurs statiques (comme dans le scénario 1) configurés pour réfléchir à environ 85°.

Tableau 15
Configuration des deux types de RIS.

	Dimensions (lignes x colonnes)	Surface (m²)
RIS 1, 2 et 3	100 x 100	6.25
RIS 4, 5 et 6	25 x 180	2.8125

La configuration des RIS 4, 5 et 6 est dynamique, exploitant ainsi tout le potentiel des surfaces intelligentes. Elle s'adapte en fonction de la zone de couverture souhaitée à un instant donné, comme présenté dans le tableau 16 :

Tableau 16
Configuration des RIS dynamiques selon la zone d'amélioration ciblée.

Zone d'amélioration	Configuration		
	RIS 4	RIS 5	RIS 6
Tunnel 1	Désactivé (passant)	Désactivé (passant)	Activé (réfléchissant)
Tunnel 2	Désactivé (passant)	Activé (réfléchissant)	Désactivé (passant)
Tunnel 3	Activé (réfléchissant)	Désactivé (passant)	Désactivé (passant)

Un RIS désactivé signifie qu'il est passant, c'est-à-dire qu'il laisse passer le signal incident sans le modifier. En simulation, comme le modèle implanté ne prend pas en charge les RIS de type transmissif, la surface est temporairement supprimée de la scène pour représenter ce comportement. En pratique, il est possible de configurer un RIS transmissif de manière à amplifier ou diriger le signal transmis, selon les besoins du système :

- Dans le cas d'une surface passive, il est possible de concentrer l'énergie vers le RIS activé, en utilisant soit la méthode de la lentille, soit une formation de faisceau spécifique en fonction de la position de la source et de la cible ;
- Dans le cas d'une surface active, il est possible d'amplifier et retransmettre le signal reçu de la source, avec ou sans focalisation vers la cible.

b) Simulation de propagation avec RIS

Pour chacune des positions du camion, nous évaluons le taux de couverture et la perte en chemin pour chacun des couloirs, avec et sans l'appui des RIS 4, 5 et 6.

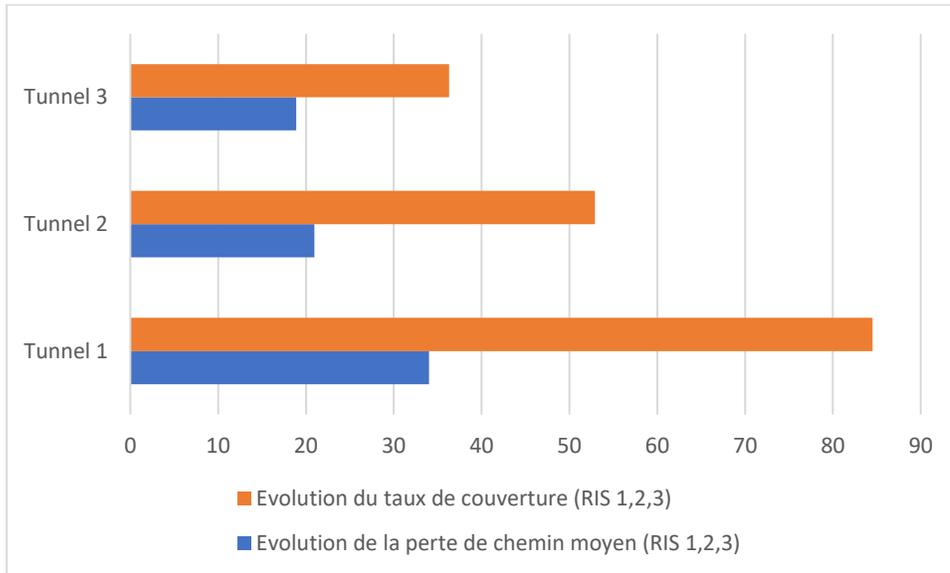


Figure 59
Évolution du taux de couverture et de la perte en chemin avec et sans RIS 1, 2 et 3.

La figure 59, sans la présence du camion, montre l'amélioration de la perte en chemin et de la couverture dans les trois tunnels secondaires grâce à l'ajout des trois RIS muraux 1, 2 et 3.

On observe une nette amélioration du taux de couverture ainsi que de la perte en chemin moyenne dans chacun des couloirs.

Le couloir 3, étant le plus éloigné de l'émetteur, souffre toutefois d'un plus grand affaiblissement du signal. Une amélioration possible consisterait à augmenter la taille du RIS afin de générer davantage de chemins avec moins d'interactions, et/ou ajouter un RIS supplémentaire pour réduire le nombre d'interactions des chemins entrants dans ce couloir pour réduire leur perte en gain.

Nous évaluons maintenant l'utilisation d'un RIS transverse uniquement. La figure 60 illustre l'amélioration de la couverture réseau dans un couloir spécifique lorsque le RIS 4 est activé. Cela démontre la capacité à configurer, en temps réel, une couverture réseau localement optimisée selon les besoins en générant dynamiquement un chemin supplémentaire Tx-RIS-C3 pour réduire l'effet du NLOS.

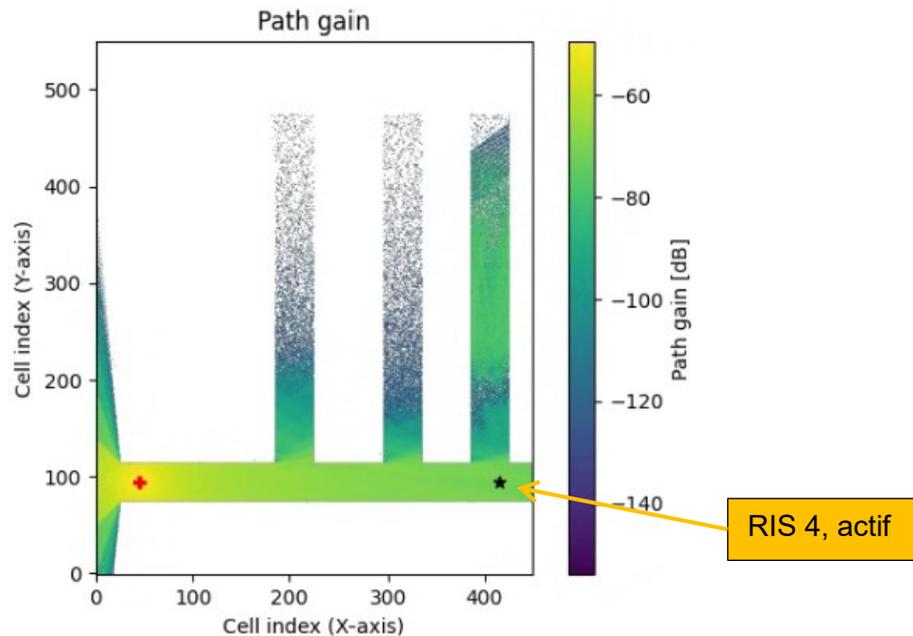


Figure 60
Sélection de la couverture d'un tunnel seulement, par l'activation du RIS transverse 4 associé au tunnel 3.

c) Effet du chainage des RIS transverses

La figure 61 montre l'évaluation des critères pour le couloir 3, si tous les RIS transverses sont configurés en mode réfléchissant, chacun programmé pour cibler leur couloir respectif. Un seul RIS transverse est configuré en réflexion pour servir le couloir 3, les autres étant configurés en mode transmission passif.

On observe de meilleures performances quand un seul RIS transverse est actif. De plus, on ne compte pas la possibilité que les autres RIS transverses, en mode transmission (passant) formant un chainage en série, puissent être actifs pour amplifier le signal qui alimente le RIS réfléchissant en bout de chaîne.

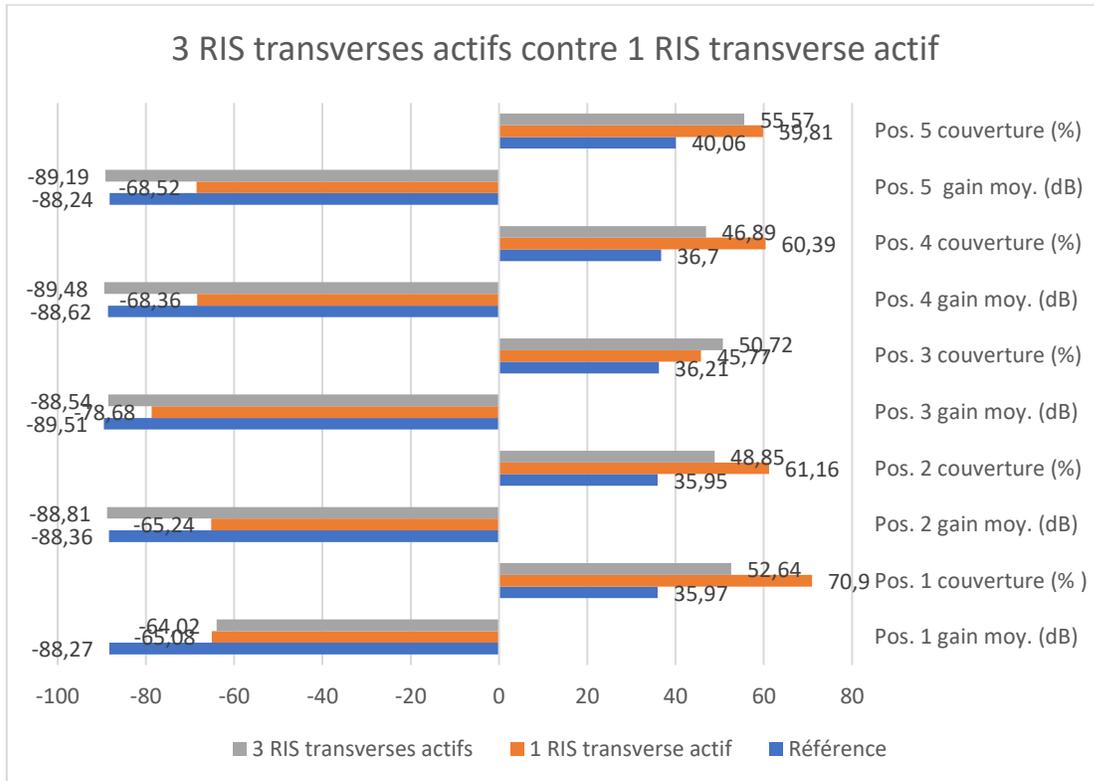


Figure 61
Évaluation des critères dans le tunnel 3 pour toutes les positions du camion selon le chaînage de 1 contre 3 RIS transverses.

L'étude de placement des deux types de modes de RIS permet d'émettre la considération suivante :

- Les RIS muraux sont moins sensibles au chaînage : la topologie tunnel permet d'augmenter la diversité des chemins ;
- Les RIS transverses sont plus sensibles au chaînage à cause du risque de blocage, lié à leur position, selon le mode configuré.

Après avoir examiné le déploiement de deux types de RIS dans des scénarios représentatifs via simulation, nous proposons de mettre en œuvre le déploiement de RIS dans une section d'une ancienne mine d'or. L'objectif est d'étendre la couverture radio en ligne de vue (LOS) dans un tunnel rectiligne (scénario 4) et en non-ligne de vue (NLOS) dans une galerie orthogonale (scénario 5).

4.2.4 Scénario 4 : extension et amélioration de la couverture d'un réseau infrastructure dans un tunnel rectiligne en LOS

Ce scénario se déroule dans une longue section du tunnel principal de la mine de la Cité de l'Or. L'objectif est d'évaluer deux aspects clés d'un réseau sans fil dans un environnement souterrain :

- L'extension de la couverture radio, afin d'assurer une connectivité continue dans le tunnel droit, avec une section LOS et OLOS ;
- L'amélioration de la bande passante pour supporter un trafic utilisateur accru plus important.

Le réseau d'infrastructure repose sur un point d'accès WiFi installé en hauteur sur la paroi du tunnel principal, simulant un déploiement réel dans un environnement minier.



Figure 62
Photographie du déploiement d'un RIS à proximité du point d'accès pour booster son signal dans une direction donnée.
Source : LATYS.

Pour étendre et optimiser la couverture sans fil, des RIS en mode transmission sont utilisés. Ces dispositifs fonctionnent dans la bande des 5.8 GHz, couramment utilisée pour les applications WiFi à haut débit.

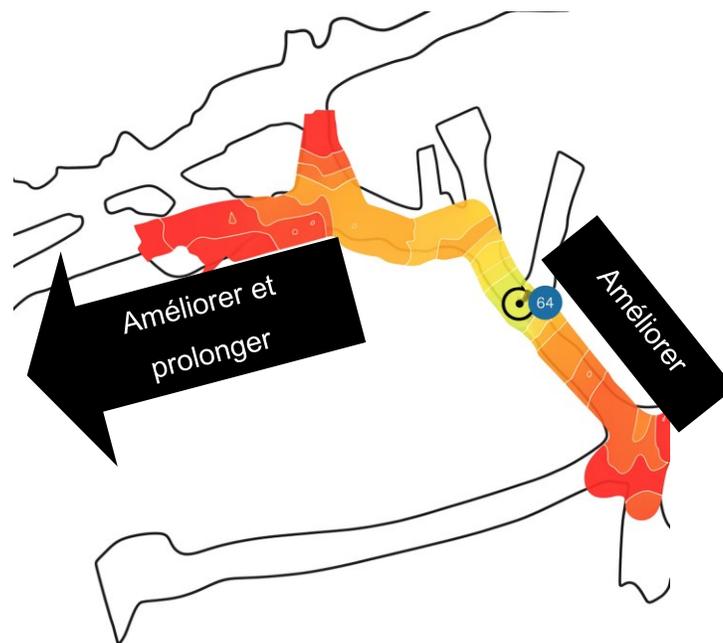


Figure 63
Objectifs du déploiement d'un RIS à proximité du point d'accès pour booster son signal.

Les mesures sont effectuées par l'équipement portable de mesure Wi-Fi Ekahau Sidekick 2 [58], et une partie par notre système de mesure (section 3.8).

a) Amélioration du débit d'une zone déjà couverte

Nous sélectionnons plusieurs positions dans une section du tunnel principal, comme illustré dans la figure 63 (zone « Amélioration »), sur lesquelles nous mesurons les gains de performance en RSSI, MCS et débit. Les mesures sont prises tous les 5 mètres à partir du premier mètre derrière le RIS déployé, selon le même principe que celui présenté dans la figure 62.

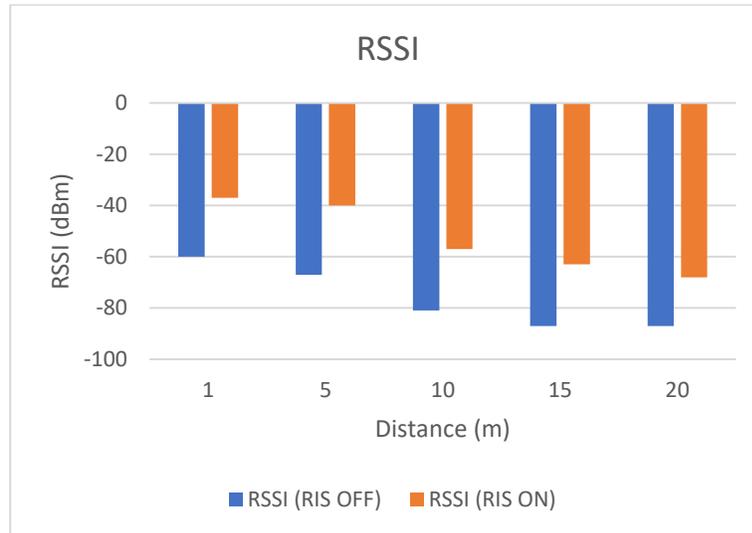


Figure 64
Comparaison du RSSI avec et sans RIS dans la section du tunnel en LOS.

La figure 64 montre l'évolution du RSSI en fonction de la distance avec et sans RIS. Le déploiement des RIS a substantiellement amélioré le RSSI dans la zone, avec un gain stable entre 25 et 30 dB (qui correspond au gain du prototype annoncé par LATYS).

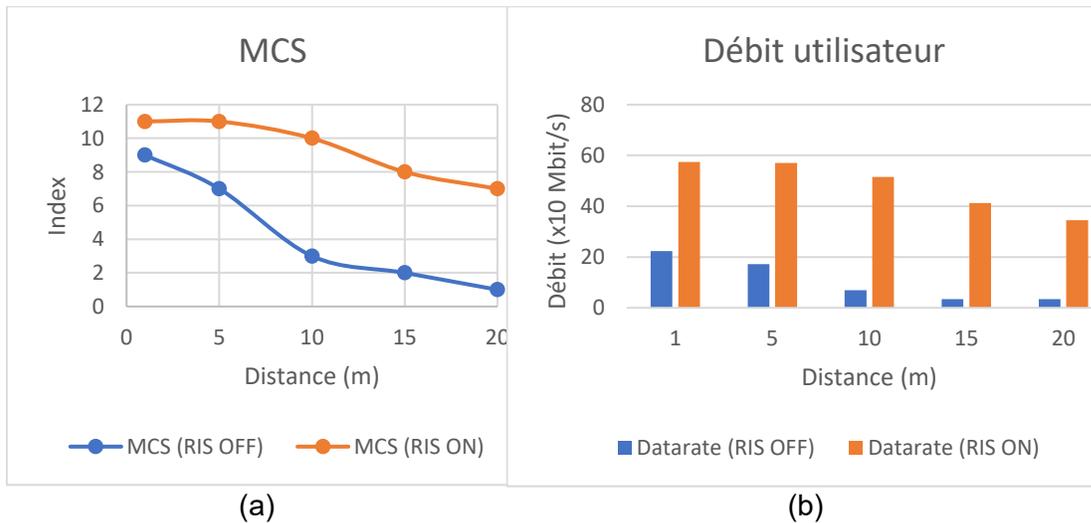


Figure 65
Comparaison du (a) MCS et (b) débit utilisateur avec et sans RIS.

Il est observé qu'en l'absence de RIS, l'indice MCS décroît rapidement avec la distance, traduisant une atténuation significative du canal. En revanche, l'intégration

du RIS permet de mieux stabiliser l'indice MCS sur l'ensemble de la distance mesurée, indiquant une amélioration notable de la qualité du lien et une meilleure robustesse sur la distance.

Étant donné que le débit est directement lié au MCS, ce dernier définissant la modulation et le taux de codage de la communication, la tendance du débit suit celle de l'indice MCS.

Pour mieux comprendre les causes d'un tel phénomène, il serait pertinent de :

- Réaliser une analyse par tracé de rayons afin d'identifier les trajets impactés par le RIS ;
- Valider les observations par des points de mesure supplémentaires, répartis de manière plus homogène dans l'espace, afin de vérifier la présence éventuelle de zones de faible couverture, d'après le principe de conservation de l'énergie.

b) Extension de la couverture en OLOS

Nous proposons d'étendre la couverture WiFi dans la partie supérieure de la galerie principale située en ligne de visée obstruée à l'aide d'un chainage de RIS. La figure 66 montre une prolongation d'une vingtaine de mètres de la couverture radio utilisable pour un équipement.

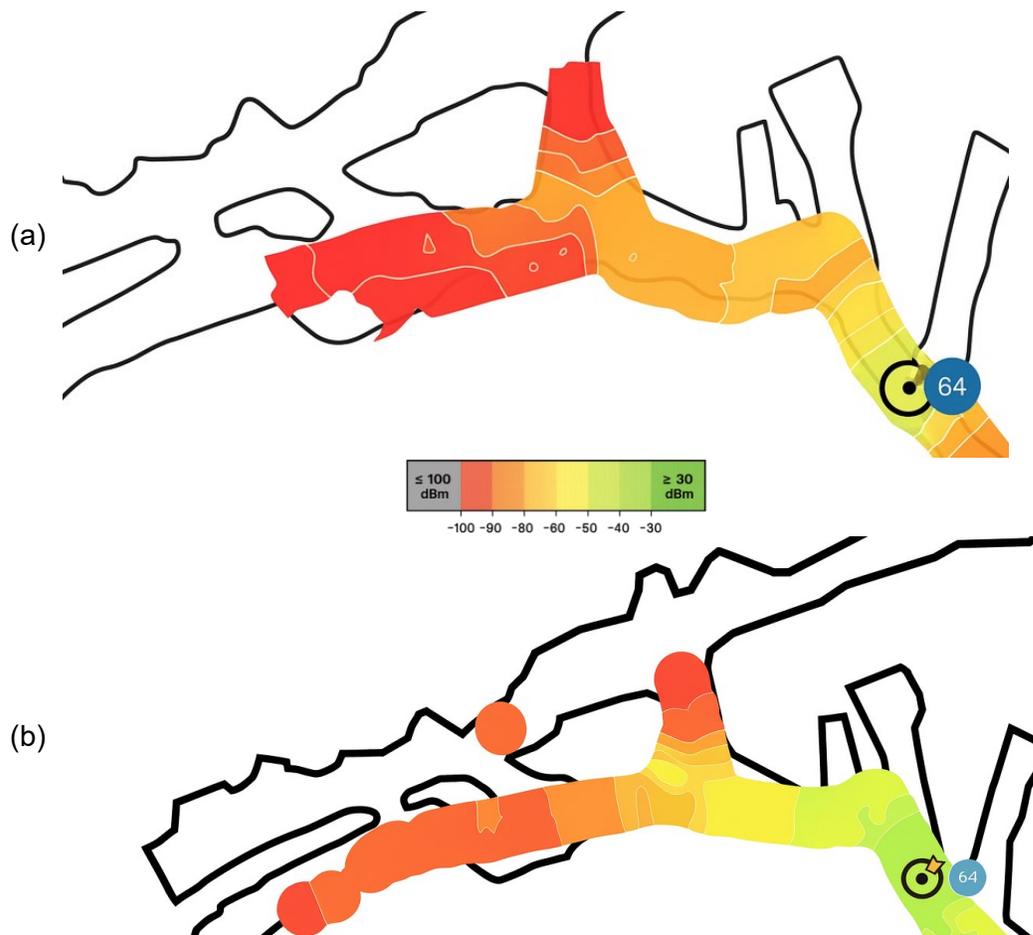


Figure 66
Comparaison de la couverture WiFi (a) de référence (b) avec chainage de RIS pour la section de tunnel OLOS.

c) Analyse des résultats

L'activation du RIS permet un gain significatif de puissance reçue sur toute la zone mesurée en LOS, et un prolongement dans les zones OLOS. Cela valide l'efficacité du RIS pour améliorer la couverture radio, et avec le débit utilisateur, dans des topologies de tunnels non linéaires et présentant des irrégularités.

4.2.5 Scenario 5 : extension de la couverture d'un réseau d'infrastructure dans un tunnel courbe et NLOS

Ce scénario reprend l'architecture mise en œuvre dans le cadre du scénario 4. Il évalue le potentiel des RIS opérant en mode transmission avec l'objectif de courber

artificiellement le signal radio dans un tunnel orthogonal, en non-ligne de vue, et normalement pas couvert par le réseau, par le biais d'un chaînage en série de RIS.

Dans ce scénario, considéré comme le plus abouti et le plus fréquemment rencontré, nous proposons de valider l'extension de la méthode d'intégration des RIS opérant en mode transmission, en confrontant les résultats issus de la simulation aux données expérimentales.

4.2.5.1. Résultats expérimentaux

Ces résultats expérimentaux ont été obtenus par LATYS à l'aide de l'Ekahau Sidekick, en se déplaçant dans les tunnels afin de couvrir la zone d'intérêt. Plusieurs valeurs de RSSI sont mémorisées à chaque position, ce qui permet un moyennage afin d'évaluer la couverture radio réelle de manière plus représentative.

Trois RIS sont ensuite installés en série à l'intersection des deux tunnels pour courber le signal, comme illustré dans la figure 67. Les RIS sont déployés afin de garantir un lien en ligne de visée (LOS) ou, sous certaines conditions, un lien en ligne de visée obstruée (OLOS) entre le transmetteur et le premier RIS, entre les RIS eux-mêmes, ainsi qu'entre le dernier RIS de la chaîne et la zone à améliorer.

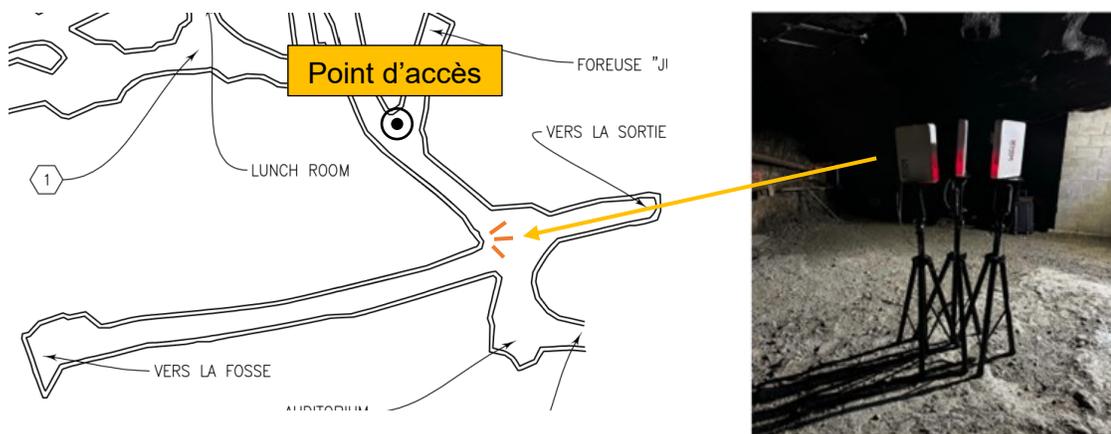


Figure 67
Schéma du déploiement de RIS pour courber le signal vers un tunnel orthogonal non couvert.

Après l'activation des RIS, un relevé de site est réalisé en plusieurs points dans le tunnel menant à la fosse. Comme illustré dans la figure 68, ce relevé met en évidence un gain minimum de 35 dB dans le tunnel. L'appareil de mesure, dont la sensibilité est limitée à -100 dBm, indique une couverture radio comprise entre -65 dBm et -75 dBm sur la zone considérée.



Figure 68
Comparaison de la couverture WiFi (a) de référence (b) avec chainage de RIS pour couvrir le tunnel orthogonal.

4.2.5.2. Simulation

Dans ce scénario, nous mettons en œuvre la méthode hybride qui permet de modéliser les RIS en mode transmission dans le logiciel général de simulation de propagation radio (section 3.2).

Le point d'accès est représenté comme un émetteur positionné à l'identique de celui utilisé lors du déploiement expérimental, afin de garantir la cohérence entre simulation et réalité. L'émetteur est équipé d'une antenne isotrope, présentant une directivité de 2.2 dBi, en accord avec le matériel utilisé sur le site. L'environnement est modélisé par un modèle simplifié de la section d'intérêt.

Les paramètres de simulation, détaillés dans le tableau 17, sont soigneusement calibrés à l'étape 1 à partir des données expérimentales collectées. Cette calibration vise à assurer une fidélité maximale entre les résultats simulés pendant le déroulement de la méthode et les observations de terrain, notamment en ce qui concerne l'atténuation, la réflectivité des surfaces, et les conditions de propagation en environnement souterrain.

Tableau 17
Paramètres de simulation pour le scénario 5.

Paramètre	Valeur	Commentaire
Méthode de tracé de rayons	SRT	Tracer de rayon standard
Nombre max. transmissions / Réflexions / Diffractions / Total	Désactivé (passant)	Activé (réfléchissant)
Résolution	0.1 m	
Superposition des rayons	Non cohérente	Correspondance avec les mesures pratiques
Calcul des pertes des matériaux	Empirique	Seule option car nécessite la prise en charge de la définition de l'absorbant parfait
Matériau (parois de la mine)	Béton	ITU. Béton projeté sur une partie des parois de la mine

Nous déroulons l'extension de la méthode comme proposé dans la section 3.2. Le point d'accès est simulé par un transmetteur de rayonnement omnidirectionnel et de puissance d'émission de 30 dB, tel que configuré sur le site.

a) Étape 1 : simulation de la couverture du point d'accès

La couverture radio issue du point d'accès est simulée. Les paramètres de simulation sont fixés comme définis dans le tableau 17.

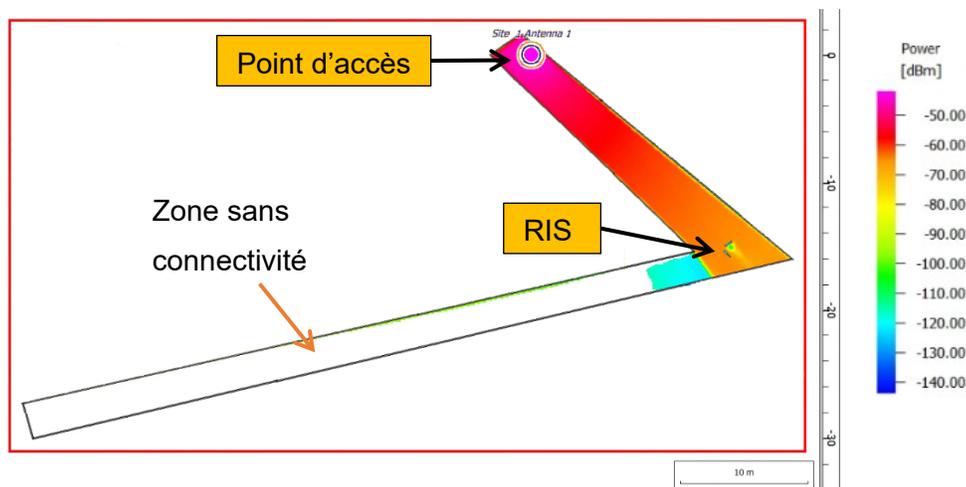


Figure 69
Simulation de la couverture du point d'accès.

b) Boucle d'intégration des RIS

Les RIS non actifs sont configurés à l'état désactivé. En simulation, cela signifie qu'aucun élément radio ne leur est associé, et qu'un matériau absorbant virtuel est appliqué.

L'énergie reçue sur la surface est évaluée à partir du chemin direct issu du point d'accès ainsi que des chemins secondaires générés par l'environnement. Pour cela, il est nécessaire d'activer l'évaluation de l'énergie sur la surface (avec une discrétisation de $\lambda/2$).

Dans cette simulation, un rapport est généré, indiquant l'énergie reçue sur les 16 cellules de la surface. En moyenne, un niveau d'environ -73 dBm est observé, soit 9 dB de plus que le champ moyen mesuré au même emplacement. Ce résultat peut s'expliquer, entre autres, par l'utilisation d'un modèle simplifié, qui supprime les intersections avec d'autres tunnels non pertinents, ce qui a pour effet de concentrer le signal dans la zone d'étude.

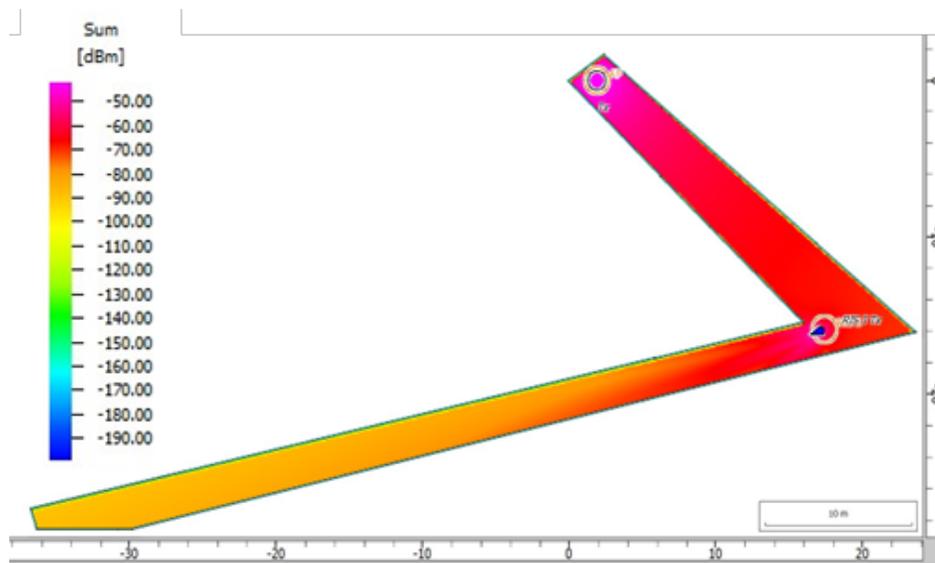
Le gain du RIS en réception est évalué à partir de son diagramme de rayonnement horizontal (par simplification) du côté Rx, en fonction de l'angle d'incidence du chemin principal provenant du point d'accès et frappant la surface du RIS. Dans ce cas, le RIS 1 a été déployé judicieusement de manière à bénéficier d'un angle d'incidence quasi orthogonal, ce qui permet d'obtenir un gain d'environ 20 dB (cf. figure 30).

c) Superposition et évaluation finale

Les résultats de simulation issus du point d'accès et des RIS sont obtenus selon le principe de superposition, de manière non cohérente, afin de permettre une comparaison directe avec les mesures expérimentales. La figure 70 illustre la concordance de la puissance reçue du signal sur la trajectoire de mesure, en considérant une antenne réceptrice élémentaire omnidirectionnelle, représentative du dispositif de mesure portable Ekahau.



(a)



(b)

Figure 70
Comparaison de la couverture WiFi (a) mesurée (b) simulée.

La figure 71 présente la comparaison entre la puissance reçue mesurée le long d'une trajectoire, comprise entre le dernier RIS de la chaîne et l'extrémité de la zone nouvellement couverte, et les résultats issus de la simulation. Le RSSI moyen mesuré

est de -69.7 dBm (le RSSI moyen simulé de -76.7 dBm), soit un niveau de WiFi interprété comme « moyen ». Malgré une erreur quadratique moyenne (RMSE) relativement importante de 9.12 dB, une concordance globale des tendances peut être relevée entre les mesures expérimentales et les valeurs simulées. On remarque que le RSSI mesuré demeure relativement stable avec la distance, en contraste avec la décroissance logarithmique classiquement attendue. Ce comportement particulier peut être attribué aux propriétés de confinement de la topologie en tunnel (effet de guidage), qui s'avèrent ici favorables à la propagation. Le modèle de simulation ne tenant pas compte de cette caractéristique, l'écart entre simulation et mesures tend à croître avec la distance. Cette divergence traduit vraisemblablement une limitation intrinsèque du solveur, celui-ci étant paramétré pour reproduire des modèles de propagation usuels, sans intégration des spécificités liées à l'environnement souterrain.

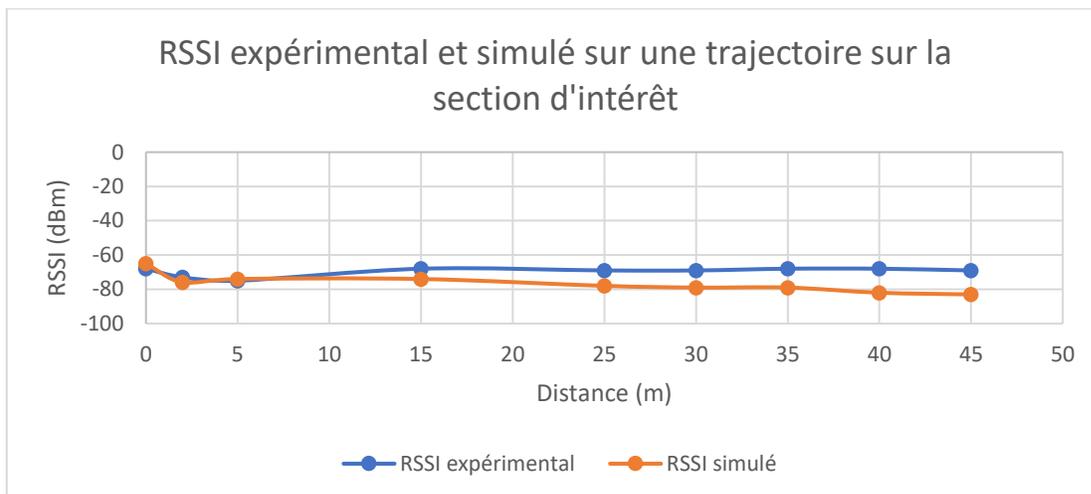


Figure 71
RSSI expérimental et simulé d'une trajectoire sur la section d'intérêt.

CONCLUSION

Dans le contexte minier souterrain moderne, les besoins opérationnels — tels que la téléopération et l'utilisation d'équipements autonomes — ainsi que les impératifs de sécurité évoluent rapidement, entraînant une dépendance accrue aux technologies de communication sans fil. Pour répondre à ces exigences, les systèmes de communication déployés dans ces environnements extrêmes doivent garantir une connexion ininterrompue, une large bande passante et une latence minimale. Cela conduit naturellement au recours à des communications à hautes fréquences, particulièrement sensibles aux conditions confinées, complexes et dynamiques des galeries souterraines.

Traditionnellement, la mise en place d'une telle infrastructure nécessitait un déploiement dense d'équipements afin de compenser les effets défavorables du canal de propagation. Nous proposons plutôt de cibler directement le canal radio, en réduisant ces effets à la source. Dans cette optique, l'utilisation de surfaces intelligentes reconfigurables constitue une approche prometteuse.

En modulant intelligemment la propagation des ondes électromagnétiques, les RIS permettent de surmonter des obstacles courants tels que la propagation hors ligne de vue (NLOS), l'atténuation du signal due aux matériaux et à l'effet d'ombrage liés aux obstacles, et les effets de trajets multiples (*fading*), très fréquents dans les tunnels confinés et complexes.

Les différents scénarios concrets étudiés démontrent cette polyvalence des RIS dans des environnements contraints comme les mines souterraines. Contrairement aux solutions conventionnelles (répéteurs, antennes relais), les RIS offrent une approche économique, flexible et peu énergivore pour renforcer la connectivité, sans nécessiter un déploiement massif d'équipements actifs. Cela s'avère particulièrement avantageux dans les environnements miniers dynamiques et hostiles, où des systèmes de communication robustes et adaptatifs sont essentiels pour la sécurité opérationnelle, l'automatisation et la surveillance en temps réel.

Le tableau suivant synthétise l'utilisation des RIS pour corriger certaines perturbations du canal évaluées dans le mémoire :

Tableau 18
Utilisation des RIS pour corriger certaines perturbations du canal.

Perturbation du canal	Fonction du RIS	Objectif
NLOS, blocage	<ul style="list-style-type: none"> • Pilotage des chemins de propagation (ex. : « courber » le signal) • Génération de chemins supplémentaires (ex. : contournement) 	Amélioration de la couverture : extension rapide de la connectivité, réduction de de l'effet d'ombrage ; sans infrastructure lourde
Effet d'ombrage	Génération de chemins supplémentaires (contournement)	Amélioration de la couverture dans les zones d'ombre sans infrastructure supplémentaire
Multichemin, évanouissement	<ul style="list-style-type: none"> - Suppression des chemins destructifs - Génération d'un chemin direct 	Réduire les interférences pour augmenter le SNR
Atténuation (lié à la distance)	Concentration de l'énergie vers une cible	Augmenter le RSSI / SNR

La modélisation des RIS étant peu déployée dans les logiciels standard de planification radio, nous proposons une extension d'une méthode hybride en simulation pour prendre en compte les RIS en mode transmission. Les résultats d'une simulation hybride de RIS en mode transmission dans un modèle d'environnement simplifié correspondent aux mesures expérimentales réalisées dans la mine désaffectée de la Cité de l'Or, dans le cadre d'un test de prototypes de RIS.



Nous proposons également une préversion d'une méthode générale non optimisée de déploiement de RIS dans des environnements confinés, fondée sur les données des chemins calculés par tracé de rayons. En respectant le principe de conservation de l'énergie, l'idée est de rediriger une partie de l'énergie initialement propagée vers des zones non utiles vers des zones d'intérêt, notamment celles affectées par l'effet d'ombre. Ce type de réallocation est rendu possible grâce à l'utilisation des RIS.

Les différents scénarios envisagés montrent que la topologie de l'environnement de type mine souterraine réduit substantiellement le domaine de recherche, favorable pour optimiser le déploiement des RIS, mais vient avec des limitations pratiques dues aux limitations techniques des RIS (angles de fonctionnement limités) selon leur mode, et opérationnelles (blocage de l'illumination des RIS, limitant leurs bénéfices). Ainsi, nous observons que les RIS opérant en mode transmission et déployés transversalement donnent les meilleurs résultats, qu'ils soient actifs (avec amplification) ou passifs (réflexion pilotée ou focalisation). Notamment, nous obtenons une prolongation maximale de la couverture sur une galerie complète de 45 mètres de longueur, avec un RSSI moyen d'environ -70 dBm grâce au pilotage du chemin de propagation. Ces résultats simulés sont validés par un relevé expérimental dans une section de la mine de la Cité de l'Or. Enfin, nous remarquons que c'est un environnement propice au déploiement hybride de surfaces statiques et dynamiques, ce qui permet de maîtriser les coûts de déploiement et d'opération.

Dans un environnement confiné de type tunnel, le modèle du RIS en mode transmission doit être amélioré afin d'intégrer les chemins secondaires, susceptibles de présenter des niveaux de puissance élevés et sélectionnés par un filtrage en fonction de leur puissance et de leur délai relatif au chemin principal. De plus, la validation de la méthode reste à finaliser en tenant compte du fonctionnement du RIS en mode absorbant.

Des essais supplémentaires sur le terrain sont indispensables afin de valider de manière complète les performances des RIS et d'en exploiter pleinement le potentiel dans des scénarios miniers réels. Plusieurs défis subsistent, en particulier l'évaluation des perturbations dues à une illumination non optimale des RIS, leur configuration en tenant compte des erreurs de positionnement des entités communicantes, ainsi que la prise en charge de leur degré de liberté de configuration (par exemple, selon le niveau de quantification ou selon un contrôle de la configuration par cellules ou par clusters). Enfin, une comparaison des performances entre surfaces dynamiques et statiques (c'est-à-dire à configuration prédéfinie et fixe) serait pertinente afin d'optimiser le déploiement en termes de coût et de complexité.

ANNEXE A – DONNÉES ET SCRIPTS

Afin d'assurer la transparence et la reproductibilité des résultats présentés dans ce mémoire, une sélection de scripts et de données est disponible en ligne dans un répertoire :

<https://github.com/uqat-lrtcs-2024>

Un miroir est mis en ligne ici : <https://asgdev.fr/rf/memoire/>

Contact : *aurelien.surier@uqat.ca* ou *aurelien.surier@gmail.com*

APPENDICE A – LISTE DES PUBLICATIONS

Cette section présente les publications scientifiques effectuées dans le cadre du programme de maîtrise, incluant les articles soumis, acceptés ou publiés dans des revues avec comité de lecture et conférences.

- C. Nzoleko, A. Surier, N. Hakem, N. Kandil, "Evaluation Of Wireless Wave Propagation Models In Underground Mines: From Simplified Approaches To 3d Scanning", *2025 APS-URSI*.
- A. Surier, N. Hakem and N. Kandil, "Experimental Assessment of 5 GHz WiFi Coverage Expansion in Underground Mine Using Reconfigurable Intelligent Surface," *2025 19th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Stockholm, Sweden, 2025, pp. 1-5, doi: 10.23919/EuCAP63536.2025.10999594
- A. Surier, N. Hakem, N. Kandil and M. Misson, "Impact of Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) on Communication Enhancement in Complex Confined Areas, with emphasis on the Vehicle Equipment Bay (VEB) of Space Launchers," *2024 IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE)*, Daytona Beach, FL, USA, 2024, pp. 37-42, doi: 10.1109/WiSEE61249.2024.10850386.
- A. Surier, N. Hakem and N. Kandil, "Assessing the 28 GHz Channel Capacity Enhancement in NLOS Mine Tunnels Through RIS Deployment," *2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and INC/USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/INC-USNC-URSI)*, Firenze, Italy, 2024, pp. 261-262, doi: 10.1109/AP-S/INC-USNC-URSI52054.2024.10686932.
- A. Surier, N. Hakem and N. Kandil, "Dielectric Screen Loading for Low-Complexity Static Reflectarray Prototyping," *2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (USNC-URSI)*, Portland, OR, USA, 2023, pp. 1519-1520, doi: 10.1109/USNC-URSI52151.2023.10238190.
- A. Surier, N. Hakem and N. Kandil, "3D beam steering cylindrical antenna," *2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*

and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI), Denver, CO, USA, 2022, pp. 1588-1589, doi: 10.1109/AP-S/USNC-URSI47032.2022.9886357.

- A. Surier, M. M. Leingthone, N. Hakem and M. Misson, "Adapted low-footprint biasing circuit for Switched Beam Antenna steering usable in Wireless Sensor Networks," *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Copenhagen, Denmark, 2020, pp. 1-5, doi: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135225.

GLOSSAIRE

Terme	Définition
Ad hoc (réseau)	Configuration de réseau sans fil décentralisé dans lequel les nœuds communiquent directement entre eux, sans passer par un point d'accès central (comme un routeur ou une station de base). Chaque nœud joue à la fois le rôle de transmetteur, de récepteur et parfois même de relai.
CAPEX/OPEX	Dépenses d'investissement / dépenses quotidiennes
Coefficient de réflexion	Quantifie la fraction de la puissance incidente réfléchi par un dispositif.
Infrastructure (réseau)	Configuration de réseau sans fil dans laquelle les périphériques communiquent via un point d'accès central, comme un routeur WiFi ou une station de base.
S_{11}	Appelé également coefficient de réflexion à l'entrée d'un port. Renseigne sur l'adaptation (ou « résonance ») du dispositif sur le milieu.
SLL	Side Lobe Level (niveau des lobes secondaires) : Mesure de l'intensité relative entre le lobe principal et les lobes secondaires : plus la valeur est faible, moins les lobes secondaires sont présents, au profit de la concentration de l'énergie dans le lobe principal (le faisceau utile).

LISTE DE RÉFÉRENCES

- [1] C. NIOSH. "Advanced Tutorial on Wireless Communication and Electronic Tracking: Communication System Performance".
<https://archive.cdc.gov/#/details?url=https://www.cdc.gov/niosh/mining/content/emergencymanagementandresponse/commtracking/advcommtrackingtutorial2.html> (Consulté le 05/30).
- [2] A. Mining. "The growing importance of communication technology in mining".
<https://www.australianmining.com.au/the-growing-importance-of-communication-technology-in-mining/>
- [3] J. Sang *et al.*, "Coverage Enhancement by Deploying RIS in 5G Commercial Mobile Networks: Field Trials," *IEEE Wireless Communications*, vol. 31, no. 1, pp. 172-180, 2024. doi: 10.1109/MWC.011.2200356.
- [4] M. Sode *et al.*, "Reconfigurable Intelligent Surfaces for 6G Mobile Networks: An Industry R&D Perspective," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 163155-163171, 2024. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3485227.
- [5] O. Michler, P. Schwarzbach, et J. Ninnemann, "Toward UWB Impulse Radio Sensing: Fundamentals, Potentials, and Challenges," dans *UWB Technology - New Insights and Developments*, R. Vargas-Bernal, Éd., Rijeka: IntechOpen, 2023. Consulté le 2025-05-30. doi: 10.5772/intechopen.110040.
- [6] N. Li *et al.*, "Dispatch Optimization Model for Haulage Equipment between Stopes Based on Mine Short-Term Resource Planning," *Metals*, vol. 11, no. 11, p. 1848, 2021. [En ligne]. Disponible: <https://www.mdpi.com/2075-4701/11/11/1848>
- [7] J. H. Herbert, "Planning and design of underground mining operations," 2024. Consulté le 08-2025. [En ligne]. Disponible: <https://oa.upm.es/85463/3/DPMB7T1-ENG-85463.pdf>
- [8] F. Javaid, A. Wang, M. U. Sana, A. Husain, et I. Ashraf, "An Optimized Approach to Channel Modeling and Impact of Deteriorating Factors on Wireless Communication in Underground Mines," *Sensors*, vol. 21, no. 17, p. 5905, 2021. [En ligne]. Disponible: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/17/5905>
- [9] M. Ndoh et G. Y. Delisle, "Underground mines wireless propagation modeling," Dans *IEEE 60th Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004*, 2004, vol. 5, pp. 3584-3588 Vol. 5.
- [10] H. Ikeda, O. Kolade, M. A. Mahboob, F. T. Cawood, et Y. Kawamura, "Communication of Sensor Data in Underground Mining Environments: An Evaluation of Wireless Signal Quality over Distance," *Mining*, vol. 1, no. 2, pp. 211-223, 2021. [En ligne]. Disponible: <https://www.mdpi.com/2673-6489/1/2/14>
- [11] L. Cheng, L. Zhang, et J. Li, "Influence of Mine Tunnel Wall Humidity on Electromagnetic Waves Propagation," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2012, no. 1, p. 734379, 2012. doi: <https://doi.org/10.1155/2012/734379>.
- [12] E. Alozie *et al.*, "A review of dust-induced electromagnetic waves scattering theories and models for 5G and beyond wireless communication systems,"

- Scientific African*, vol. 21, p. e01816, 2023/09/01/ 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01816>.
- [13] Y. Guo, J. Zhang, Y. Ju, et X. Guo, "A Theoretical Investigation of Channel Wave Multipath Propagation in a Coal Seam," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2019, no. 1, p. 4314582, 2019. doi: <https://doi.org/10.1155/2019/4314582>.
- [14] Sharetechnote. "4G/LTE - Fading". https://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_Fading.html
- [15] Y. S. You, L. J. Jing, Q. H. Yang, et Z. Shen, "Analysis and modeling of radio propagation fading characteristics in tunnel construction," *Heliyon*, vol. 10, no. 4, p. e26231, Feb 29 2024. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e26231.
- [16] C. NIOSH. "Basic Tutorial on Wireless Communication and Electronic Tracking: Technology Overview". https://archive.cdc.gov/www_cdc_gov/niosh/mining/content/emergencymanagementandresponse/commtracking/commtrackingtutorial1.html
- [17] K. Pacheco Hague et V. Tenorio, *Configuration Layout of a Supervisory System for Underground Mining Operations Based on 5G Technology and Wireless Platform*, 2022.
- [18] G. Group, "UNDERGROUND MINE COMMUNICATIONS INFRASTRUCTURE GUIDELINES PART III: GENERAL GUIDELINES," 2018. [En ligne]. Disponible: https://gmgroup.org/wp-content/uploads/2019/03/20180921_Underground-Mine-Communications-Infrastructure-III-GMG-UM-v01-r01.pdf
- [19] W. Attaoui, K. Bouraqla, et E. Sabir, "Initial Access & Beam Alignment for mmWave and Terahertz Communications," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 1-1, 01/01 2022. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3161951.
- [20] A. Shallah *et al.*, "Recent Developments of Butler Matrix From Components Design Evolution to System Integration for 5G Beamforming Applications: A Survey," *IEEE Access*, vol. PP, pp. 1-1, 01/01 2022. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3199739.
- [21] S. Kisseleff et B. Ottersten, "Reconfigurable Intelligent Surfaces in Challenging Environments: Underwater, Underground, Industrial and Disaster," *IEEE Access*, vol. PP, pp. 1-1, 11/04 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3125461.
- [22] E. Ghayoula, A. Bouallegue, R. Ghayoula, et J.-Y. Chouinard, "Capacity and Performance of MIMO systems for Wireless Communications," *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 7, pp. 108-111, 07/01 2014. doi: 10.25103/jestr.073.17.
- [23] M. Dajer *et al.*, "Reconfigurable intelligent surface: design the channel – a new opportunity for future wireless networks," *Digital Communications and Networks*, vol. 8, no. 2, pp. 87-104, 2022/04/01/ 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2021.11.002>.
- [24] T. Ma, X. Lei, L. Zhang, Y. Niu, et G. Karagiannidis, "Reconfigurable Intelligent Surface Assisted Localization: Technologies, Challenges, and the Road Ahead," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. PP, pp. 1-1, 01/01 2023. doi: 10.1109/OJCOMS.2023.3292052.

- [25] W. H. Kummer, "Basic array theory," *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, no. 1, pp. 127-140, 1992. doi: 10.1109/5.119572.
- [26] C. Lipps *et al.*, "Connectivity in the era of the (I)IoT: about security, features and limiting factors of reconfigurable intelligent surfaces," *Discover Internet of Things*, vol. 3, no. 1, p. 16, 2023/10/19 2023. doi: 10.1007/s43926-023-00046-1.
- [27] B. Di, H. Zhang, L. Song, Y. Li, Z. Han, et H. V. Poor, "Hybrid Beamforming for Reconfigurable Intelligent Surface based Multi-User Communications: Achievable Rates With Limited Discrete Phase Shifts," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, pp. 1809-1822, 2019.
- [28] M. Baena-Molina, P.-C. Á, G. Martín-García, R. Padial-Allué, P. Padilla, et J. F. Valenzuela-Valdés, "1-bit RIS Unit Cell with Mechanical Reconfiguration at 28 GHz," Dans *2024 18th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2024, pp. 1-5.
- [29] Y. Hong, B. Park, et I. Cho, "Experimental Verification of Liquid Crystal-Based Reconfigurable Intelligent Surface for 6G Communications," Dans *2025 19th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2025, pp. 1-5.
- [30] M. D. Renzo *et al.*, "Smart Radio Environments Empowered by Reconfigurable Intelligent Surfaces: How It Works, State of Research, and The Road Ahead," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 11, pp. 2450-2525, 2020. doi: 10.1109/JSAC.2020.3007211.
- [31] X. Meng, M. Nekovee, et D. Wu, "The Design and Analysis of Electronically Reconfigurable Liquid Crystal-Based Reflectarray Metasurface for 6G Beamforming, Beamsteering, and Beamsplitting," *IEEE Access*, vol. PP, pp. 1-1, 11/08 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3125837.
- [32] R. Malleboina, J. C. Dash, et D. Sarkar, "Design of Anomalous Reflectors by Phase Gradient Unit Cell-Based Digitally Coded Metasurface," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 22, no. 9, pp. 2305-2309, 2023. doi: 10.1109/LAWP.2023.3287031.
- [33] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd: Wiley, 2005.
- [34] Y. J. Tan *et al.*, "Self-adaptive deep reinforcement learning for THz beamforming with silicon metasurfaces in 6G communications," *Optics Express*, vol. 30, no. 15, pp. 27763-27779, 2022/07/18 2022. doi: 10.1364/OE.458823.
- [35] Q. Wu, S. Zhang, B. Zheng, C. You, et R. Zhang, "Intelligent Reflecting Surface-Aided Wireless Communications: A Tutorial," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 5, pp. 3313-3351, 2021. doi: 10.1109/TCOMM.2021.3051897.
- [36] E. Martínez-de-Rioja, Á. F. Vaquero, M. Arrebola, E. Carrasco, J. A. Encinar, et M. Achour, "Passive intelligent reflecting surfaces based on reflectarray panels to enhance 5G millimeter-wave coverage," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 15, no. 1, pp. 3-14, 2023. doi: 10.1017/S1759078722000721.
- [37] L. G. da Silva, Z. Chu, P. Xiao, et A. Cerqueira S, "A varactor-based 1024-element RIS design for mm-waves," *Frontiers in Communications and*

- Networks*, vol. Volume 4 - 2023, 2023-March-22 2023. doi: 10.3389/frcmn.2023.1086011.
- [38] G. C. Alexandropoulos *et al.*, "Reconfigurable Intelligent Surfaces for THz: Hardware Design and Signal Processing Challenges," p. arXiv:2403.07889, 2024. doi: 10.48550/arXiv.2403.07889.
- [39] Y. Li, X. Ma, G. Ptitsyn, et S. Tretyakov, "Perfect Control of Reflection Using Aperiodic Arrays," Dans *2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2023, pp. 1-3.
- [40] M. Elahi, A. Altaf, S. Koziel, et A. Pietrenko-Dabrowska, "Exploring the Beam Squint Effects on Reflectarray Performance: A Comprehensive Analysis of the Specular and Scattered Reflection of the Unit Cell," *Sensors (Basel)*, vol. 24, no. 5, Feb 23 2024. doi: 10.3390/s24051438.
- [41] M. Di Renzo *et al.*, "Reconfigurable Intelligent Surfaces vs. Relaying: Differences, Similarities, and Performance Comparison," p. arXiv:1908.08747, 2019. doi: 10.48550/arXiv.1908.08747.
- [42] E. Björnson, Ö. Özdoğan, et E. G. Larsson, "Intelligent Reflecting Surface Versus Decode-and-Forward: How Large Surfaces are Needed to Beat Relaying?," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, pp. 244-248, January 01, 2020 2020. doi: 10.1109/lwc.2019.2950624.
- [43] S. Sandh, H. Radpour, B. Rainer, M. Hofer, et T. Zemen, "Ray Tracing Algorithm for Reconfigurable Intelligent Surfaces," p. arXiv:2402.13034, 2024. doi: 10.48550/arXiv.2402.13034.
- [44] H. Choi, J. Oh, J. Chung, G. Alexandropoulos, et J. Choi, "WiThRay: A Versatile Ray-Tracing Simulator for Smart Wireless Environments," *IEEE Access*, vol. PP, pp. 1-1, 01/01 2023. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3283610.
- [45] Y. Liu et C. D. Sarris, "Efficient Propagation Modeling for Communication Channels With Reconfigurable Intelligent Surfaces," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 21, no. 10, pp. 2120-2124, 2022. doi: 10.1109/LAWP.2022.3192269.
- [46] J. Huang, C. X. Wang, Y. Sun, J. Huang, et F. C. Zheng, "A Novel Ray Tracing Based 6G RIS Wireless Channel Model and RIS Deployment Studies in Indoor Scenarios," Dans *2022 IEEE 33rd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2022, pp. 884-889.
- [47] "IEEE Recommended Practice for Radio-Frequency (RF) Absorber Evaluation in the Range of 30 MHz to 5 GHz," *IEEE Std 1128-1998*, pp. 1-68, 1998. doi: 10.1109/IEEESTD.1998.87821.
- [48] I. Kuzmanić, I. Vujović, M. Petković, et J. Šoda, "Influence of 3D printing properties on relative dielectric constant in PLA and ABS materials," *Prog Addit Manuf*, pp. 1-8, Feb 21 2023. doi: 10.1007/s40964-023-00411-0.
- [49] P. C. K. C. A. H. S. J. J. Jakus, "Apple iPhone 13 Pro LiDAR Accuracy Assessment for Engineering Applications," 2022. doi: 10.57922/tcr.645.
- [50] M. Ailas, N. Hakem, et N. Kandil, "Analysis of EM reflections in a underground mine for the CBRS band of Private mobile networks," Dans *2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI)*, 2022, pp. 766-767.

- [51] A. Khalaf, "Localisation basée sur l'information de l'état des canaux (CSI) dans un environnement minier souterrain," Master, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Depositum, 2024. [En ligne]. Disponible: <https://depositum.uqat.ca/id/eprint/1577>
- [52] Y. L. Zheng, X. B. Zhao, Q. H. Zhao, J. C. Li, et Q. B. Zhang, "Dielectric properties of hard rock minerals and implications for microwave-assisted rock fracturing," *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, vol. 6, no. 1, p. 22, 2020/01/31 2020. doi: 10.1007/s40948-020-00147-z.
- [53] G. Developers. "Typical Values for Rocks and Other Materials". https://em.geosci.xyz/content/physical_properties/dielectric_permittivity/dielectric_permittivity_values.html
- [54] C. N. A. S. N. H. N. Kandil, "Evaluation Of Wireless Wave Propagation Models In Underground Mines: From Simplified Approaches To 3D Scanning And Digital Twins," présenté à APS-URSI, Ottawa, 2025.
- [55] A. Surier, N. Hakem, et N. Kandil, "Assessing the 28 GHz Channel Capacity Enhancement in NLOS Mine Tunnels Through RIS Deployment," Dans *2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and INC/USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/INC-USNC-URSI)*, 2024, pp. 261-262.
- [56] Mining-Technology. "Lamaque Gold Mine, Val-d'Or, Quebec". <https://www.mining-technology.com/projects/lamaque-gold-mine-val-dor-quebec/>
- [57] E. Björnson, Ö. Ö, et E. G. Larsson, "Reconfigurable Intelligent Surfaces: Three Myths and Two Critical Questions," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 12, pp. 90-96, 2020. doi: 10.1109/MCOM.001.2000407.
- [58] Ekahau. "Ekahau Sidekick 2 | Wi-Fi Validation & Measurement for 2.4/5/6Ghz Networks". <https://www.ekahau.com/products/ekahau-connect/sidekick-2/>