

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Télécommunications

**Spécialité** : Réseaux et Télécommunications

**Par** : BADAOUI BOCHRA

**Sujet**

### **Étude des Surfaces Reconfigurables Intelligentes (RIS) pour les Réseaux 6G**

Soutenu publiquement, le 22 / 06 / 2025 , devant le jury composé de :

M. FEHAM Mohammed	Pr.	Université de Tlemcen	Président
M. KHELLADI Mounir	MCA	Université de Tlemcen	Examineur
M. BOUACHA Abdelhafid	Pr.	Université de Tlemcen	Encadreur
M. BARHI Sidi Mohammed	MCA	Université de Tlemcen	Invité




## Remerciements

Je rends grâce à Allah, Le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la force, la persévérance et la patience nécessaires à la réalisation de ce projet.

J'adresse mes sincères remerciements à mon encadrant, le Professeur **BOUACHA Abdelhafid**, pour son accompagnement constant, sa disponibilité, et ses précieux conseils tout au long de ce travail. Son implication a été déterminante dans l'aboutissement de ce projet.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude au Professeur émérite **FEHAM Mohammed** pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de soutenance, ainsi qu'à Monsieur **KHELLADI Mounir** pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire.

Enfin, je remercie chaleureusement l'ensemble du personnel du **département de télécommunications** pour leur professionnalisme et leur engagement au service des étudiants.





## *Dédicaces*

*Je dédie ce projet...*

À mes chers parents,

Merci du fond du cœur pour votre soutien indéfectible tout au long de mon parcours académique.

Sans vos sacrifices et vos encouragements constants, rien de tout cela n'aurait été possible.

Ce succès est avant tout le vôtre, bien avant d'être le mien.

À mes frères,

Merci pour votre présence, votre motivation et vos encouragements précieux.

À mes amies,

Merci d'avoir été là pour me soutenir en ce moment important.

À tous les membres de ma famille,

Merci pour votre bienveillance et votre appui, de près ou de loin

## ملخص

يستعرض هذا البحث دور الأسطح الذكية القابلة لإعادة التهيئة (RIS) في تعزيز أداء شبكات الاتصالات اللاسلكية من الجيل السادس (6G). يبدأ البحث بتحليل محدوديات التقنيات الحالية ومتطلبات الشبكات المستقبلية من حيث القدرة على الاتصال، تقليل الكمون، وتحسين كفاءة الطاقة. يتم التطرق إلى المبادئ النظرية لتقنية RIS، مع إبراز قدرتها على إعادة تشكيل بيئة الانتشار بشكل ديناميكي. كما تُعرض نماذج مفصلة لقنوات الاتصال اللاسلكي والأنظمة المعتمدة على RIS، بما في ذلك الاعتبارات الفيزيائية وتكوينات أنظمة MIMO.

أجريت محاكاة عددية دقيقة في بيئات متعددة تغطي النطاقات دون 6 جيجاهرتز والموجات المليمترية، وأظهرت النتائج أن استخدام RIS يؤدي إلى تحسينات ملحوظة في نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR)، سعة القناة، ومعدل الخطأ في البتات (BER)، وذلك عند تهيئة النظام بشكل أمثل. وقد حُدثت عتبات حرجة لعدد عناصر RIS لضمان الأداء، حيث تبين أن الأداء الأمثل يتطلب ما لا يقل عن 64 عنصرًا للنطاقات دون 6GHz، و256 عنصرًا أو أكثر في نطاق الموجات المليمترية. كما تؤكد الدراسة على أهمية تحقيق توازن فعال بين عدد هوائيات الإرسال والاستقبال. وتُختتم الدراسة بتقديم توصيات عملية تهدف إلى ضمان نشر فعال لتقنيات RIS في شبكات الجيل السادس.

## الكلمات المفتاحية

الجيل السادس (6G)، الأسطح الذكية القابلة لإعادة التهيئة (RIS)، النطاق دون 6 جيجاهرتز (sub-6GHz)، الموجات المليمترية (mmWave)، نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR)، معدل الخطأ في البتات (BER)

### Résumé

Ce mémoire explore le rôle des Surfaces Intelligentes Reconfigurables (RIS) dans l'optimisation des réseaux sans fil de sixième génération (6G). Il débute par une analyse des limites des technologies actuelles et des exigences futures en matière de connectivité, de latence et d'efficacité énergétique. Les fondements théoriques des RIS sont présentés, mettant en lumière leur capacité à reconfigurer dynamiquement l'environnement de propagation. Une modélisation détaillée des canaux radio et des systèmes RIS est ensuite proposée, intégrant les effets physiques et les configurations MIMO. Des simulations numériques rigoureuses sont menées dans différents scénarios (sub-6GHz et mmWave). Les résultats montrent que les RIS améliorent significativement le SNR, la capacité et le BER, à condition d'un dimensionnement adapté. Un seuil critique est identifié autour de 64 éléments pour les bandes sub-6GHz, et  $\geq 256$  pour les bandes millimétriques. L'étude met également en évidence l'importance de l'équilibre entre antennes d'émission et de réception. Enfin, des recommandations pratiques sont formulées pour le déploiement efficace des RIS dans les réseaux 6G.

**Mots-clés** : Réseaux 6G, Surfaces Intelligentes Reconfigurables (RIS), Bande sub-6GHz, Bande millimétrique (mmWave), Rapport signal sur bruit (SNR), Taux d'erreur binaire (BER)

## **Abstract**

This thesis explores the role of Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) in optimizing sixth-generation (6G) wireless networks. It begins with an analysis of the limitations of current technologies and the future requirements in terms of connectivity, latency, and energy efficiency. The theoretical foundations of RIS are presented, highlighting their ability to dynamically reconfigure the propagation environment. A detailed modeling of radio channels and RIS-based systems is proposed, incorporating physical effects and MIMO configurations. Rigorous numerical simulations are conducted across various scenarios (sub-6GHz and mmWave). Results show that RIS significantly improve SNR, capacity, and BER, provided they are properly dimensioned. A critical threshold is identified around 64 elements for sub-6GHz bands, and  $\geq 256$  for millimeter-wave bands. The study also emphasizes the importance of balancing transmit and receive antennas. Finally, practical recommendations are proposed for the efficient deployment of RIS in future 6G networks.

## **Keywords**

6G Networks, Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS), Sub-6GHz Band, Millimeter-Wave (mmWave) Band, Signal-to-Noise Ratio (SNR), Bit Error Rate (BER)

# Sommaire

Dédicace .....	I
Remerciements .....	II
Résumé .....	III
Abstract .....	IV
ملخص .....	V
Sommaire .....	VI
Liste des figures .....	IX
Liste des tableaux .....	X
Liste des abreviations .....	XI

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre 1 : Fondements des Réseaux 6G et des Surfaces Reconfigurables Intelligentes (RIS)

1.1 Introduction .....	3
1.2 Bref historique des générations de réseaux mobiles de la 1G à la 5G.....	3
1.2.1 Première génération (1G) .....	3
1.2.2 Deuxième génération (2G) .....	4
1.2.3 Troisième génération (3G) .....	4
1.2.4 Quatrième génération (4G).....	4
1.2.5 Cinquième génération (5G) .....	4
1.3 Limites des technologies actuelles .....	5
1.3.1 Propagation des ondes millimétriques.....	6
1.3.2 Défis de couverture .....	6
1.3.3 Efficacité spectrale et énergétique.....	6
1.3.4 Limitations de capacité face aux besoins croissants.....	7
1.4 Exigences et attentes des réseaux 6G .....	7
1.4.1 Nouveaux cas d'usage envisagés.....	7
1.4.2 Objectifs de performance .....	8
1.4.3 Exigences en matière d'intelligence réseau.....	9
1.4.4 Intégration des technologies émergentes.....	9
1.5 Défis technologiques pour la 6G .....	9
1.5.1 Propagation aux fréquences Térhertz (THz).....	9

1.5.2 Miniaturisation et intégration des composants .....	10
1.5.3 Intelligence distribuée et EDGE computing .....	10
1.5.4 Optimisation systémique et complexité du réseau .....	10
1.6 Fondements des Surfaces Reconfigurables Intelligentes.....	10
1.6.1 Définition et principes de fonctionnement des RIS .....	10
1.6.2 Architecture physique et composants des RIS .....	11
1.6.3 Mécanismes de reconfiguration des surfaces .....	12
1.6.4 Comparaison avec d'autres technologies (MIMO massif, relais, etc.) .....	13
1.7 Applications potentielles des RIS dans les réseaux 6G.....	15
1.8 Conclusion.....	17

**Chapitre 2 : Modélisation des Surfaces Intelligentes Reconfigurables pour la Propagation Radio**

2.1 Introduction.....	19
2.2 Canaux de propagation radio : fondements et modèles.....	19
2.2.1 Phénomènes de propagation .....	19
2.2.2 Propagation en espace libre .....	20
2.2.3 Réflexion, diffraction et diffusion .....	20
2.2.4 Pénétration et absorption .....	23
2.2.5 Ligne de visée (LOS/NLOS).....	24
2.3 Modèles statistiques de canal .....	25
2.3.1 Évanouissement à grande échelle (Large-scale fading).....	25
2.3.2 Évanouissement à petite échelle (Small-scale fading) .....	26
2.4 Modélisation selon la configuration système .....	27
2.4.1 Modèle SISO (Single-Input Single-Output).....	27
2.4.2 Modèle MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) .....	28
2.5 Caractérisation de canal.....	29
2.6 Modélisation des Canaux à Haute Fréquence.....	29
2.7 Modélisation des Systèmes RIS .....	30
2.7.1 Modèle général : Système RIS-SISO .....	31
2.7.2 Communication avec Plusieurs RIS .....	33
2.8 Stratégies de Sélection de RIS.....	35
2.8.1 Sélection basée sur la géométrie.....	35
2.8.2 Sélection basée sur la qualité du canal .....	35
2.8.3 Sélection hybride et allocation dynamique.....	35
2.8.4 Sélection de la meilleure RIS .....	35
2.9 Conclusion.....	36

**Chapitre 3 : Validation numérique et analyse des performances**

3.1 Introduction ..... 38

3.2 Modèles du canal de propagation ..... 38

3.3 Paramètres de simulation..... 39

3.4 Métriques d'évaluation ..... 40

3.4.1 Rapport signal sur bruit (SNR) au récepteur : ..... 40

3.4.2 Capacité du canal (bits/s/Hz) : ..... 40

3.4.3 Taux d'erreur binaire (BER) : ..... 40

3.5 Analyse des résultats de simulations ..... 41

3.5.1 Analyse de la capacité du canal de transmission..... 41

3.5.2 Analyse de la perte de parcours..... 43

3.5.3 Analyse du rapport signal sur bruit moyen (SNR) ..... 45

3.5.4 Analyse du Taux d'erreur binaire (BER) ..... 46

3.5.4.1 Système SISO assisté par RIS ..... 46

3.5.4.2 Système MIMO assisté par RIS ..... 49

3.6 Synthèse des principaux résultats..... 53

3.7 Implications pratiques et recommandations de déploiement..... 53

3.8 Conclusion..... 53

Conclusion générale ..... 55

Bibliographie ..... 58

# Liste des figures

## Chapitre 1 : Fondements des Réseaux 6G et des Surfaces Reconfigurables Intelligentes (RIS)

Figure 1.1 : Limites technologiques de la 5G selon différents critères d'évaluation .....	5
Figure 1.2 : Principaux obstacles à la propagation des ondes millimétriques dans les réseaux sans fil. .	6
Figure 1.3 : Cas d'usage clés de la 6G.....	8
Figure 1.4 : Architecture physique d'une Surface Reconfigurable Intelligente.....	12
Figure 1.5 : Applications typiques des surfaces intelligentes reconfigurables (IRS) dans les réseaux sans fil.....	16

## Chapitre 2 : Modélisation des Surfaces Intelligentes Reconfigurables pour la Propagation Radio

Figure 2.1 : Mécanisme de réflexion.....	20
Figure 2.2 : Mécanisme de diffraction.....	21
Figure 2.3 : Mécanisme de diffusion.....	22
Figure 2.4 : La ligne de visée (Line-of-Sight, LOS).....	23
Figure 2.5 : Canal SISO .....	27
Figure 2.6 : Canal MIMO.....	27
Figure 2.7 : Système SISO assisté par une surface intelligente reconfigurable (RIS), composé d'un chemin direct et d'une RIS avec $N$ éléments réfléchissant.....	29
Figure 1.8 : Transmission via plusieurs surfaces intelligentes reconfigurables (RIS) scénario de propagation en intérieur.....	32
Figure 1.9 : Transmission via plusieurs surfaces intelligentes reconfigurables (RIS), scénario de propagation en extérieur.....	33

## Chapitre 3 : Validation numérique et analyse des performances

Figure 3.1 : Configuration d'un système de communication assisté par une surface intelligente reconfigurable (RIS), modélisé selon le scénario UMi du 3GPP.....	4
Figure 3.2 : Évolution de la capacité du canal en fonction de la distance pour différentes valeurs de $NRIS$ , selon le modèle 3GPP UMi à une fréquence centrale de 2,4 GHz.....	5
Figure 3.3 : Évolution de la capacité du canal en fonction de la distance pour différentes valeurs de $NRIS$ , selon le modèle 5G UMi-Street Canyon à une fréquence centrale de 28 GHz.....	6
Figure 3.4 : Perte de parcours en fonction de la distance horizontale pour différentes valeurs de $NRIS$ , modèle 3GPP UMi à 2,4 GHz.....	7
Figure 3.5 : Perte de parcours en fonction de la distance horizontale pour différentes valeurs de $NRIS$ , modèle 5G UMi-Street Canyon à 28GHz.....	8
Figure 3.6: Comparaison du SNR en fonction de la distance pour les configurations avec et sans RIS, modèle 3GPP UMi, $f_c = 2.4 GHz$ .....	9
Figure 3.7: Comparaison du SNR en fonction de la distance pour les configurations avec et sans RIS, modèle 5G UMi-Street Canyon, $f_c = 28 GHz$ .....	10
Figure 3.8: RIS-Assisted BPSK: BER vs SNR. Modèle 3GPP UMi, $f_c = 2.4 GHz$ .....	11
Figure 3.9 : RIS-Assisté BPSK: BER vs SNR (5G UMi-Street Canyon @ 28 GHz).....	12
Figure 3.10 : BER en fonction du SNR pour une configuration MIMO 2×2 avec RIS.....	13
Figure 3.11 : BER en fonction du SNR pour une configuration MIMO 2×4 avec RIS.....	14
Figure 3.12 : BER en fonction du SNR pour une configuration MIMO 4×2 avec RIS.....	15

# Liste des tableaux

## **Chapitre 1 : Fondements des Réseaux 6G et des Surfaces Reconfigurables Intelligentes (RIS)**

Tableau 1.1 : Évolution des Générations de Réseaux Mobiles : Débits, Latences et Usages.....	5
Tableau 1.2 : Comparaison des performances attendues entre la 5G et la 6G .....	7
Tableau 1.3 : Comparaison des technologies d'extension de couverture et d'amélioration de la connectivité dans les réseaux sans fil .....	15

## **Chapitre 2 : Modélisation des Surfaces Intelligentes Reconfigurables pour la Propagation Radio**

Tableau 2.1 : Atténuation typique de différents matériaux à 2.4 GHz et 60 GHz [33]. .....	21
---	----

## **Chapitre 3 : Validation numérique et analyse des performances**

Tableau 3.1: Paramètres de simulation .....	2
---	---

## Liste des abréviations

Abréviation	Signification
<b>6G</b>	Sixième génération de réseaux mobiles
<b>RIS</b>	Reconfigurable Intelligent Surface (Surface Intelligente Reconfigurable)
<b>SNR</b>	Signal-to-Noise Ratio (Rapport Signal sur Bruit)
<b>BER</b>	Bit Error Rate (Taux d'Erreur Binaire)
<b>LOS</b>	Line of Sight (Ligne de Visée)
<b>NLOS</b>	Non-Line of Sight (Hors Ligne de Visée)
<b>UMi</b>	Urban Micro-cell (Micro-cellule Urbaine)
<b>3GPP</b>	3rd Generation Partnership Project
<b>GHz</b>	Gigahertz
<b>dB</b>	Décibel
<b>bps/Hz</b>	Bits par seconde par Hertz (capacité spectrale)
<b>MIMO</b>	Multiple Input Multiple Output
<b>SISO</b>	Single Input Single Output
<b>BPSK</b>	Binary Phase Shift Keying
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation
<b>AWGN</b>	Additive White Gaussian Noise (Bruit Blanc Gaussien Additif)
<b><math>f_c</math></b>	Fréquence porteuse
<b><math>P_t</math></b>	Puissance de transmission
<b>N</b>	Nombre d'éléments RIS
<b>K</b>	Facteur de Rice (rapport LOS/NLOS)
<b>d</b>	Distance entre émetteur et récepteur
<b>PL</b>	Path Loss (Perte de parcours)

# **Introduction générale**

# Introduction générale

L'évolution fulgurante des technologies de communication sans fil a profondément modifié notre manière de vivre, de travailler et d'interagir avec notre environnement. Depuis les premières générations de réseaux mobiles jusqu'à la 5G, chaque saut technologique a permis d'atteindre de nouveaux sommets en matière de débit, de latence, de connectivité et de services. Toutefois, malgré les avancées remarquables de la 5G, certaines limites structurelles demeurent : couverture incomplète, consommation énergétique élevée, saturation spectrale, et difficulté à répondre aux exigences croissantes des applications émergentes telles que la réalité étendue, les véhicules autonomes ou l'Internet des objets massif.

Dans cette perspective, la sixième génération de réseaux mobiles (6G), attendue à l'horizon 2030, se positionne comme une rupture technologique majeure. Elle ambitionne de dépasser les simples améliorations incrémentales pour proposer une refonte complète de l'architecture réseau, intégrant nativement des technologies de pointe telles que l'intelligence artificielle distribuée, les communications térahertz, les jumeaux numériques, et surtout, les Surfaces Intelligentes Reconfigurables (RIS).

Les RIS représentent une innovation de rupture dans le domaine des communications sans fil. Contrairement aux approches conventionnelles qui adaptent les signaux à un canal subi, les RIS permettent de reconfigurer dynamiquement l'environnement de propagation lui-même. Composées de métasurfaces programmables, elles peuvent manipuler les ondes électromagnétiques en temps réel, en ajustant leur phase, leur amplitude ou leur direction. Cette capacité à transformer un canal passif en un canal actif et contrôlable ouvre des perspectives inédites pour améliorer la couverture, réduire les interférences, renforcer la sécurité et optimiser l'efficacité énergétique des réseaux.

Ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique d'innovation et vise à explorer le potentiel des Surfaces Intelligentes Reconfigurables (RIS) dans le cadre des futurs réseaux 6G. Il s'articule autour de trois chapitres complémentaires, chacun apportant une contribution spécifique à la compréhension, à la modélisation et à l'évaluation de cette technologie :

- **Le premier chapitre** pose les fondements théoriques des réseaux 6G et des RIS. Il retrace l'évolution des générations de réseaux mobiles, identifie les limites des technologies actuelles, et présente les exigences, les cas d'usage et les défis technologiques associés à la 6G. Une attention particulière est portée à la définition, au fonctionnement et aux applications potentielles des RIS dans ce nouveau paradigme.
- **Le deuxième chapitre** est consacré à la modélisation des canaux de propagation et des systèmes RIS. Il décrit les phénomènes physiques (réflexion, diffraction, diffusion), les modèles statistiques (Rayleigh, Rician, Nakagami). Ce chapitre introduit également les modèles spécifiques aux RIS, y compris les architectures multi-RIS et les stratégies de sélection optimales.
- **Le troisième chapitre** présente une validation numérique approfondie à travers des simulations rigoureuses. Il analyse l'impact des RIS sur des métriques clés telles que le SNR, la capacité du canal, le taux d'erreur binaire (BER) et l'atténuation de parcours, dans différents scénarios de propagation (sub-6GHz et mmWave).

L'objectif de ce travail est double : d'une part, démontrer de manière quantitative et qualitative l'apport des RIS dans des environnements de propagation complexes ; d'autre part, proposer des recommandations concrètes pour leur déploiement optimal, en tenant compte des contraintes technologiques, économiques et environnementales.

# **Chapitre 1 : Fondements des Réseaux 6G et des Surfaces Reconfigurables Intelligentes (RIS)**

# Chapitre 1 : Fondements des Réseaux 6G et des Surfaces Reconfigurables Intelligentes (RIS)

---

1.1 Introduction .....	3
1.2 Bref historique des générations de réseaux mobiles de la 1G à la 5G.....	3
1.3 Limites des technologies actuelles .....	5
1.4 Exigences et attentes des réseaux 6G .....	7
1.5 Défis technologiques pour la 6G .....	9
1.6 Fondements des Surfaces Reconfigurables Intelligentes.....	10
1.7 Applications potentielles des RIS dans les réseaux 6G.....	15
1.8 Conclusion.....	17

---

## 1.1 Introduction

L'évolution des réseaux mobiles a profondément transformé notre manière de communiquer, d'accéder à l'information et d'interagir avec notre environnement. Depuis la première génération (1G) jusqu'à la cinquième (5G), chaque transition technologique a apporté son lot d'innovations, répondant aux besoins croissants en matière de débit, de latence, de connectivité et de services. Toutefois, malgré les avancées significatives de la 5G, certaines limites persistent, notamment en ce qui concerne la couverture, la consommation énergétique, la densité de connexion et la gestion intelligente des ressources.

Dans ce contexte, la sixième génération de réseaux mobiles (6G) se profile comme une réponse ambitieuse aux exigences futures, en intégrant des technologies de rupture capables de repousser les frontières actuelles. Ce chapitre propose un aperçu historique des générations précédentes, identifie les limites des technologies actuelles, et présente les attentes clés pour la 6G. Il met également en lumière les défis technologiques majeurs à relever, avant d'introduire les Surfaces Reconfigurables Intelligentes (RIS), une technologie émergente prometteuse pour répondre aux enjeux de la 6G. Enfin, les applications potentielles des RIS dans les futurs réseaux sont explorées, illustrant leur rôle central dans l'architecture des communications de demain.

## 1.2 Bref historique des générations de réseaux mobiles de la 1G à la 5G

### 1.2.1 Première génération (1G)

La première génération de réseaux mobiles, dite 1G, a été introduite au début des années 1980, avec le premier réseau commercial lancé au Japon en 1981, suivi des États-Unis en 1983. Cette génération reposait sur une technologie de transmission analogique, utilisant principalement la norme AMPS (Advanced Mobile Phone System). Conçue exclusivement pour la communication vocale, la 1G souffrait de plusieurs limitations majeures : une sécurité très faible rendant les communications facilement interceptables, une couverture géographique restreinte et une capacité réseau limitée. Le débit de transmission ne dépassait pas 2,4 kb/s, tandis que la latence restait élevée et non optimisée, ce qui limitait considérablement la qualité du service et les possibilités d'évolution vers des usages plus avancés [1].

### 1.2.2 Deuxième génération (2G)

La deuxième génération, ou 2G, a été lancée en 1991 en Finlande avec l'introduction du standard GSM (Global System for Mobile Communications). Elle marque le passage décisif de la transmission analogique à la transmission numérique, ce qui a permis une amélioration significative de la qualité audio et une meilleure efficacité spectrale. La 2G a introduit de nouvelles fonctionnalités comme les SMS et MMS, qui ont transformé les usages mobiles en ouvrant la voie à la messagerie texte. Elle a également apporté une sécurité renforcée grâce au chiffrement des communications. En termes de performances, les débits variaient de 9,6 kb/s pour les services de base jusqu'à environ 200 kb/s avec l'introduction d'EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution), tandis que la latence restait relativement élevée, autour de 300 millisecondes. Cette génération a aussi permis les premiers accès à Internet mobile via des protocoles comme WAP (Wireless Application Protocol), posant ainsi les bases des services de données mobiles modernes [2].

### 1.2.3 Troisième génération (3G)

La troisième génération des réseaux mobiles, ou 3G, a été introduite en 2001 au Japon par l'opérateur NTT DoCoMo, puis en 2003 en Europe. Elle s'appuie sur des technologies clés telles que l'UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), le W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) et le HSPA (High Speed Packet Access), qui ont permis une nette amélioration des performances par rapport à la 2G. La 3G a été la première à offrir un accès à l'Internet mobile à haut débit, ouvrant la voie à de nouveaux usages comme la visiophonie, le streaming audio/vidéo et les jeux en ligne. Elle a également permis une meilleure prise en charge des services multimédias et une navigation web plus fluide. Les débits atteignaient jusqu'à 2 Mb/s en mobilité, et jusqu'à 42 Mb/s avec le HSPA+, tandis que la latence était réduite à environ 100 à 150 millisecondes. Cette génération a ainsi marqué une étape cruciale dans la transition vers les services mobiles orientés données [3].

### 1.2.4 Quatrième génération (4G)

La quatrième génération, ou 4G, a été commercialisée pour la première fois en 2009 en Suède et en Norvège. Elle repose sur la technologie LTE (Long Term Evolution) et sa version améliorée LTE-Advanced, qui ont permis une rupture technologique majeure avec les générations précédentes. La 4G a introduit la convergence IP, en unifiant la transmission de la voix, des données et de la vidéo sur un même protocole, ce qui a simplifié l'architecture réseau et accru l'efficacité. Elle a également offert un accès Internet mobile à très haut débit, avec des vitesses allant jusqu'à 1 Gb/s en stationnaire et typiquement entre 100 et 300 Mb/s en mobilité. La latence a été considérablement réduite, atteignant environ 30 à 50 millisecondes, ce qui a permis le développement d'usages exigeants en temps réel comme le streaming HD, les vidéoconférences et le cloud computing mobile. Grâce à une meilleure efficacité spectrale et une gestion optimisée des ressources radio, la 4G a préparé le terrain pour l'essor massif des smartphones et des services mobiles connectés [4].

### 1.2.5 Cinquième génération (5G)

La cinquième génération des réseaux mobiles, ou 5G, a commencé à être déployée commercialement en 2019 dans plusieurs régions du monde, notamment en Corée du Sud, en Chine, aux États-Unis et en Europe. Elle s'appuie sur des technologies de pointe telles que NR (New Radio), le MIMO massif (Multiple-Input Multiple-Output), le beamforming, l'utilisation de fréquences millimétriques et le network slicing, qui permet de découper le réseau en tranches virtuelles adaptées à différents usages. La 5G se distingue par ses performances remarquables : des débits théoriques allant

jusqu'à 10 Gb/s (en pratique autour de 1 Gb/s) et une latence extrêmement faible, inférieure à 10 millisecondes, pouvant descendre à 1 ms pour les applications critiques. Elle offre également une capacité inédite de connexion simultanée d'un très grand nombre d'objets, ce qui est essentiel pour le déploiement de l'Internet des objets (IoT) massif. Grâce à ces avancées, la 5G ouvre la voie à des cas d'usage innovants et à forte exigence technologique, comme la réalité augmentée/virtuelle, les véhicules autonomes, la robotique connectée, ou encore l'industrie 4.0, en permettant des communications fiables, rapides et adaptatives [5] [6].

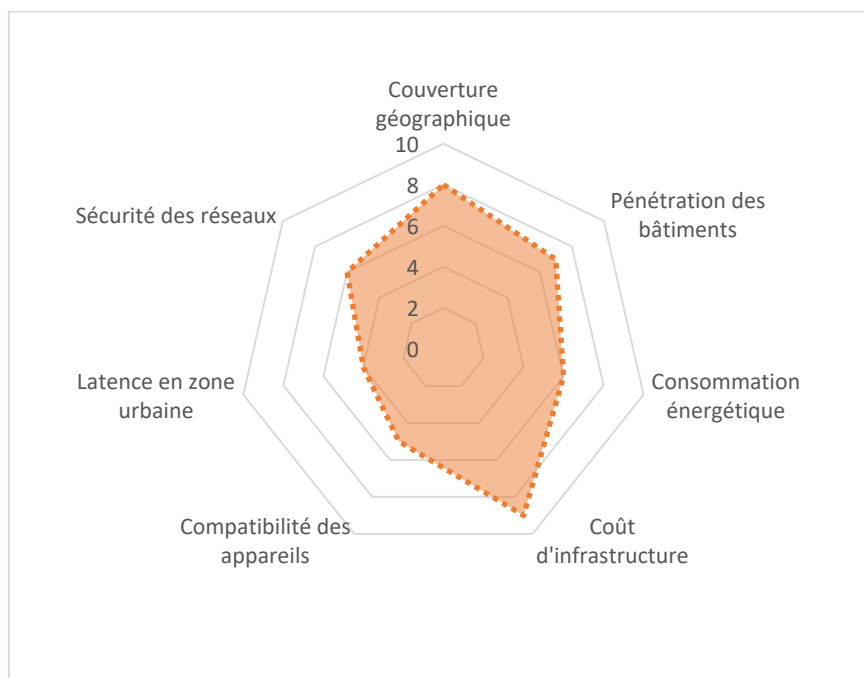
Le **Tableau 1.1** présente l'évolution des générations de réseaux mobiles, de la 1G à la 5G, en mettant en évidence leurs principales caractéristiques techniques telles que le débit maximal théorique, la latence, ainsi que les usages dominants associés à chaque génération.

**Tableau 1.1 : Évolution des Générations de Réseaux Mobiles : Débits, Latences et Usages**

Génération	Début	Débit max (théorique)	Latence	Usages principaux
<b>1G</b>	1980s	~2,4 kb/s	élevé	Voix (analogique)
<b>2G</b>	1991	~200 kb/s	~300 ms	Voix, SMS
<b>3G</b>	2001	~2-42 Mb/s	~150 ms	Web, vidéo
<b>4G</b>	2009	~1 Gb/s	~30 ms	Streaming HD, cloud
<b>5G</b>	2019	~10 Gb/s	<10 ms	VR/AR, IoT, V2X

### 1.3 Limites des technologies actuelles

Bien que la 5G représente un progrès majeur par rapport aux générations précédentes de réseaux mobiles, elle présente plusieurs limitations techniques qui doivent être prises en compte pour son déploiement à grande échelle et son efficacité future **Figure 1.1** [7].



**Figure 1.1 : Limites technologiques de la 5G selon différents critères d'évaluation**

### 1.3.1 Propagation des ondes millimétriques

L'un des principaux défis de la 5G est l'utilisation de bandes de fréquence millimétriques (30 GHz à 100 GHz), qui offrent des débits très élevés. Cependant, ces ondes présentent une faible portée et une capacité de pénétration limitée à travers les obstacles, tels que les bâtiments et autres structures **Figure 1.2**. Cela est dû à leur forte atténuation en espace libre et leur vulnérabilité aux conditions climatiques (pluie, neige, humidité), rendant leur propagation moins fiable que celle des ondes plus basses fréquences utilisées dans les technologies précédentes. Pour compenser cette limitation, des réseaux à densité élevée de stations de base et d'antennes doivent être déployés, ce qui peut augmenter les coûts et complexifier la gestion du réseau [8].

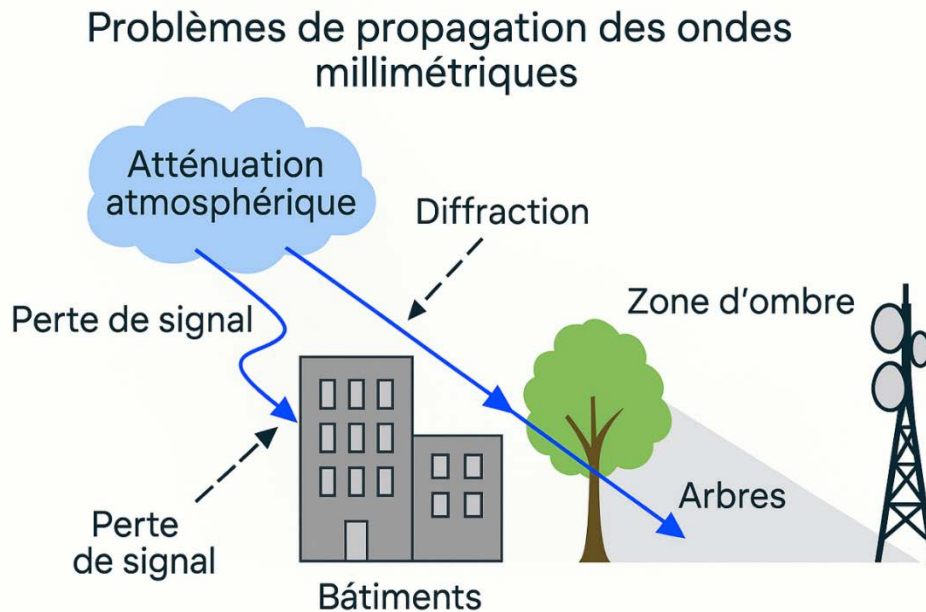


Figure 1.2 : Principaux obstacles à la propagation des ondes millimétriques dans les réseaux sans fil.

### 1.3.2 Défis de couverture

La couverture géographique reste un défi majeur avec la 5G. En raison de la faible portée des ondes millimétriques, la 5G nécessitera un nombre considérablement plus élevé de stations de base et de petites cellules pour assurer une couverture continue et homogène, en particulier dans les zones urbaines denses. Le déploiement des stations de base en zones rurales ou dans des endroits difficiles d'accès sera particulièrement coûteux et logistique complexe. Cela soulève des préoccupations concernant la fracture numérique et la difficulté d'offrir une couverture complète à la population mondiale [7].

### 1.3.3 Efficacité spectrale et énergétique

Bien que la 5G offre des améliorations substantielles en termes d'efficacité spectrale, l'utilisation de bandes de fréquence plus larges et le besoin de densifier les réseaux augmentent les demandes en énergie. Les stations de base et autres équipements du réseau 5G consomment plus d'énergie, ce qui pose des questions sur la durabilité énergétique du réseau à long terme. De plus, les technologies comme

le massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) et les techniques de beamforming nécessitent un matériel plus complexe, ce qui peut augmenter la consommation d'énergie et rendre les réseaux moins écologiques.

L'efficacité spectrale, bien que meilleure que dans les générations précédentes, peut être limitée par des facteurs comme la gestion dynamique des fréquences, la coordination entre les utilisateurs dans des zones denses et les interférences entre cellules. L'optimisation de ces paramètres est cruciale pour garantir que la 5G puisse soutenir un nombre croissant d'utilisateurs tout en maximisant l'utilisation du spectre [7][8].

### 1.3.4 Limitations de capacité face aux besoins croissants

Un autre défi majeur de la 5G réside dans sa capacité à gérer les besoins croissants en termes de données et de connectivité. Les attentes pour les services comme la réalité augmentée (AR), la réalité virtuelle (VR), les véhicules autonomes, et l'Internet des objets (IoT) sont en constante augmentation, générant une demande de capacité colossale. Bien que la 5G ait été conçue pour être capable de supporter des milliards d'appareils connectés, la saturation du réseau reste une problématique potentielle à mesure que le nombre d'utilisateurs et d'appareils augmente. La gestion de cette demande nécessite des améliorations de l'infrastructure réseau, un contrôle plus précis de l'allocation des ressources et des innovations en matière de réseau (telles que le network slicing et l'utilisation de réseaux privés) [7][8].

## 1.4 Exigences et attentes des réseaux 6G

Alors que la 5G commence à se généraliser à l'échelle mondiale, la recherche académique et industrielle se tourne déjà vers la sixième génération des réseaux mobiles (6G), dont le déploiement commercial est attendu à l'horizon 2030. La 6G ne se contentera pas d'améliorer les performances de la 5G : elle vise à réinventer l'architecture réseau pour répondre aux besoins croissants de la société numérique et des applications émergentes à très forte intensité de données et de connectivité **Tableau 1.2** [9].

**Tableau 1.2 : Comparaison des performances attendues entre la 5G et la 6G**

Catégorie	5G	6G
Débit (Gbit/s)	10	100+
Latence (ms)	1	< 0.1
Fiabilité (%)	~100	~100
Densité (appareils/km <sup>2</sup> )	1 million	10+ millions
Efficacité énergétique	1	10+

### 1.4.1 Nouveaux cas d'usage envisagés

La 6G devra répondre à des cas d'usage radicalement nouveaux ou nécessitant des performances extrêmes, qui dépassent les capacités actuelles **Figure 1.3** [9] :

- Holoportation (téléprésence holographique en temps réel)
- Réalité étendue (XR) avec ultra-haute fidélité sensorielle

- Internet des sens, intégrant la perception haptique, olfactive et visuelle
- Intelligence ambiante (réseaux sensibles au contexte, adaptatifs)
- Commandes à distance ultra-précises pour la télémédecine chirurgicale ou les drones autonomes
- Réseaux tactiles à latence quasi nulle pour les applications industrielles ou critiques
- Connectivité 3D intégrée, y compris dans les airs (drones, avions) et dans l'espace (satellites LEO)

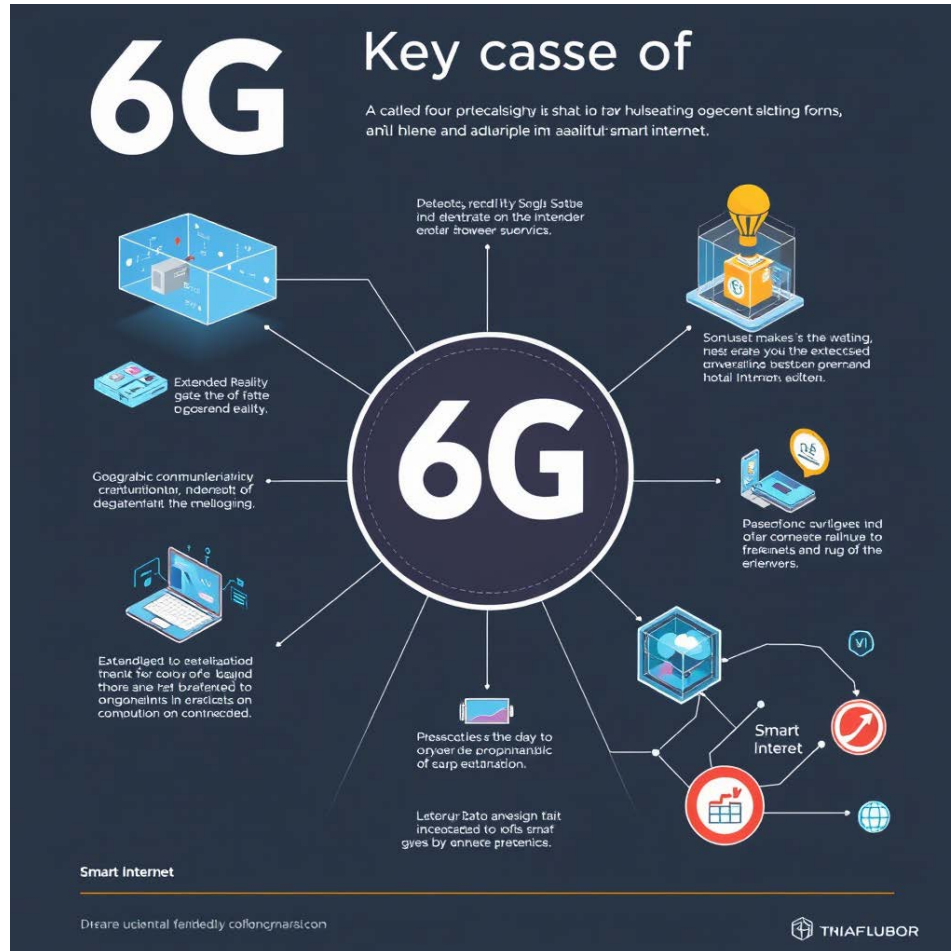


Figure 1.3 : Cas d'usage clés de la 6G

### 1.4.2 Objectifs de performance

Les réseaux 6G viseront à repousser toutes les limites de performance atteintes par la 5G. Les principaux objectifs sont les suivants [9] :

- Débit de transmission : jusqu'à 1 Tb/s en crête (vs ~10 Gb/s pour la 5G)
- Latence de bout en bout : < 0,1 ms pour des communications en temps réel extrême
- Densité de connexion : >  $10^7$  appareils/km<sup>2</sup>, notamment pour l'IoT massif
- Efficacité spectrale et énergétique : amélioration x10 par rapport à la 5G
- Fiabilité : > 99,99999 % pour les applications critiques
- Précision de localisation : < 10 cm en intérieur, < 1 m en extérieur

### 1.4.3 Exigences en matière d'intelligence réseau

Une transformation clé du réseau 6G reposera sur son intelligence native. Cela inclut [9] :

- Intégration massive de l'intelligence artificielle (IA) et du machine learning (ML) pour la gestion automatique des ressources radio, la prédiction du trafic, l'orchestration du slicing ou l'auto-optimisation.
- Réseaux auto-adaptatifs, capables de reconfigurer dynamiquement les fonctions selon les conditions du canal, la mobilité, ou les priorités applicatives.
- Edge AI : déploiement de capacités d'IA décentralisées à la périphérie du réseau (edge computing) pour répondre aux contraintes de latence et de traitement local.
- Apparition du Digital Twin Networking, où chaque élément physique du réseau a un modèle numérique virtuel pour optimiser la maintenance, l'allocation des ressources et la sécurité.

### 1.4.4 Intégration des technologies émergentes

La 6G devra également intégrer un ensemble de technologies de rupture, actuellement en cours de maturation [9]:

- THz communications (0,1 à 10 THz) pour atteindre des débits extrêmes
- RIS (Reconfigurable Intelligent Surfaces) pour le contrôle intelligent de la propagation radio
- Réseaux holographiques utilisant les surfaces actives intelligentes
- Technologies quantiques, notamment pour la sécurité des communications (QKD)
- Intégration spatiale-terrestre : fusion des réseaux terrestres avec les réseaux satellites (6G non-terrestre)
- Électronique bio-compatible et communications corps-à-corps pour les cas d'usage médicaux
- Énergie ambiante et RF harvesting pour l'auto-alimentation des terminaux IoT

En somme, la 6G est appelée à devenir une plateforme universelle de connectivité et d'intelligence, fusionnant le monde physique, numérique et biologique. Elle ambitionne de transformer en profondeur les interactions humaines, industrielles et environnementales en connectant tout, partout, en temps réel et de manière durable.

## 1.5 Défis technologiques pour la 6G

Le développement de la 6G s'accompagne de nombreux défis technologiques à surmonter pour concrétiser les ambitions en matière de performances, de couverture, de latence et d'intelligence réseau. Ces défis concernent aussi bien la physique des communications que l'architecture logicielle et matérielle [10].

### 1.5.1 Propagation aux fréquences TéraHertz (THz)

L'exploitation des bandes THz (0,1–10 THz) est considérée comme l'un des leviers essentiels pour atteindre les débits de l'ordre du téra-bit par seconde. Cependant, ces fréquences présentent de sérieux obstacles [10] :

- **Atténuation élevée** : Les signaux THz subissent une perte importante en espace libre (Free Space Path Loss), rendant leur portée très limitée.
- **Absorption atmosphérique** : La vapeur d'eau et l'oxygène absorbent fortement ces fréquences, réduisant leur efficacité en environnement extérieur.

- **Diffraction négligeable** : Le phénomène de diffraction étant quasi absent, le signal ne peut pas contourner les obstacles.
- Nécessité d'une visibilité directe (LOS) et de surfaces réfléchissantes optimisées, d'où l'intérêt des surfaces intelligentes reconfigurables (RIS).

### 1.5.2 Miniaturisation et intégration des composants

Les hautes fréquences exigent une refonte de l'électronique RF[10] :

- Conception d'antennes et de circuits ultra-compacts, compatibles avec les terminaux mobiles.
- Problèmes de dissipation thermique et de stabilité électronique à des fréquences aussi élevées.
- Développement de technologies de packaging avancées (3D integration, System-on-Chip, photoniques intégrées).
- Fabrication de matériaux nouveaux pour des composants actifs/passifs performants à THz.

### 1.5.3 Intelligence distribuée et EDGE computing

La 6G devra reposer sur une intelligence distribuée, embarquée dès la périphérie du réseau, ce qui pose plusieurs défis [10]:

- Orchestration décentralisée du calcul, de la mémoire et de l'intelligence, tout en garantissant la cohérence globale.
- Latence de traitement réduite au strict minimum, exigeant une coordination parfaite entre l'edge, le core et les terminaux.
- Développement d'algorithmes de machine learning respectant les contraintes de confidentialité, de bande passante et d'énergie.
- Optimisation conjointe des ressources radio, de la mobilité, du traitement de données et des besoins applicatifs, en temps réel.

### 1.5.4 Optimisation systémique et complexité du réseau

Avec l'introduction de multiples technologies hétérogènes (THz, RIS, satellites, drones, AI embarquée...), la 6G sera hautement complexe à concevoir, gérer et sécuriser :

- Besoin de nouvelles méthodes de modélisation multi-échelle et multi-physique pour simuler et prédire le comportement du réseau.
- Co-design matériel/logiciel pour réduire la consommation énergétique et la latence.
- Enjeux liés à la cybersécurité, notamment dans un contexte d'intelligence artificielle distribuée.
- Garantie d'une interopérabilité avec les réseaux existants (4G, 5G, Wi-Fi, satellites).

## 1.6 Fondements des Surfaces Reconfigurables Intelligentes

### 1.6.1 Définition et principes de fonctionnement des RIS

Les Surfaces Reconfigurables Intelligentes (RIS), également connues sous le nom de métasurfaces intelligentes, représentent une avancée significative dans le domaine des télécommunications. Une RIS peut être définie comme une surface plane composée d'un grand nombre d'éléments réfléchissants ou diffractants de taille sub-longueur d'onde, capables de manipuler les ondes électromagnétiques de manière programmable. Contrairement aux surfaces passives traditionnelles qui se contentent de réfléchir les ondes selon les lois classiques de la réflexion, les RIS peuvent modifier

dynamiquement les caractéristiques des ondes incidentes, notamment leur amplitude, leur phase, leur polarisation et leur direction de propagation [11].

Le principe fondamental de fonctionnement des RIS repose sur le contrôle précis des propriétés électromagnétiques de chaque élément constitutif de la surface. Lorsqu'une onde électromagnétique entre en contact avec une RIS, chaque élément de la surface agit comme un diffuseur secondaire qui modifie l'onde de manière spécifique. En contrôlant individuellement les paramètres de chaque élément, la RIS peut façonner le front d'onde réfléchi selon des motifs prédéfinis, créant ainsi des chemins de propagation artificiels et optimisés entre les émetteurs et les récepteurs.

Ce contrôle précis des ondes permet aux RIS de remplir plusieurs fonctions cruciales dans un réseau de communication [12] :

- **Redirection des signaux** : Les RIS peuvent réfléchir les signaux vers des zones spécifiques, contournant ainsi les obstacles et étendant la couverture à des zones autrement inaccessibles.
- **Focalisation d'énergie** : En synchronisant la phase des ondes réfléchies, les RIS peuvent concentrer l'énergie du signal vers des récepteurs ciblés, améliorant ainsi le rapport signal sur bruit.
- **Suppression d'interférences** : Les RIS peuvent être configurées pour créer des motifs d'interférences destructives dans certaines directions, réduisant ainsi les interférences entre utilisateurs.
- **Multiplexage spatial** : En créant plusieurs chemins de propagation distincts, les RIS facilitent la transmission simultanée de données vers plusieurs utilisateurs sur la même ressource spectrale.

L'originalité des RIS réside dans leur capacité à transformer un environnement de propagation traditionnellement hostile et aléatoire en un canal de communication contrôlable et optimisable, ouvrant ainsi la voie à une nouvelle ère de réseaux sans fil intelligents.

### 1.6.2 Architecture physique et composants des RIS

L'architecture physique d'une Surface Reconfigurable Intelligente comprend généralement plusieurs couches fonctionnelles, chacune jouant un rôle spécifique dans la manipulation des ondes électromagnétiques (Figure 1.4) [13][14] :

1. **Couche de éléments unitaires** : Il s'agit de la couche supérieure composée d'un réseau d'éléments résonants (éléments unitaires) disposés selon une géométrie périodique ou quasi-périodique. Ces éléments, généralement de dimension inférieure à la demi-longueur d'onde, peuvent prendre diverses formes : patches métalliques, anneaux fendus, diodes PIN, structures en forme de croix, etc. Leur géométrie détermine leurs propriétés de résonance et leur capacité à manipuler les ondes incidentes.
2. **Couche de substrat diélectrique** : Cette couche intermédiaire fournit un support mécanique pour les éléments unitaires et joue un rôle crucial dans la détermination des caractéristiques de résonance de la surface. Les matériaux couramment utilisés comprennent le FR-4, le Rogers RT/Duroid, et divers polymères à faibles pertes diélectriques.
3. **Plan de masse** : Généralement constitué d'une couche métallique conductrice, le plan de masse empêche la transmission du signal à travers la RIS, garantissant ainsi que l'énergie est principalement réfléchie dans la direction souhaitée.
4. **Réseau de contrôle et d'alimentation** : Cette couche comprend les circuits électroniques nécessaires à la reconfiguration dynamique des propriétés électromagnétiques des éléments

unitaires. Elle peut inclure des lignes de contrôle, des diodes varicap, des MEMS (systèmes micro-électromécaniques), ou d'autres composants actifs.

5. **Unité de traitement et de contrôle** : Bien que physiquement séparée de la surface, cette unité est essentielle au fonctionnement de la RIS. Elle comprend généralement un microcontrôleur qui, sur la base d'algorithmes d'optimisation, détermine la configuration optimale des éléments unitaires pour atteindre les objectifs de communication souhaités.

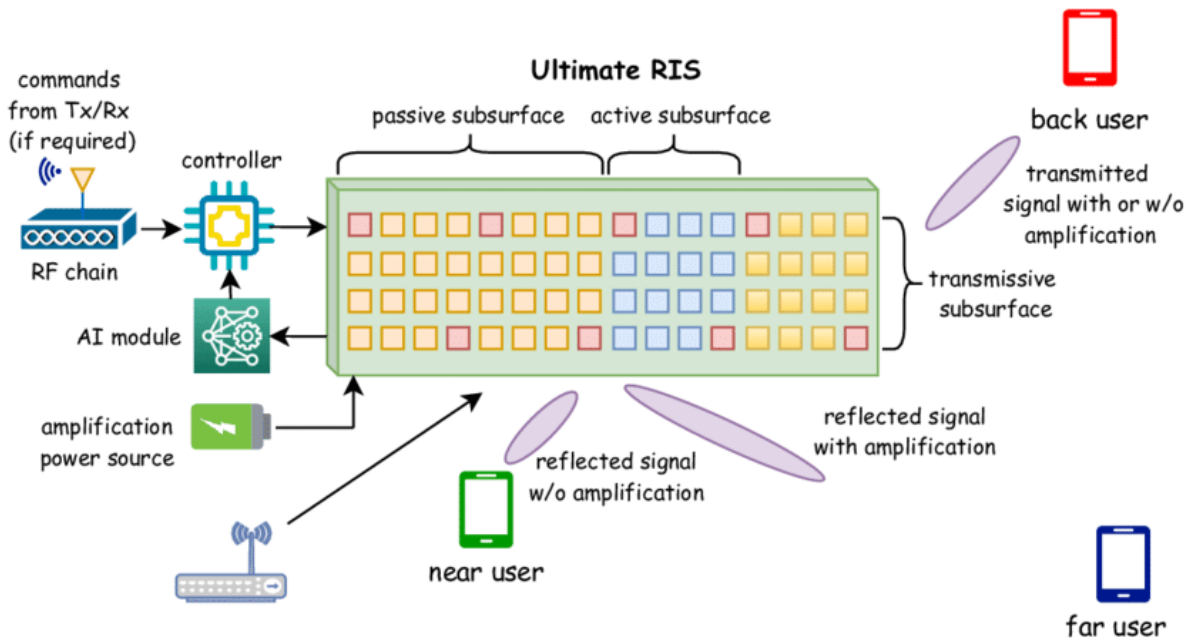


Figure 1.4 : Architecture physique d'une Surface Reconfigurable Intelligente.

Les dimensions typiques d'une RIS varient considérablement selon l'application visée. Pour les communications en intérieur, des surfaces de quelques centaines d'éléments peuvent suffire, tandis que les applications extérieures à longue portée peuvent nécessiter des milliers, voire des dizaines de milliers d'éléments. La taille physique dépend également de la fréquence d'opération : plus la fréquence est élevée (longueur d'onde plus courte), plus les éléments individuels sont petits, permettant ainsi de concevoir des RIS plus compacts pour les applications en ondes millimétriques et Téra-hertz.

L'espacement entre les éléments unitaires est un paramètre critique qui influence les performances de la RIS. Un espacement trop important peut générer des lobes secondaires indésirables dans le diagramme de rayonnement, tandis qu'un espacement trop faible peut entraîner un couplage mutuel excessif entre les éléments, compliquant ainsi leur contrôle individuel. Un compromis typique consiste à adopter un espacement d'environ  $\lambda/2$ , où  $\lambda$  représente la longueur d'onde de fonctionnement [15].

### 1.6.3 Mécanismes de reconfiguration des surfaces

La capacité d'adaptation dynamique est l'une des caractéristiques distinctives des RIS par rapport aux surfaces passives traditionnelles. Cette reconfigurabilité peut être mise en œuvre à travers divers mécanismes, chacun présentant des avantages et des contraintes spécifiques [16]:

1. **Reconfiguration électronique** : Cette approche utilise des composants électroniques actifs intégrés aux éléments unitaires pour modifier leurs propriétés de résonance :
  - o **Diodes PIN** : Ces semi-conducteurs peuvent basculer entre des états de haute et basse impédance en fonction de la polarisation appliquée, permettant une modulation binaire de

la phase ( $0^\circ$  ou  $180^\circ$ ). Bien que limitées en résolution de phase, les diodes PIN offrent une commutation rapide (nanosecondes) et une bonne fiabilité.

- **Diodes varicap (varactors)** : Ces dispositifs à capacité variable permettent un ajustement continu de la phase de l'onde réfléchie en fonction de la tension appliquée. Elles offrent une meilleure résolution que les diodes PIN mais présentent généralement des pertes d'insertion plus élevées.
  - **Transistors** : Ils permettent un contrôle plus précis des caractéristiques de réflexion tout en amplifiant potentiellement le signal, compensant ainsi les pertes inhérentes à la RIS.
2. **Reconfiguration mécanique** : Cette catégorie englobe les systèmes où les propriétés de la surface sont modifiées par des déplacements physiques [17] :
- **MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)** : Ces microsystèmes combinent des éléments mécaniques et électroniques à l'échelle micrométrique. Ils peuvent modifier la géométrie des éléments unitaires par des déplacements microscopiques, offrant ainsi un excellent compromis entre performances RF et consommation énergétique, bien que leur vitesse de commutation soit généralement plus lente que celle des solutions purement électroniques.
  - **Actuateurs piézoélectriques** : Ces composants transforment l'énergie électrique en mouvement mécanique, permettant des ajustements précis de la géométrie de la surface.
3. **Reconfiguration par matériaux adaptatifs** :
- **Cristaux liquides** : Ces matériaux peuvent modifier leurs propriétés diélectriques en fonction du champ électrique appliqué, permettant ainsi un ajustement continu de la phase. Ils offrent une faible consommation d'énergie mais souffrent d'un temps de réponse relativement lent (millisecondes).
  - **Matériaux à changement de phase (PCM)** : Ces matériaux peuvent basculer entre différents états cristallins avec des propriétés électromagnétiques distinctes. Ils présentent l'avantage de maintenir leur état sans alimentation continue (mémoire non volatile) mais nécessitent généralement une énergie thermique pour la transition de phase.
  - **Graphène et autres matériaux 2D** : Ces matériaux émergents offrent des propriétés électromagnétiques ajustables par application d'un champ électrique, avec des temps de réponse extrêmement rapides et une consommation énergétique potentiellement très faible.

Le choix du mécanisme de reconfiguration dépend de nombreux facteurs, notamment la fréquence d'opération, la résolution de phase requise, la vitesse de reconfiguration nécessaire, la consommation énergétique acceptable, et les contraintes de coût et de fabrication. Pour les applications 6G envisagées, qui pourront opérer à des fréquences allant jusqu'au térahertz, les solutions basées sur des matériaux avancés comme le graphène ou les cristaux liquides à haute performance présentent un potentiel particulièrement prometteur.

Le contrôle de ces mécanismes de reconfiguration représente un défi majeur, nécessitant des circuits de pilotage sophistiqués capables de gérer individuellement des milliers d'éléments avec une précision élevée, tout en minimisant la complexité du câblage et la consommation énergétique globale.

### 1.6.4 Comparaison avec d'autres technologies (MIMO massif, relais, etc.)

Les Surfaces Reconfigurables Intelligentes s'inscrivent dans l'écosystème des technologies d'amélioration de la propagation des ondes électromagnétiques, mais présentent des caractéristiques distinctives par rapport aux solutions existantes [18] :

### 1. RIS vs MIMO massif :

Le MIMO massif (Massive Multiple-Input Multiple-Output) repose sur l'utilisation d'un grand nombre d'antennes actives à la station de base pour former des faisceaux directifs et servir simultanément plusieurs utilisateurs. En comparaison :

- **Complexité et coût** : Les RIS sont généralement moins complexes et moins coûteux que les systèmes MIMO massif, car elles ne nécessitent pas de chaînes de radiofréquence dédiées pour chaque élément.
- **Consommation énergétique** : Les RIS présentent une consommation énergétique significativement inférieure, car elles fonctionnent principalement en mode passif ou semi-passif, contrairement aux antennes MIMO qui nécessitent des amplificateurs de puissance énergivores.
- **Traitement du signal** : Les RIS effectuent principalement un traitement analogique du signal (modification de la phase/amplitude), tandis que le MIMO massif repose sur un traitement numérique complexe.
- **Flexibilité de déploiement** : Les RIS peuvent être déployées sur des surfaces existantes (façades de bâtiments, plafonds, etc.) sans nécessiter d'infrastructure lourde, contrairement aux stations de base MIMO.
- **Complémentarité** : Plus qu'une alternative, les RIS peuvent être considérées comme complémentaires au MIMO massif, améliorant ses performances en créant des conditions de propagation plus favorables.

### 2. RIS vs Relais amplificateurs :

Les relais traditionnels (amplify-and-forward ou decode-and-forward) reçoivent le signal, l'amplifient ou le décodent, puis le retransmettent. En comparaison [19]:

- **Traitement du signal** : Les relais effectuent un traitement actif du signal impliquant une conversion du domaine RF au domaine bande de base et vice-versa, tandis que les RIS opèrent directement dans le domaine RF sans démodulation.
- **Latence** : Les RIS introduisent une latence négligeable car elles réfléchissent instantanément le signal, contrairement aux relais qui ajoutent un délai dû au traitement.
- **Bruit** : Les relais amplificateurs amplifient également le bruit, tandis que les RIS passives ne génèrent pas de bruit additionnel significatif.
- **Complexité et coût** : Les RIS sont généralement plus simples et moins coûteux que les relais complets, qui nécessitent des émetteurs-récepteurs complets.
- **Consommation d'énergie** : Les RIS consomment significativement moins d'énergie que les relais actifs.

### 3. RIS vs Réflecteurs passifs et répéteurs :

Les réflecteurs passifs traditionnels (comme les panneaux métalliques) et les répéteurs simples améliorent également la couverture, mais :

- **Adaptabilité** : Contrairement aux réflecteurs passifs fixes, les RIS peuvent s'adapter dynamiquement aux conditions changeantes du canal et aux besoins des utilisateurs.
- **Directivité** : Les RIS peuvent focaliser l'énergie dans des directions spécifiques, tandis que les réflecteurs passifs diffusent généralement le signal dans une zone plus large, causant potentiellement des interférences.

- **Efficacité énergétique** : Les RIS peuvent concentrer l'énergie vers les utilisateurs cibles, offrant un gain significatif par rapport aux réflecteurs passifs qui redistribuent l'énergie selon des lois physiques fixes.

#### 4. RIS vs Surfaces à codage de phase (Coding Metasurfaces) :

Les surfaces à codage de phase représentent une évolution antérieure aux RIS, avec [20]:

- **Granularité du contrôle** : Les RIS permettent généralement un contrôle plus fin des caractéristiques de l'onde réfléchie, avec une résolution de phase plus élevée.
- **Dynamisme** : Les RIS offrent une reconfiguration en temps réel, tandis que certaines surfaces à codage de phase ont des configurations plus statiques ou préétablies.
- **Intégration système** : Les RIS modernes sont conçues pour s'intégrer pleinement dans l'écosystème réseau avec des capacités de contrôle à distance et d'optimisation algorithmique.

Le tableau ci-dessous synthétise les principales différences entre ces technologies :

**Tableau 1.3 : Comparaison des technologies d'extension de couverture et d'amélioration de la connectivité dans les réseaux sans fil**

Caractéristique	RIS	MIMO massif	Relais amplificateurs	Réflecteurs passifs
Type de traitement	Passif/Semi-passif (RF)	Actif (Numérique)	Actif (RF+Bande de base)	Passif (Fixe)
Consommation énergétique	Très faible	Élevée	Moyenne à élevée	Nulle
Complexité matérielle	Moyenne	Très élevée	Élevée	Très faible
Adaptabilité	Dynamique	Dynamique	Dynamique	Statique
Génération de bruit	Négligeable	Significative	Significative	Nulle
Latence ajoutée	Négligeable	Faible	Moyenne	Négligeable
Coût	Modéré	Très élevé	Élevé	Très faible
Flexibilité de déploiement	Très élevée	Limitée	Modérée	Élevée

Les RIS se distinguent par leur capacité unique à transformer l'environnement de propagation lui-même, plutôt que de simplement adapter les signaux émis ou reçus comme le font les technologies traditionnelles. Cette approche fondamentalement nouvelle ouvre la voie à des concepts révolutionnaires dans la conception des réseaux sans fil, particulièrement adaptés aux défis des futures communications 6G opérant à des fréquences toujours plus élevées.

### 1.7 Applications potentielles des RIS dans les réseaux 6G

Les surfaces intelligentes reconfigurables (RIS) représentent une solution innovante pour l'optimisation des réseaux 6G, en permettant un contrôle précis de la propagation des ondes électromagnétiques. Cette capacité ouvre la voie à des améliorations significatives en termes de

couverture, d'efficacité spectrale et de réduction de la consommation énergétique, répondant ainsi aux défis de la 6G (Figure 1.5) [21].

➤ **Amélioration de la couverture réseau**

Les surfaces intelligentes reconfigurables (RIS) ont la capacité de manipuler dynamiquement les ondes électromagnétiques afin d'améliorer la propagation du signal dans des environnements complexes. Contrairement aux relais actifs ou aux antennes classiques, les RIS permettent de créer des chemins de propagation alternatifs sans introduire de bruit supplémentaire ni de traitement actif. Cela est particulièrement utile pour surmonter les **zones d'ombre** en milieu urbain ou à l'intérieur des bâtiments, où les signaux 6G à hautes fréquences (sub-THz) souffrent d'une atténuation sévère [20], [21].

➤ **Augmentation de l'efficacité spectrale**

Grâce à leur capacité à façonner dynamiquement le canal de propagation, les RIS peuvent contribuer à optimiser la formation de faisceaux (beamforming passif) et à réduire les interférences inter-utilisateurs. Dans un réseau 6G massivement connecté, cela se traduit par une meilleure gestion des ressources spectrales, une réduction du bruit multi-utilisateur et une augmentation du nombre d'utilisateurs simultanément desservis sans besoin d'augmentation de bande passante [22], [23].

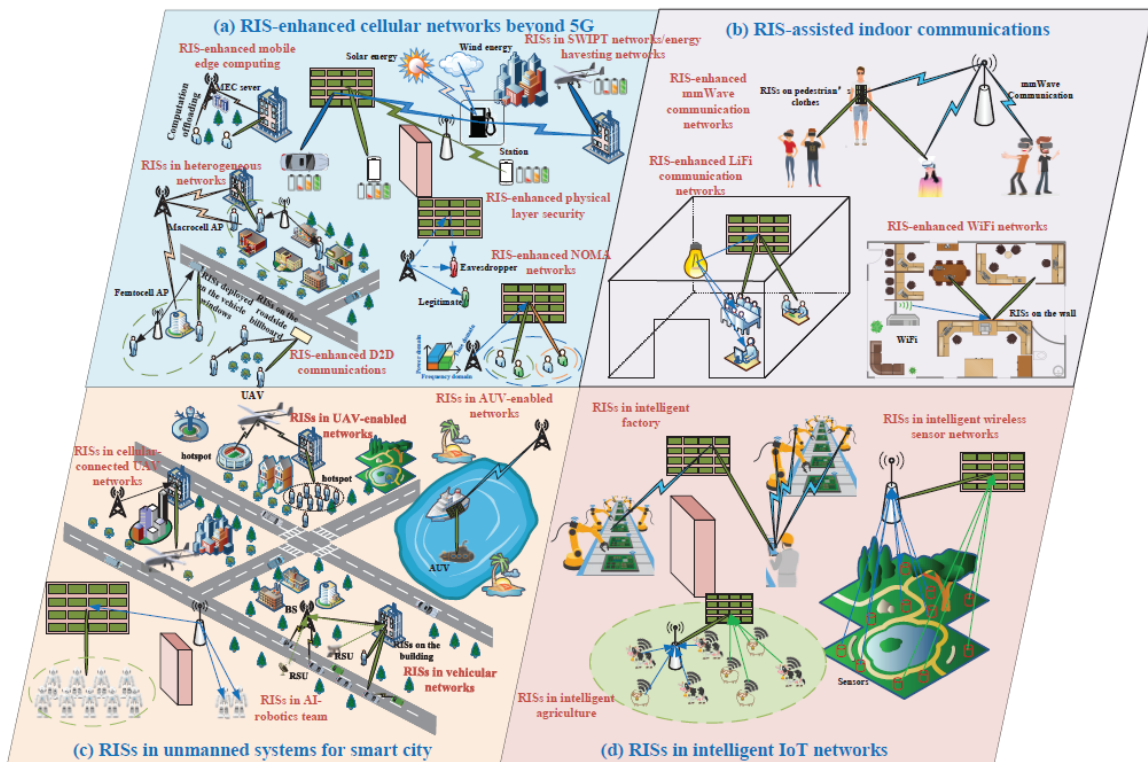


Figure 1.5 : Applications typiques des surfaces intelligentes reconfigurables (IRS) dans les réseaux sans fil

### ➤ Réduction de la consommation énergétique

Contrairement aux relais actifs et aux stations de base, les RIS sont quasi-passives, ce qui signifie qu'elles n'ont besoin que d'une faible alimentation pour piloter leurs éléments réactifs (diodes PIN, MEMS, etc.). Cela permet une amélioration de l'efficacité énergétique globale du réseau, un aspect fondamental des objectifs de la 6G visant à réduire l'empreinte carbone des communications mobiles. Certaines études montrent que l'intégration des RIS peut entraîner une réduction de la consommation énergétique de plus de 30 % dans certains scénarios [21], [24].

### ➤ Scénarios d'utilisation prometteurs

Les RIS sont particulièrement adaptés aux environnements difficiles où les techniques traditionnelles échouent ou deviennent coûteuses. Cela inclut :

- ✓ Les zones urbaines denses, où les bâtiments créent de multiples obstacles.
- ✓ Les espaces intérieurs, où les signaux millimétriques peinent à se propager.
- ✓ Les véhicules autonomes ou les drones, où les RIS embarquées ou installées dans l'environnement peuvent améliorer la robustesse des communications.
- ✓ Les réseaux tactiques ou d'urgence, où une infrastructure rapide, modulable et à faible consommation est indispensable [26], [27].

## 1.8 Conclusion

Ce premier chapitre a retracé l'évolution des réseaux mobiles, de la 1G à la 5G, en mettant en lumière les avancées majeures ainsi que les limites persistantes des technologies actuelles. Face aux exigences croissantes en matière de connectivité, de latence, de fiabilité et d'efficacité énergétique, la 6G se présente comme une réponse ambitieuse, intégrant des technologies émergentes telles que les Surfaces Reconfigurables Intelligentes (RIS). Ces dernières offrent un potentiel considérable pour transformer l'architecture des réseaux, en permettant un contrôle dynamique de l'environnement radio.

Cependant, pour exploiter pleinement les capacités des RIS et répondre aux défis de la 6G, une compréhension approfondie des mécanismes de propagation des ondes radio est indispensable. C'est dans cette optique que le chapitre suivant s'intéresse aux canaux de propagation radio.

# **Chapitre 2 : Modélisation des Surfaces Intelligentes Reconfigurables pour la Propagation Radio**

# Chapitre 2 : Modélisation des Surfaces Intelligentes Reconfigurables pour la Propagation Radio

---

2.1	Introduction .....	19
2.2	Canaux de propagation radio : fondements et modèles .....	19
2.3	Modèles statistiques de canal.....	25
2.4	Modélisation selon la configuration système.....	27
2.5	Caractérisation de canal.....	29
2.6	Modélisation des Canaux à Haute Fréquence.....	29
2.7	Modélisation des Systèmes RIS.....	30
2.8	Stratégies de Sélection de RIS.....	35
2.9	Conclusion.....	36

---

## 2.1 Introduction

La propagation des ondes radio constitue un pilier fondamental dans la conception et l'optimisation des systèmes de communication sans fil. Comprendre les mécanismes physiques ainsi que les modèles mathématiques qui régissent cette propagation est essentiel pour anticiper les performances des réseaux, en particulier dans des environnements complexes et dynamiques. Ce chapitre explore en profondeur les différents phénomènes de propagation, depuis les principes de base en espace libre jusqu'aux effets plus complexes tels que la réflexion, la diffraction, la diffusion, la pénétration et l'absorption. Il aborde également la distinction cruciale entre les scénarios en ligne de visée (LOS) et hors ligne de visée (NLOS), ainsi que les techniques permettant de contourner les obstacles.

En complément, les modèles statistiques de canal, qui caractérisent les variations du signal à différentes échelles, sont étudiés, offrant ainsi une vision plus réaliste et prédictive du comportement des canaux.

Enfin, une attention particulière est portée à la modélisation des Surfaces Intelligentes Reconfigurables (RIS), une technologie émergente et prometteuse pour les réseaux de communication de nouvelle génération. Les différentes configurations analysées, allant des systèmes SISO aux architectures multi-RIS, ouvrent la voie à une optimisation fine de la propagation et à une gestion dynamique des ressources radio.

## 2.2 Canaux de propagation radio : fondements et modèles

### 2.2.1 Phénomènes de propagation

La propagation des ondes électromagnétiques dans un environnement sans fil est influencée par divers phénomènes physiques liés à l'interaction des ondes avec leur environnement. Une compréhension rigoureuse de ces phénomènes est essentielle pour modéliser précisément les performances des systèmes de communication, en particulier ceux assistés par des surfaces intelligentes reconfigurables (RIS) [27].

### 2.2.2 Propagation en espace libre

Dans un environnement sans obstacle, la propagation suit le modèle en espace libre, dans lequel la puissance du signal décroît proportionnellement au carré de la distance entre l'émetteur et le récepteur. Ce modèle est formalisé par la formule de Friis [28] :

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad (2.1)$$

Où :

- $P_r$  : puissance reçue (W)
- $P_t$  : puissance transmise (W)
- $G_t$  : gain de l'antenne émettrice
- $G_r$  : gain de l'antenne réceptrice
- $\lambda$  : longueur d'onde (m)
- $d$  : distance entre émetteur et récepteur (m)

Cette formule modélise l'atténuation en  $d^{-2}$  caractéristique de la propagation en espace libre. Dans les environnements réels, l'exposant d'atténuation varie généralement entre 2 et 5, selon les conditions de propagation.

Pour exprimer cette relation en décibels (dB), on utilise souvent [28] :

$$L_{FS} = 32.45 + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(d) \quad (2.2)$$

Où :

- $L_{FS}$  : perte en espace libre (dB)
- $f$  : fréquence (MHz)
- $d$  : distance (km)

Cette formulation met en évidence la dépendance fréquentielle des pertes de propagation, avec une augmentation de 6 dB lorsque la fréquence double. Ce modèle simple est souvent utilisé pour les bandes inférieures à 6 GHz, mais devient imprécis en présence d'obstacles ou à très haute fréquence (mmWave, THz), où d'autres phénomènes dominent [29].

### 2.2.3 Réflexion, diffraction et diffusion

#### 2.2.3.1 Réflexion

La réflexion se produit lorsqu'une onde électromagnétique rencontre une interface entre deux milieux aux propriétés électriques différentes Figure 2.1. Pour une surface parfaitement conductrice, le coefficient de réflexion est proche de -1, signifiant que presque toute l'énergie est réfléchie avec un changement de phase de  $180^\circ$  [30].

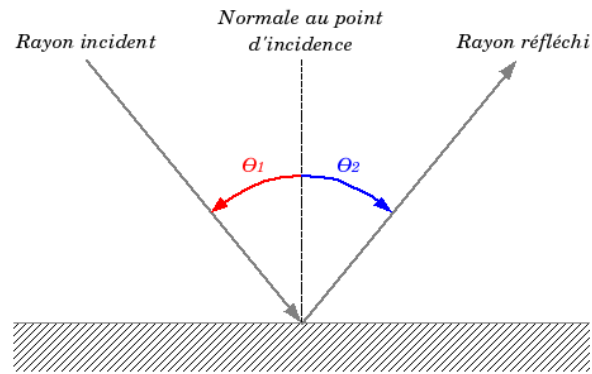


Figure 2.1 : Mécanisme de réflexion.

Pour des surfaces diélectriques (non conductrices), le coefficient de réflexion dépend de l'angle d'incidence, de la polarisation de l'onde et des propriétés électriques des matériaux. Ces coefficients sont décrits par les équations de Fresnel [31] :

- Pour la polarisation parallèle (onde TM) :

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{\varepsilon_2 \cos \theta_i - \varepsilon_1 \cos \theta_t}{\varepsilon_2 \cos \theta_i + \varepsilon_1 \cos \theta_t} \quad (2.3)$$

- Pour la polarisation perpendiculaire (onde TE) :

$$\Gamma_{\perp} = \frac{\cos \theta_i - \cos \theta_t}{\cos \theta_i + \cos \theta_t} \quad (2.4)$$

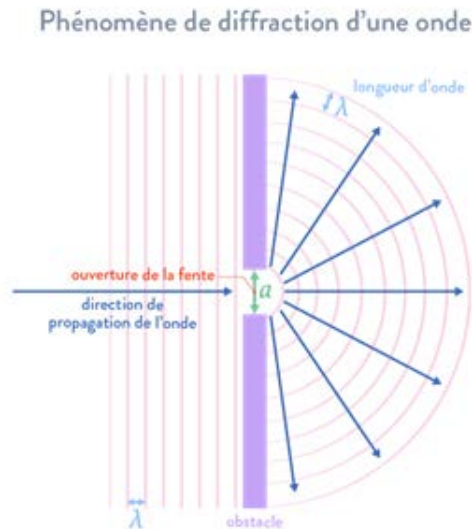
Où :

- $\varepsilon_1$  ,  $\varepsilon_2$  sont les permittivités des milieux
- $\theta_i$  est l'angle d'incidence
- $\theta_t$  est l'angle de transmission

Les surfaces intelligentes reconfigurables (RIS) exploitent ce phénomène en manipulant les coefficients de réflexion de manière dynamique grâce à des métasurfaces composées d'éléments accordables électroniquement. Chaque élément de la RIS peut modifier l'amplitude et la phase de l'onde réfléchie, permettant ainsi de créer un environnement électromagnétique contrôlé.

### 2.2.3.2 Diffraction

La diffraction permet aux ondes radio de contourner les obstacles et d'atteindre des zones qui seraient autrement dans l'ombre radio Figure 2.2. Ce phénomène est expliqué par le principe de Huygens-Fresnel, qui considère chaque point d'un front d'onde comme une source secondaire émettant des ondelettes sphériques.



**Figure 2.2 : Mécanisme de diffraction.**

Pour modéliser la diffraction par une arête (comme le coin d'un bâtiment), on utilise souvent le modèle de l'arête en lame de couteau (knife-edge diffraction). L'atténuation supplémentaire due à la diffraction peut être approximée par [32] :

$$L_d = 20 \log_{10}(0.5 + 0.62v) \text{ dB} \quad \text{pour } v > 1 \quad (2.5)$$

Où  $v$  est le paramètre de Fresnel défini par :

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (2.6)$$

Avec :

- $h$  : hauteur de l'obstacle au-dessus de la ligne de visée directe
- $d_1, d_2$  : distances de l'émetteur et du récepteur à l'obstacle
- $\lambda$  : longueur d'onde

La diffraction est fortement dépendante de la fréquence, devenant moins efficace aux fréquences élevées (mmWave, THz), ce qui pose des défis importants pour la couverture dans ces bandes.

### 2.2.3.3 Diffusion

La diffusion (scattering) se produit lorsque l'onde rencontre des objets dont les dimensions sont comparables ou inférieures à la longueur d'onde, ou des surfaces présentant des irrégularités Figure 2.3. Ce phénomène disperse l'énergie dans de multiples directions [32].

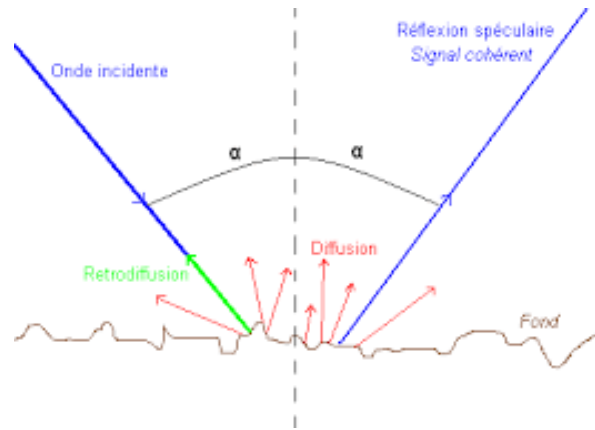


Figure 2.3 : Mécanisme de diffusion.

On distingue plusieurs types de diffusion :

1. **Diffusion de Rayleigh** : pour des particules beaucoup plus petites que la longueur d'onde, l'intensité diffusée est proportionnelle à  $f^4$ , ce qui explique pourquoi le ciel est bleu.
2. **Diffusion de Mie** : lorsque la taille des particules est comparable à la longueur d'onde, créant des motifs de diffusion complexes.
3. **Diffusion surfacique** : causée par les rugosités des surfaces, modélisée souvent par le critère de Rayleigh qui stipule qu'une surface est considérée comme rugueuse si :

$$\sigma_h > \frac{\lambda}{8 \cos \theta_i} \quad (2.7)$$

Où  $\sigma_h$  est l'écart-type de la hauteur de la surface et  $\theta_i$  l'angle d'incidence.

En milieu urbain dense, la diffusion par le mobilier urbain, la végétation et les irrégularités des bâtiments devient un mécanisme de propagation dominant aux fréquences élevées (>28 GHz).

### 2.2.4 Pénétration et absorption

Les ondes radio traversant des matériaux subissent une atténuation due à l'absorption d'énergie. Cette atténuation dépend fortement de la fréquence et des propriétés diélectriques du matériau, suivant la loi de Beer-Lambert [33]:

$$P(d) = P(0)e^{-\alpha d} \quad (2.8)$$

Où :

- $P(d)$  : puissance à la profondeur  $d$
- $P(0)$  : puissance incidente
- $\alpha$  : coefficient d'atténuation du matériau

Le coefficient d'atténuation  $\alpha$  augmente généralement avec la fréquence, expliquant pourquoi les signaux à haute fréquence pénètrent moins bien dans les bâtiments. À titre d'exemple, le Tableau 2.1 suivant montre l'atténuation typique de différents matériaux à 2.4 GHz et 60 GHz :

Tableau 2.1 : Atténuation typique de différents matériaux à 2.4 GHz et 60 GHz [33].

Matériau	Atténuation à 2.4 GHz	Atténuation à 60 GHz
Verre	3-5 dB	10-15 dB
Béton	10-15 dB	30-40 dB
Bois	2-4 dB	8-12 dB
Métal	>40 dB	>60 dB

Cette forte atténuation aux fréquences élevées nécessite des stratégies alternatives comme les RIS pour garantir une couverture adéquate.

### 2.2.5 Ligne de visée (LOS/NLOS)

La ligne de visée (Line-of-Sight, LOS) désigne un lien direct entre l'émetteur et le récepteur Figure 2.4. En cas de blocage (Non-Line-of-Sight, NLOS), la qualité du canal se dégrade fortement. La distinction entre conditions de propagation en ligne de visée (LOS) et hors ligne de visée (NLOS) est fondamentale pour caractériser les performances d'un système sans fil [33].

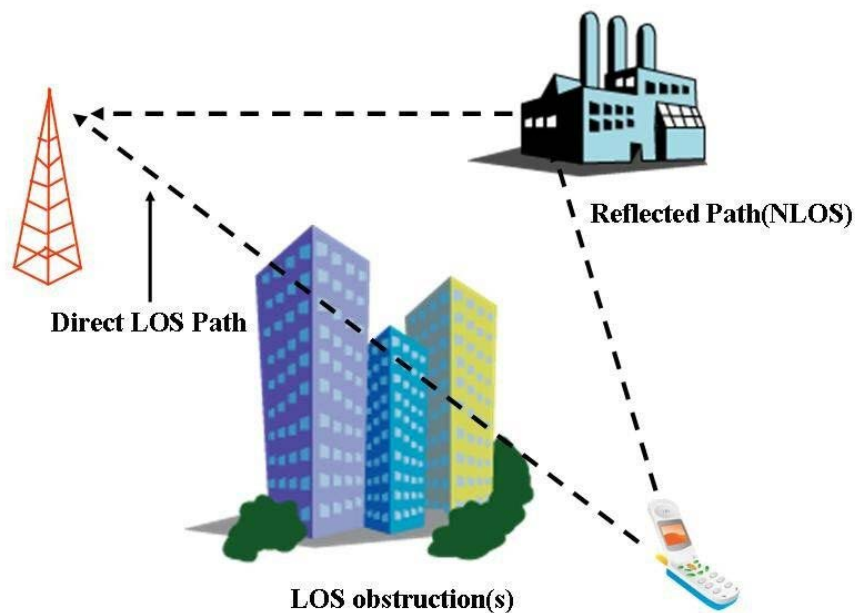


Figure 2.4 : La ligne de visée (Line-of-Sight, LOS).

#### 2.2.5.1 Caractérisation LOS/NLOS

En environnement extérieur, la probabilité  $p_{LOS}$  d'avoir une ligne de visée directe peut être modélisée selon le modèle 3GPP TR 38.901 [33] par :

$$p_{LOS} = \min \left( 1, C \left( \frac{d}{d_0} \right) e^{-\frac{d}{D}} \right) \quad (2.9)$$

Où :

- $d$  : distance entre émetteur et récepteur
- $C, d_0, D$  : paramètres dépendant de l'environnement (urbain dense, urbain, suburbain)

La transition entre conditions LOS et NLOS se produit fréquemment en milieu mobile, provoquant des variations brusques de la puissance reçue pouvant atteindre 20-30 dB.

### 2.2.5.2 Techniques de contournement du blocage

L'absence de LOS est particulièrement critique pour les bandes mmWave et THz, où la diffraction est faible et la pénétration dans les matériaux est limitée. Pour atténuer l'impact du blocage de la ligne de visée, plusieurs approches sont déployées [33] :

- **Diversité spatiale** : Utilisation de multiples stations de base ou points d'accès
- **Handover rapide** : Commutation entre points d'accès en cas de blocage
- **RIS** : Création de chemins de propagation alternatifs

Les surfaces intelligentes reconfigurables offrent une solution particulièrement prometteuse car elles permettent de "contourner" dynamiquement les obstacles en redirigeant le signal vers le récepteur via des chemins de propagation alternatifs optimisés.

## 2.3 Modèles statistiques de canal

Les canaux de communication sans fil sont affectés par des variations aléatoires dues à la nature changeante de l'environnement. Ces variations peuvent être classées en deux catégories principales [34].

### 2.3.1 Évanouissement à grande échelle (Large-scale fading)

Aussi appelé **shadowing**, ce phénomène est causé par des obstructions de grande taille telles que les bâtiments ou les collines. Il varie lentement dans le temps ou l'espace.

#### 2.3.1.1 Affaiblissement de parcours (Path loss)

L'affaiblissement de parcours représente l'atténuation moyenne du signal en fonction de la distance et peut être modélisé par [34]:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10 n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (2.10)$$

Où :

- $PL(d)$ : perte en dB à la distance  $d$
- $PL(d_0)$  : perte à la distance de référence  $d_0$
- $n$  : exposant d'affaiblissement de parcours
- $X_\sigma$  : variable aléatoire gaussienne d'écart-type  $\sigma$  représentant le shadowing

L'exposant  $n$  varie significativement selon l'environnement :

- Espace libre :  $n = 2$

- Milieu urbain :  $n = 2.7$  à  $3.5$
- Intérieur avec obstacles :  $n = 3$  à  $5$
- Corridor :  $n = 1.6$  à  $1.8$  (effet guidage)

### 2.3.1.2 Shadowing (masquage)

Le shadowing représente les variations lentes de la puissance du signal dues aux obstacles de grande taille. Il est modélisé par une distribution log-normale [34] :

$$p(X_\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x_\sigma^2}{2\sigma^2}} \quad (2.11)$$

L'écart-type  $\sigma$  du shadowing varie typiquement entre 4 et 12 dB selon l'environnement. Ces variations présentent une corrélation spatiale caractérisée par la distance de décorrélation  $d_{corr}$  :

$$R_X(d) = \sigma^2 e^{-\frac{d}{d_{corr}}} \quad (2.12)$$

Où  $R_X(d)$  est la fonction d'autocorrélation du processus de shadowing.

### 2.3.2 Évanouissement à petite échelle (Small-scale fading)

Ce type de fading résulte des interférences constructives et destructives entre les multiples trajets du signal dus à la réflexion, la diffraction et la diffusion. Il est typiquement modélisé selon la **statistique d'enveloppe du signal**, dépendant de la condition de visibilité (LOS/NLOS).

#### 2.3.2.1 Distribution de Rayleigh

En l'absence de composante dominante (NLOS), l'amplitude du signal reçu suit une distribution de Rayleigh dont la fonction de densité de probabilité est [34] :

$$F(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad \text{pour } r \geq 0 \quad (2.13)$$

Où  $\sigma^2$  est la variance de chaque composante orthogonale du signal.

Ce modèle conduit à des évanouissements profonds où le signal peut chuter de 20-30 dB en dessous de sa valeur moyenne avec une probabilité non négligeable.

#### 2.3.2.2 Distribution de Rice

Lorsqu'une composante dominante existe (LOS), l'amplitude du signal suit une distribution de Rice [34] :

$$F(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2+A^2}{\sigma^2}} I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right) \quad \text{pour } r \geq 0 \quad (2.14)$$

Où :

- $A$  est l'amplitude de la composante dominante

- $I_0$  est la fonction de Bessel modifiée de première espèce et d'ordre zéro

Le facteur de Rice  $K$ , défini comme le rapport entre la puissance de la composante dominante et la puissance des composantes diffuses, caractérise la qualité du canal :

$$K = \frac{A^2}{2\sigma^2} \quad (2.15)$$

Ce facteur varie typiquement entre 0 dB (faible composante LOS) et 15 dB (forte composante LOS).

### 2.3.2.3 Distribution de Nakagami

La distribution de Nakagami est un modèle plus général qui englobe les distributions de Rayleigh et peut approximer celle de Rice [34] :

$$F(r) = \frac{2m^m}{\Gamma(m)\Omega^m} r^{2m-1} e^{-\frac{m}{\Omega}r^2} \quad \text{pour } r \geq 0 \quad (2.16)$$

Où :

- $\Omega = E[r^2]$  est la puissance moyenne
- $m \geq 0.5$  est le paramètre de forme qui détermine la sévérité du fading
- $\Gamma(m)$  est la fonction gamma.

Cette distribution offre une flexibilité supplémentaire pour modéliser des environnements complexes :

- $m = 0.5$  correspond au fading unilatéral gaussien (pire cas)
- $m = 1$  correspond au fading de Rayleigh
- $m > 1$  représente des conditions moins sévères, approximant la distribution de Rice

## 2.4 Modélisation selon la configuration système

### 2.4.1 Modèle SISO (Single-Input Single-Output)

Le canal est représenté par un scalaire  $h \sim CN(0,1)$ , dans le cas de Rayleigh. L'équation du signal reçu est [28][30] :

$$y = hx + n \quad (2.17)$$

où :

- $x$  est le symbole émis,
- $y$  est le signal reçu,
- $n \sim CN(0, N_0)$  est le bruit complexe additif gaussien (AWGN).

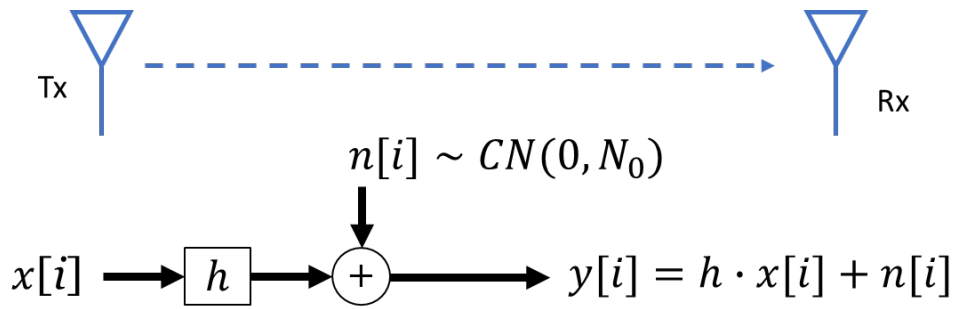


Figure 2.5 : Canal SISO

### 2.4.2 Modèle MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)

Le canal est modélisé par une matrice  $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ , où chaque coefficient  $h_{ij}$  suit un modèle statistique dépendant du fading (Rayleigh, Rician, etc.). Le signal reçu s'écrit :

$$y = \mathbf{H} \cdot x + n \quad (2.18)$$

Cette configuration permet une diversité spatiale et un gain en capacité pouvant être approximé par [30] :

$$C = \log_2 \det \left( I_{N_r} + \frac{\rho}{N_{tt}} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \quad (2.19)$$

où  $\rho$  est le rapport signal sur bruit (SNR) [36].

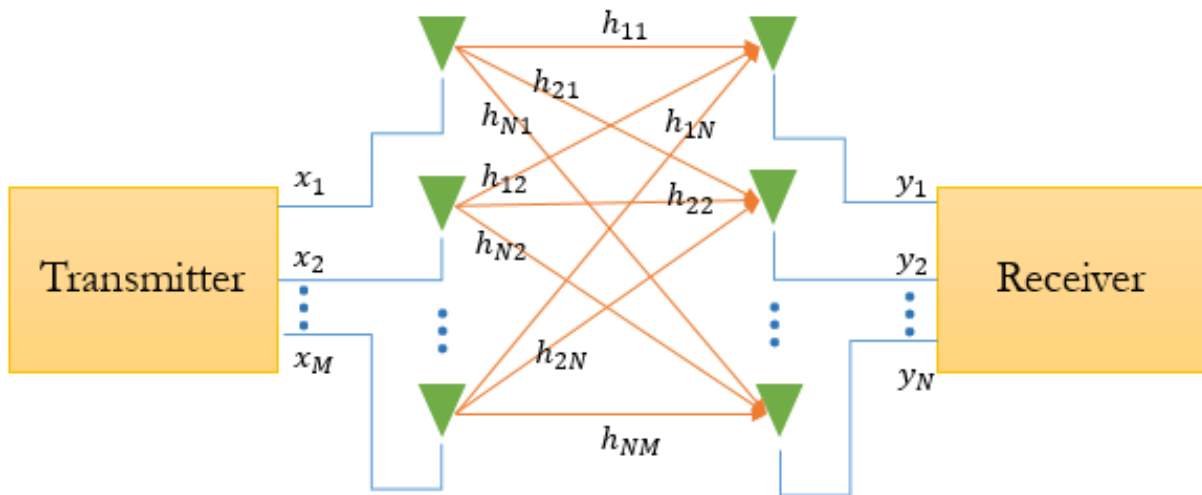


Figure 2.6 : Canal MIMO

## 2.5 Caractérisation de canal

Les canaux de propagation sont caractérisés par plusieurs paramètres clés [28]:

- **Étalement des retards (Delay spread) :**

$$\tau_{RMS} = \sqrt{\sum_k \frac{P(\tau_k)\tau_k^2}{P(\tau_k)} - \left(\sum_k \frac{P(\tau_k)\tau_k}{P(\tau_k)}\right)^2} \quad (2.20)$$

- **Étalement angulaire (Angular spread) :**

$$\sigma_\theta = \sqrt{\frac{\sum_k P(\theta_k)(\theta_k - \bar{\theta})^2}{\sum_k P(\theta_k)}} \quad (2.21)$$

- **Étalement Doppler (Doppler spread)**

$$B_d = 2f_m = \frac{2v}{\lambda} \quad (2.22)$$

Où  $v$  est la vitesse relative et  $\lambda$  la longueur d'onde.

Ces paramètres déterminent la cohérence du canal en temps, fréquence et espace [28]:

- Bande de cohérence :  $B_c \approx \frac{1}{5\tau_{RMS}}$
- Temps de cohérence :  $T_c \approx \frac{0.423}{B_d}$
- Distance de cohérence :  $D_c \approx \frac{\lambda}{2 \sin \sigma_\theta}$

## 2.6 Modélisation des Canaux à Haute Fréquence

Les bandes millimétriques (mmWave, 30–300 GHz) et TéraHertz (THz, > 0.1 THz) sont des composantes clés des réseaux sans fil de sixième génération (6G), en raison de la large bande passante disponible dans ces gammes de fréquences. Elles permettent des débits ultra-élevés, une latence réduite et une densification massive des connexions. Toutefois, leur utilisation implique plusieurs défis physiques majeurs [29] :

- Atténuation élevée du signal due à l'absorption atmosphérique (notamment par la vapeur d'eau et l'oxygène) ;
- Faible capacité de diffraction, ce qui réduit considérablement la couverture dans des environnements obstrués ;
- Sensibilité aux blocages par des objets courants (murs, corps humains, véhicules), rendant la propagation fortement directionnelle.

Dans ces bandes, le canal de propagation est souvent dominé par une composante de ligne de visée (LOS), avec un nombre limité de trajets multi-réfléchis significatifs. Cela rend le modèle de Rician particulièrement adapté à la modélisation du canal de fading :

$$h = \sqrt{\frac{K}{K+1}} \times h_{LOS} + \sqrt{\frac{1}{K+1}} \times h_{NLOS} \quad (2.23)$$

où :

- $K$  est le facteur de Rician, exprimé en dB comme le rapport de puissance entre la composante LOS et les composantes diffusées ;
- $h_{LOS}$  est une composante déterministe ;
- $h_{NLOS} \sim CN(0,1)$  est une composante aléatoire représentant la diffusion des trajets NLOS.

Le facteur  $K$  est une métrique importante :

- Lorsque  $K \rightarrow 0$ , le canal devient Rayleigh ;
- Lorsque  $K \rightarrow \infty$ , la composante LOS devient dominante.

Impact de la fréquence sur les propriétés du canal :

- La portée de transmission diminue selon le modèle de Friis :

$$PL(dB) = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi df}{c} \right) \quad (2.24)$$

- La sensibilité à l'alignement directionnel devient critique.

Ces caractéristiques motivent l'intégration de techniques avancées telles que :

- Le beamforming massif à l'aide d'antennes réseaux (Massive MIMO) ;
- Les surfaces intelligentes reconfigurables (RIS).
- 

## 2.7 Modélisation des Systèmes RIS

Dans cette section, nous étudions un système de communication sans fil comprenant une paire émetteur-récepteur et une seule surface intelligente reconfigurable (RIS), comme illustré dans la Figure 2.7[35].

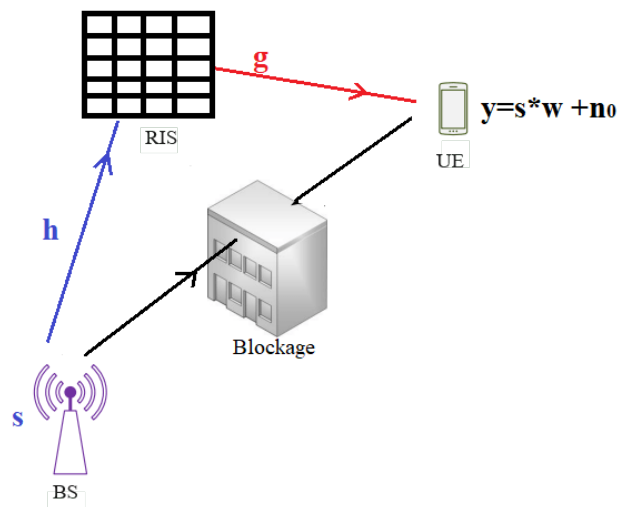


Figure 2.7 : Système SISO assisté par une surface intelligente reconfigurable (RIS), composé d'un chemin direct et d'une RIS avec  $N$  éléments réfléchissant.

### 2.7.1 Modèle général : Système RIS-SISO

Comme illustré dans la Figure 2.7, un scénario de communication générique assisté par RIS est considéré, dans lequel la transmission se fait via une RIS en l'absence d'un lien direct entre la source (S) et la destination (D). La RIS, contrôlée en temps réel, est supposée équipée de  $N$  éléments réfléchissants reconfigurables, ajustables selon les phases du canal. Les distances notées  $d_{SD}$ ,  $d_{SR}$  et  $d_{RD}$  représentent respectivement les distances source-destination, source-RIS et RIS-destination. Dans cette configuration,  $d_V$  et  $d_H$  désignent respectivement la distance verticale et horizontale entre S et RIS.

Sous l'hypothèse de fading Rician, les coefficients d'atténuation des canaux S-R et R-D pour le  $i$ -ème élément réfléchissant ( $i = 1, \dots, N$ ) sont donnés par [35]:

$$h_i^{SR} = \sqrt{\frac{K_1}{1+K_1}} \times \bar{h}_i^{SR} + \sqrt{\frac{1}{1+K_1}} \times \tilde{h}_i^{SR} \quad (2.25)$$

$$h_i^{RD} = \sqrt{\frac{K_2}{1+K_2}} \times \bar{h}_i^{RD} + \sqrt{\frac{1}{1+K_2}} \times \tilde{h}_i^{RD} \quad (2.26)$$

où  $K_1$  et  $K_2$  sont les facteurs de Rice,  $\bar{h}$  désigne les composantes LOS (ligne de vue), et  $\tilde{h}$  les composantes NLOS (hors ligne de vue), supposées suivre une distribution complexe normale centrée  $CN(0,1)$ .

Dans le cas de canaux à fading lent et plat, le signal reçu en bande de base à D est :

$$r = \sqrt{P_t} \left[ \sqrt{P_R^L} \left( \sum_{i=1}^N h_i^{SR} e^{j\varphi_i} h_i^{RD} \right) \right] x + w \quad (2.27)$$

où  $P_t$  est la puissance totale transmise,  $\varphi_i$  est le déphasage contrôlable introduit par le  $i$ -ème élément de la RIS (avec des coefficients de réflexion de gain unitaire),  $x$  est le symbole de données issu d'une modulation M-aire PSK/QAM de puissance unitaire, et  $w \sim CN(0, N_0)$  est un bruit additif gaussien blanc avec puissance  $N_0$ .  $P_R^L$  représente la perte de chemin sur le trajet via la RIS.

Dans le cas d'une réflexion spéculaire en champ proche,  $P_R^L$  est proportionnelle au carré de la distance totale  $(d_{SR} + d_{RD})^2$ . En revanche, pour une diffusion de type plaque en champ lointain,  $P_R^L$  est proportionnelle à  $d_{SR}^2 * d_{RD}^2$ . Toutes les analyses sont menées en considérant des RIS de type réflecteur avec des éléments espacés d'une demi-longueur d'onde [35].

En utilisant l'équation radar,  $P_R^L$  peut s'écrire :

$$P_R^L = \left( \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^4 \frac{G_e^i G_e^r}{d_{SR}^2 d_{RD}^2} \varepsilon_p \right)^{-1} \quad (2.28)$$

où  $\lambda$  est la longueur d'onde,  $G_e^i$  et  $G_e^r$  les gains de la RIS en réception et émission, et  $\varepsilon_p$  l'efficacité de la RIS (ici supposée passive, donc  $\varepsilon_p = 1$ ).

En exprimant les coefficients du canal comme :

$$h_i^{SR} = \alpha_i e^{-j\theta_i} \text{ et } h_i^{RD} = \beta_i e^{-j\varphi_i}, \quad (2.29)$$

on peut réécrire le signal reçu :

$$r = \sqrt{p_t} \left[ \sqrt{P_R^L} \sum_{i=1}^N \alpha_i \beta_i e^{j\Delta\Phi_i} \right] x + w \quad (2.30)$$

avec  $\Delta\Phi_i = \varphi_i - \theta_i - \varphi_R$ .

$\Delta\Phi_i$  : déphasage total introduit par l'élément  $i$ , décomposé en :

- $\varphi_i$  : phase du chemin incident,
- $\theta_i$  : phase du chemin réfléchi,
- $\varphi_R$  : phase imposée par la surface RIS

Le SNR instantané à D devient alors :

$$\gamma = \frac{\left| \sqrt{P_R^L} \sum_{i=1}^N \alpha_i \beta_i e^{j\Delta\Phi_i} \right|^2 P_t}{N_0} \quad (2.31)$$

Le SNR est maximisé lorsque les phases des signaux réfléchis sont alignées :  $\Delta\Phi_i = 0$

Dans ce cas, le SNR maximal est :

$$\gamma_{max} = \frac{\left( \sqrt{P_R^L} \sum_{i=1}^N \alpha_i \beta_i \right)^2 P_t}{N_0} = \frac{A^2 P_t}{N_0} \quad (2.32)$$

En supposant que les  $\alpha_i$  et  $\beta_i$  suivent une loi de Rician, le théorème central limite montre que pour  $N \gg 1$ , la variable A suit une loi normale avec :

$$E[A] = N \frac{\sqrt{P_R^L} \pi}{4(K+1)} \frac{L_1}{2} \left( -\frac{K^2}{K+1} \right)^2 \quad (2.33)$$

$$VAR[A] = N P_R^L - N \frac{P_R^L \pi^2}{16(K+1)^2} \left( L_{1/2} \left( -\frac{K^2}{K+1} \right) \right)^4 \quad (2.34)$$

L'analyse statistique du SNR permet de calculer le taux d'erreur symbolique (SEP) pour les modulations M-PSK. Pour la BPSK, le SEP peut être calculé analytiquement [36].

Enfin, on montre que le SEP décroît proportionnellement à  $N^2$  dans les régimes de faible rapport signal/bruit. Pour  $N$  suffisamment grand, l'absence de lien direct devient négligeable. Les résultats généralisent les analyses antérieures en prenant en compte les modèles d'atténuation de chemin et le canal Rician [36].

## 2.7.2 Communication avec Plusieurs RIS

### 2.7.2.1 Transmission parallèle via deux RIS (Indoor)

Dans un environnement intérieur, l'utilisation simultanée de deux surfaces intelligentes reconfigurables permet d'optimiser la couverture du signal. Le signal reçu au niveau du récepteur peut être modélisé par [37] :

$$r = \sqrt{P_t} \left[ PL_1 \sum_{i=1}^{N_1} \alpha_i^1 \beta_i^1 e^{j\Delta\Phi_i^{(1)}} + PL_2 \sum_{j=1}^{N_2} \alpha_j^2 \beta_j^2 e^{j\Delta\Phi_j^{(2)}} \right] x + w \quad (2.35)$$

Où:

- $P_t$  représente la puissance de transmission
- $PL_1$  et  $PL_2$  sont les pertes de propagation associées à chaque RIS
- $\alpha_i^n$  et  $\beta_i^n$  dénotent les coefficients de réflexion
- $\Delta\Phi_i^n$  correspond au déphasage configuré sur chaque élément
- $w$  est le bruit additif

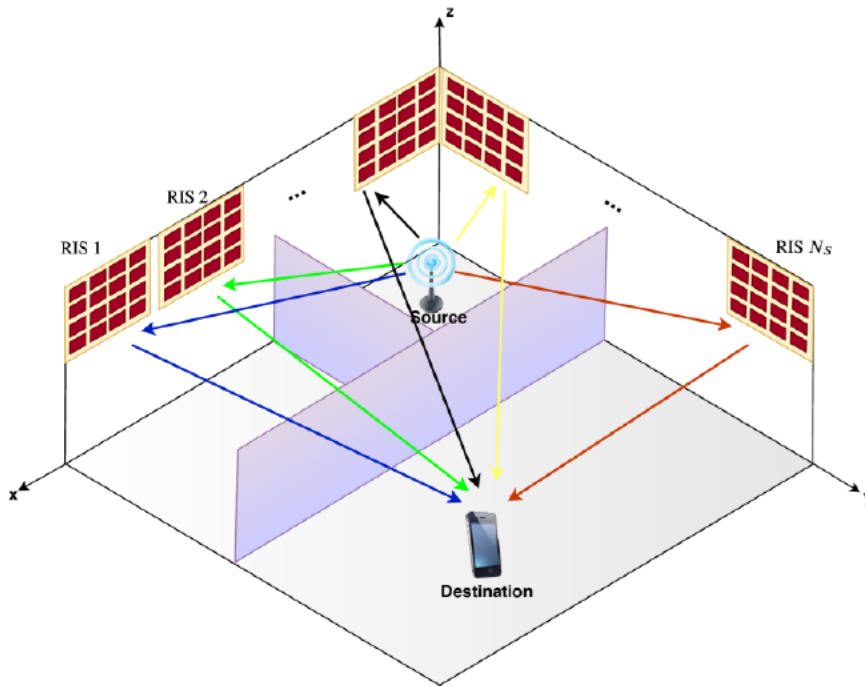


Figure 2.8 : Transmission via plusieurs surfaces intelligentes reconfigurables (RIS) scénario de propagation en intérieur.

### 2.7.2.2 Transmission en cascade via deux RIS (Environnement Extérieur)

Pour les communications en extérieur, une architecture en cascade (Émetteur → RIS1 → RIS2 → Récepteur) établit un canal MIMO virtuel de dimension  $N \times N$ . Dans cette configuration, le gain de performance est proportionnel au nombre d'éléments réfléchissants  $N$ , offrant ainsi une amélioration significative de l'efficacité spectrale et de la portée de transmission.

Cette approche hiérarchique permet de surmonter les limitations des trajets directs soumis à de fortes atténuations, particulièrement avantageuse dans les environnements à haute obstruction.

Dans une architecture en cascade avec deux RIS, le signal se propage selon le chemin :

$$\text{Émetteur} \rightarrow \text{RIS1} \rightarrow \text{RIS2} \rightarrow \text{Récepteur.}$$

Le signal reçu peut être formulé mathématiquement par [37] :

$$r = \sqrt{P_t} \cdot PL_{total} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} \alpha_i^{(1)} \beta_i^{(1)} \alpha_j^{(2)} \beta_j^{(2)} e^{j(\Delta\Phi_i^{(1)} + \Delta\Phi_j^{(2)})} \cdot x + w \quad (2.36)$$

Où:

- $P_t$  représente la puissance de transmission
- $PL_{total}$  désigne la perte de propagation combinée du chemin complet
- $\alpha_i^1$  et  $\alpha_j^2$  sont les coefficients d'atténuation d'entrée pour chaque élément des RIS
- $\beta_i^1$  et  $\beta_j^2$  représentent les coefficients d'atténuation de sortie
- $\Delta\Phi_i^1$  et  $\Delta\Phi_j^2$  sont les déphasages configurés sur chaque élément
- $w$  est le bruit additif.

Le gain asymptotique (quand le nombre d'éléments  $N$  devient très grand) de cette configuration est proportionnel à  $N^2$  lorsque  $N_1 = N_2 = N$ , contrairement au gain proportionnel à  $N$  obtenu avec une seule RIS ou avec deux RIS en configuration parallèle.

Cette modélisation permet l'optimisation conjointe des phases  $\Delta\Phi_i^1$  et  $\Delta\Phi_j^2$  pour maximiser le rapport signal sur bruit ou minimiser le taux d'erreur binaire dans des environnements à forte obstruction.

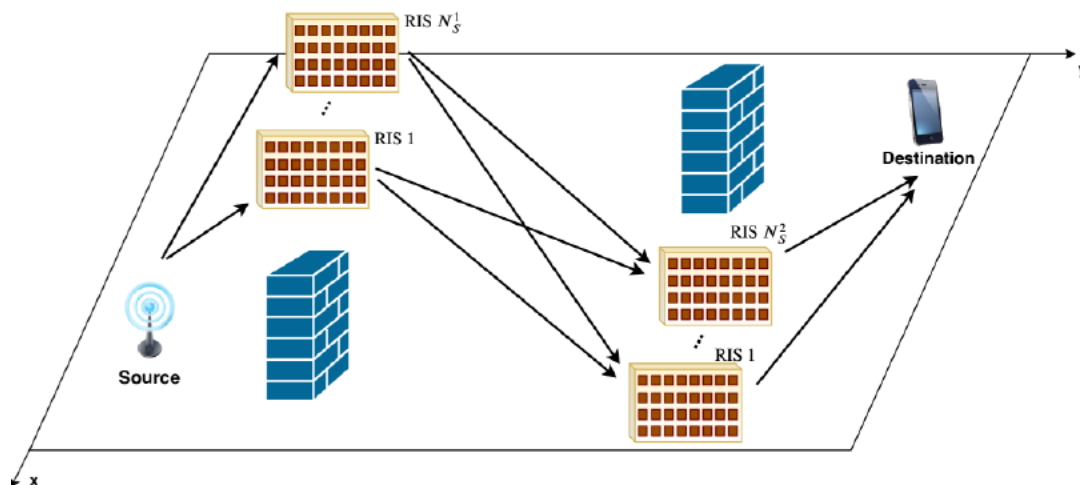


Figure 2.9 : Transmission via plusieurs surfaces intelligentes reconfigurables (RIS), scénario de propagation en extérieur.

## 2.8 Stratégies de Sélection de RIS

### 2.8.1 Sélection basée sur la géométrie

Dans les déploiements multi-RIS, la sélection optimale d'une ou plusieurs surfaces peut être déterminée en fonction des positions relatives de l'émetteur, du récepteur et des RIS. Le critère de sélection géométrique peut être formulé comme [38]:

$$RIS_{opt} = \arg \min_{k \in \{1,2,\dots,K\}} (d_{T,k} + d_{k,R}) \quad (2.37)$$

Où  $d_{T,k}$  représente la distance entre l'émetteur et la k-ième RIS, et  $d_{k,R}$  est la distance entre cette RIS et le récepteur.

### 2.8.2 Sélection basée sur la qualité du canal

Une approche alternative consiste à sélectionner la RIS offrant le meilleur gain de canal effectif [38] :

$$RIS_{opt} = \arg \max_{k \in \{1,2,\dots,K\}} \left| \sum_{i=1}^{N_k} \alpha_i^{(k)} \beta_i^k e^{j\Delta\phi_i^k} \right|^2 \quad (2.38)$$

Cette méthode nécessite une estimation préalable des coefficients de canal pour chaque RIS déployée.

### 2.8.3 Sélection hybride et allocation dynamique

Pour les environnements variables, une stratégie hybride peut être implémentée [38]:

$$S_{RIS} = k \mid \gamma_k > \gamma_{seuil} \text{ et } P_k < P_{max} \quad (2.39)$$

Où:

$\gamma_k$  représente le SNR attendu via la k-ième RIS

- $\gamma_{seuil}$  est un seuil minimum de performance
- $P_k$  est la consommation énergétique associée à l'activation de cette RIS

Cette approche permet d'optimiser l'utilisation des ressources tout en maintenant une qualité de service acceptable, particulièrement adaptée aux réseaux denses ou aux applications à contraintes énergétiques.

### 2.8.4 Sélection de la meilleure RIS

Dans un environnement multi-RIS où \$K\$ surfaces sont déployées, la sélection de la RIS optimale permet de réduire considérablement la complexité du système tout en maintenant des performances proches de l'optimal. Le critère de sélection peut être exprimé par [39]:

$$RIS_{opt} = \arg \max_{k \in \{1,2,\dots,K\}} \gamma_k \quad (2.40)$$

Où  $\gamma_k$  représente le rapport signal sur bruit (SNR) obtenu en utilisant uniquement la k-ième RIS :

$$\gamma_k = \frac{P_t |P_{Lk}|^2 \left| \sum_{i=1}^{N_k} \alpha_i^k \beta_i^k e^{j\Delta\Phi_i^k} \right|^2}{\sigma^2} \quad (2.41)$$

Cette approche présente plusieurs avantages :

- Réduction de la charge de signalisation (overhead) du système
- Diminution de la complexité calculatoire de l'optimisation des phases
- Économie d'énergie par l'activation sélective d'une seule RIS
- Simplification de la synchronisation entre les différents composants

La performance relative de cette méthode par rapport à l'utilisation simultanée de toutes les RIS peut être caractérisée par un ratio d'efficacité  $\eta$ :

$$\eta = \frac{\gamma_{single}}{\gamma_{all}} \approx \frac{\max_k(\gamma_k)}{\sum_{k=1}^K \gamma_k} \quad (2.42)$$

Dans de nombreux scénarios pratiques, ce ratio peut atteindre 0.7-0.9, confirmant l'efficacité de cette stratégie simplifiée.

## 2.9 Conclusion

Ce chapitre a offert une vue d'ensemble approfondie des canaux de propagation radio, en mettant en évidence les phénomènes physiques, les modèles statistiques et les configurations système qui influencent la transmission des signaux dans les réseaux sans fil. L'étude des environnements LOS et NLOS, ainsi que des approches de modélisation adaptées aux hautes fréquences et aux systèmes à surfaces intelligentes reconfigurables (RIS), témoigne de l'évolution continue vers des architectures de communication plus intelligentes, flexibles et performantes.

La maîtrise de ces concepts est essentielle pour concevoir des réseaux capables de répondre aux exigences croissantes en matière de débit, de latence et de fiabilité. En particulier, les stratégies de sélection des RIS offrent des perspectives prometteuses pour une allocation optimale des ressources et une amélioration significative des performances des réseaux de prochaine génération.

Le chapitre suivant sera consacré à la simulation de ces modèles dans un environnement idéalisé, afin d'évaluer leur comportement et leurs performances dans des conditions contrôlées.

# **Chapitre 3 : Validation numérique et analyse des performances**

# Chapitre 3 : Validation numérique et analyse des performances

---

3.1 Introduction .....	38
3.2 Modèles du canal de propagation .....	38
3.3 Paramètres de simulation.....	39
3.4 Métriques d'évaluation .....	40
3.5 Analyse des résultats de simulations .....	41
3.6 Synthèse des principaux résultats.....	53
3.7 Implications pratiques et recommandations de déploiement.....	53
3.8 Conclusion.....	53

---

## 3.1 Introduction

Dans le contexte de l'évolution rapide des réseaux sans fil vers la sixième génération (6G), les surfaces intelligentes reconfigurables émergent comme une technologie clé pour transformer l'environnement de propagation en un canal contrôlable et optimisé. Contrairement aux systèmes traditionnels qui subissent passivement les effets du canal, les RIS permettent de manipuler activement les ondes électromagnétiques à l'aide de surfaces composées d'éléments réfléchissants programmables.

Ce chapitre présente une étude des performances de systèmes de communication intégrant des RIS à travers des simulations numériques rigoureuses. Notre approche méthodologique s'articule autour de l'évaluation quantitative de l'impact des RIS sur des métriques fondamentales de performance : le taux d'erreur binaire (BER), la capacité du canal (bits/s/Hz), le rapport signal sur bruit (SNR), et l'affaiblissement de parcours.

L'originalité de notre travail réside dans l'analyse comparative multi-scénarios couvrant différents environnements de propagation (urbain micro-cellulaire UMi, canyon urbain), plusieurs bandes de fréquences (2,4 GHz pour les communications sub-6GHz et 28 GHz pour les bandes millimétriques), et diverses configurations d'antennes (SISO et MIMO). Cette approche permet d'identifier les conditions optimales de déploiement des RIS et de quantifier précisément leur apport par rapport aux systèmes traditionnels.

Les paramètres de simulation intègrent des modèles de propagation standardisés par le 3GPP, garantissant la représentativité et la validité de nos résultats pour des applications pratiques. L'étude examine systématiquement l'influence du nombre d'éléments RIS (de 16 à 1024 éléments) sur les performances globales du système, permettant d'établir des recommandations de dimensionnement en fonction des objectifs de qualité de service et des contraintes environnementales.

## 3.2 Modèles du canal de propagation

Pour reproduire fidèlement les conditions réelles de propagation dans des environnements urbains et intérieurs, nous nous appuyons sur les modèles standardisés par le 3GPP.

### 1. Environnement intérieur (2.4 GHz)

Le modèle 3GPP UMi (Urban Micro-cell) est adopté avec les expressions d'affaiblissement suivantes [33] :

- **Liaison directe (LOS) :**

$$P_L(d) = 22 \log_{10}(d) + 28 + 20 \log_{10}(f_c) \quad (3.1)$$

- **Sans liaison directe (NLOS) :**

$$P_L(d) = 36.7 \log_{10}(d) + 22.7 + 26 \log_{10}(f_c) \quad (3.2)$$

### 2. Environnement extérieur (28 GHz)

Le modèle 5G UMi-Street Canyon est utilisé pour la bande millimétrique [33] :

- **Liaison directe (LOS) :**

$$PL(d) = 21 \log_{10}(d) + 32.4 + 20 \log_{10} f_c \quad (3.3)$$

- **Sans liaison directe (NLOS) :**

$$PL(d) = 31.7 \log_{10}(d) + 32.4 + 20 \log_{10} f_c \quad (3.4)$$

Ces modèles ont été sélectionnés pour leur pertinence dans les environnements urbains denses et leur validation par les instances de standardisation internationales.

## 3.3 Paramètres de simulation

Le Tableau 3.1 récapitule les paramètres principaux utilisés dans nos simulations.

**Tableau 3.1: Paramètres de simulation**

Paramètre	Valeur
Fréquence porteuse	2.4 GHz (intérieur), 28 GHz (extérieur)
Puissance de transmission	30 dBm (sub-6GHz), 20 dBm (mmWave)
Densité spectrale de bruit	-174 dBm/Hz
Nombre d'éléments RIS (N)	16, 64, 128, 256, 1024
Facteur de Rice (K)	0, 3, 10, 15 dB
Distance émetteur-récepteur	50-300 m
Modulation	BPSK,

### 3.4 Métriques d'évaluation

#### 3.4.1 Rapport signal sur bruit (SNR) au récepteur :

Pour un système SISO (Single-Input Single-Output), le SNR au récepteur est donné par :

$$SNR = \frac{P_r}{P_n} = P_t \frac{|h|^2}{N_0 B} \quad (3.5)$$

Dans le cas d'un système assisté par RIS avec  $N$  éléments réfléchissants, le SNR peut être exprimé comme :

$$SNR_{RIS} = \frac{P_t |h_d + \sum_{n=1}^N h_{r,n} e^{j\phi_n} h_{t,n}|^2}{N_0 B} \quad (3.6)$$

Où :

- $P_t$  : Puissance de transmission.
- $h_d$  : Gain du canal direct entre l'émetteur et le récepteur.
- $N$  : Nombre d'éléments de la surface intelligente reconfigurable (RIS).
- $h_{t,n}$  : Gain du canal entre l'émetteur et le  $n$ -ième élément de la RIS.
- $h_{r,n}$  : Gain du canal entre le  $n$ -ième élément de la RIS et le récepteur.
- $\phi_n$  : Décalage de phase appliqué par le  $n$ -ième élément de la RIS.
- $e^{j\phi_n}$  : Représentation complexe du décalage de phase.
- $N_0$  : Densité spectrale de puissance du bruit.
- $B$  : Bande passante.

#### 3.4.2 Capacité du canal (bits/s/Hz) :

La capacité théorique du canal pour un système assisté par RIS est donnée par :

$$C_{RIS} = \log_2 \left( 1 + \frac{P_t |h_d + \sum_{n=1}^N h_{r,n} e^{j\phi_n} h_{t,n}|^2}{N_0 B} \right) \quad [\text{bits/s/Hz}] \quad (3.7)$$

En optimisant les phases  $\phi_n$  des éléments du RIS, on peut maximiser cette capacité. Cela revient à :

$$\phi_n = -\arg(h_{r,n}, h_{t,n}) \quad (3.8)$$

#### 3.4.3 Taux d'erreur binaire (BER) :

Le BER mesure la proportion de bits incorrectement reçus par rapport au nombre total de bits transmis. Pour une modulation BPSK (Binary Phase-Shift Keying) dans un canal AWGN, le BER peut être approximé par :

$$BER_{BPSK} = Q(\sqrt{2 \cdot SNR}) \quad (3.9)$$

Où  $Q(x)$  est la fonction Q (queue de la distribution normale), définie comme :

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (3.10)$$

Pour des modulations d'ordre supérieur comme la modulation QAM (Quadrature Amplitude Modulation) à  $M$  points, le BER peut être approximé par :

$$\text{BER}_{M\text{-QAM}} = \frac{4}{\log_2 M} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q\left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M \cdot \text{SNR}}{2(M-1)}}\right) \quad (3.11)$$

Dans nos simulations, nous utilisons principalement la modulation 16-QAM, pour laquelle le BER est calculé selon l'équation ci-dessus avec  $M=16$ .

### 3.5 Analyse des résultats de simulations

Dans cette section, nous étudions le système de communication sans fil illustré à la Figure 3.1, composé d'un émetteur, d'un récepteur et d'une seule surface intelligente reconfigurable (RIS). Nous proposons ici, une analyse unifiée des performances en termes d'erreur, applicable à différents modèles d'atténuation du signal, que ce soit dans des environnements intérieurs ou extérieurs. De plus, l'impact d'une RIS sur l'atténuation globale du signal est examiné pour des bandes de fréquences inférieures et supérieures à 6 GHz.

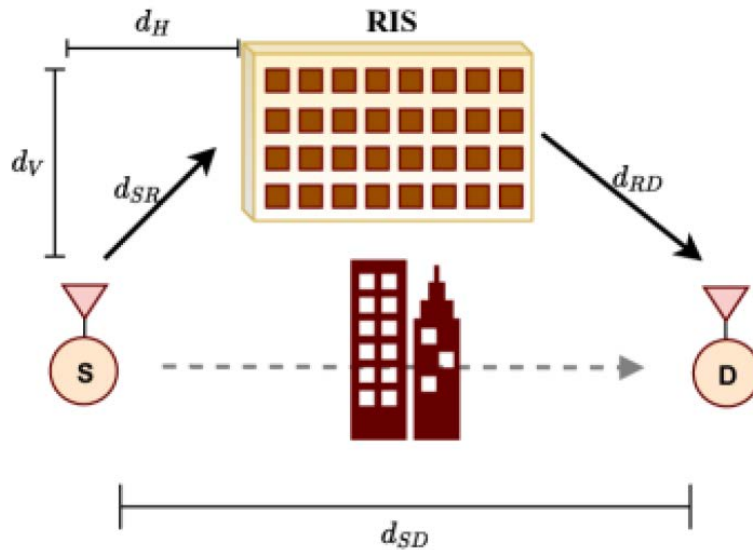
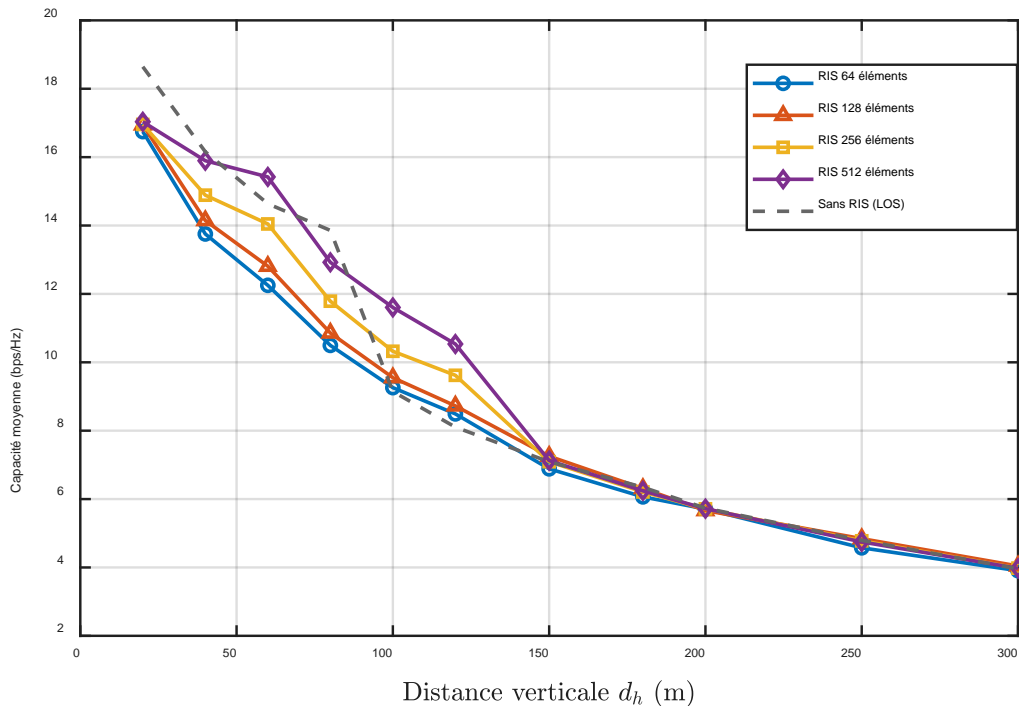


Figure 3.1 : Configuration d'un système de communication assisté par une surface intelligente reconfigurable (RIS), modélisé selon le scénario UMi du 3GPP.

#### 3.5.1 Analyse de la capacité du canal de transmission

La Figure 3.2 présente l'évolution de la capacité moyenne du canal en fonction de la distance horizontale  $d_h$ , pour différentes configurations de Réseaux Intelligents de Surface (RIS) comportant 64, 128, 256 et 512 éléments. L'analyse est réalisée dans un environnement urbain micro-cellulaire (UMi) à 2,4 GHz, et les résultats sont comparés à une configuration de ligne de visée directe (LOS) sans RIS.

Comme attendu, la capacité décroît avec l'augmentation de la distance  $d_{hdh}$ , en raison des pertes dues à la propagation. Toutefois, l'introduction d'un RIS permet d'atténuer cette dégradation. Plus précisément, l'efficacité du RIS s'améliore de manière significative avec le nombre d'éléments : les configurations avec 256 et 512 éléments montrent un gain notable par rapport aux cas sans RIS. Par exemple, à une distance  $d_h = 300$  m, la capacité moyenne passe d'environ 4 bps/Hz (sans RIS) à près de 6 bps/Hz avec un RIS de 512 éléments, soit une amélioration de 50 %.

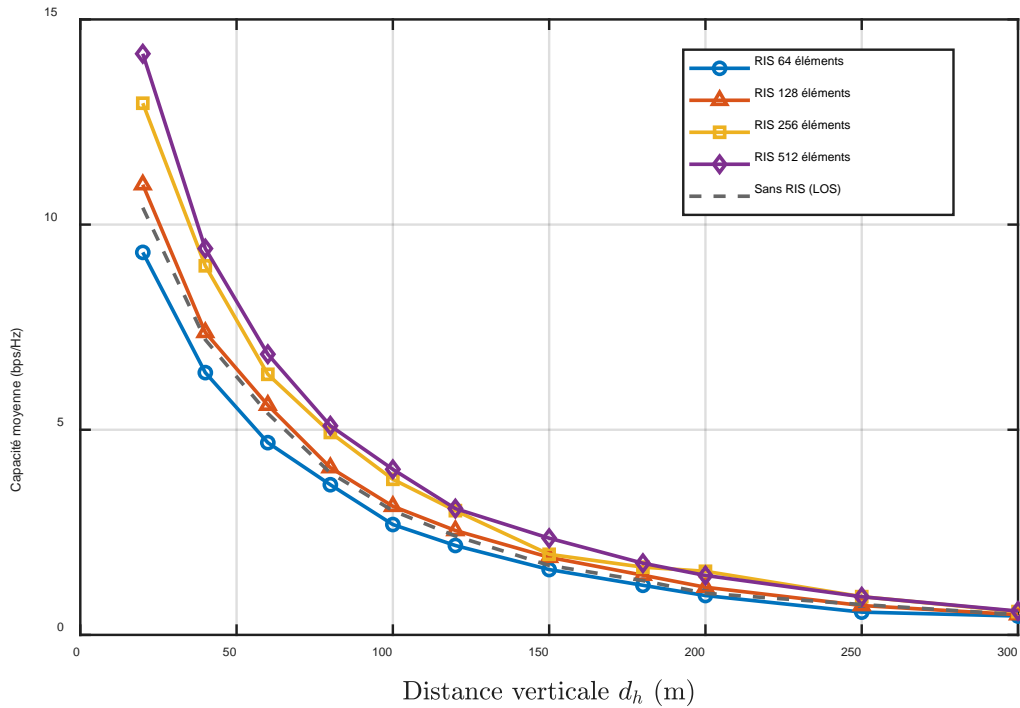


**Figure 3.2 : Évolution de la capacité du canal en fonction de la distance pour différentes valeurs de  $N_{RIS}$ , selon le modèle 3GPP UMi à une fréquence centrale de 2,4 GHz.**

Lorsque la fréquence de transmission est portée à 28 GHz et que l'environnement devient plus contraignant, en l'occurrence le modèle UMi-Street Canyon, les effets des pertes de propagation et de l'atténuation due aux obstacles deviennent encore plus prononcés. La Figure 3.3 présente ainsi l'évolution de la capacité moyenne du canal en fonction de la distance horizontale  $d_h$ , pour les mêmes configurations RIS (64, 128, 256 et 512 éléments), comparées à une transmission directe sans RIS (LOS).

On observe une diminution beaucoup plus marquée de la capacité avec la distance par rapport au cas à 2,4 GHz. Toutefois, l'intégration d'un RIS permet là encore de compenser ces pertes, avec une efficacité qui croît avec le nombre d'éléments. À titre d'illustration, à  $d_h = 300$ m, la capacité passe d'environ 0,5 bps/Hz sans RIS à près de 1,5 bps/Hz avec un RIS de 512 éléments. Ce gain substantiel montre que les RIS peuvent jouer un rôle crucial dans des conditions de propagation défavorables, en particulier dans les scénarios urbains denses où la ligne de visée est fréquemment obstruée.

Ces observations soulignent l'intérêt stratégique des RIS pour améliorer la couverture et la qualité de service dans les réseaux 5G à hautes fréquences, en exploitant leur capacité à rediriger intelligemment les ondes radio vers les utilisateurs cibles, même dans des environnements complexes.



**Figure 3.3 :** Évolution de la capacité du canal en fonction de la distance pour différentes valeurs de  $N_{RIS}$ , selon le modèle 5G UMi-Street Canyon à une fréquence centrale de 28 GHz.

### 3.5.2 Analyse de la perte de parcours

L'affaiblissement de parcours, également appelé path loss, constitue un paramètre fondamental dans la conception des réseaux sans fil, car il conditionne directement la puissance du signal reçu et, par conséquent, la qualité de service. Les Figure 3.4 et Figure 3.5 présentent une comparaison de la perte de trajet en fonction de la distance horizontale, pour différentes tailles de surfaces intelligentes reconfigurables (RIS).

Ces résultats mettent en évidence l'impact positif des RIS sur l'atténuation du signal. En particulier, ils montrent que plus le nombre d'éléments constituant la surface augmente, plus la perte de trajet diminue, et ce de manière significative. Cette tendance est particulièrement marquée à la fréquence de 2,4 GHz.

Les configurations RIS montrent des comportements contrastés entre les deux fréquences, révélant une efficacité relative variable selon la bande de fréquence utilisée. À 2,4 GHz, la RIS avec 1024 éléments offre des performances remarquables avec des pertes de 65-112 dB, surpassant même la transmission directe sur certaines distances et démontrant l'efficacité du beamforming passif dans cette bande de fréquence. En revanche, à 28 GHz, cette même configuration présente des pertes de 100-150 dB, restant systématiquement au-dessus des performances de transmission directe.

L'impact du nombre d'éléments RIS se révèle plus prononcé à 2,4 GHz qu'à 28 GHz. À la fréquence inférieure 2.4 GHz, l'amélioration entre une RIS de 16 éléments (102-147 dB) et 1024 éléments (65-112 dB) représente un gain substantiel de 35-37 dB, démontrant l'efficacité du scaling en nombre d'éléments. À 28 GHz, ce gain se réduit à environ 25-30 dB, passant de 137-185 dB ( $N=16$ ) à 100-150 dB ( $N=1024$ ), indiquant une réduction d'efficacité aux fréquences élevées.

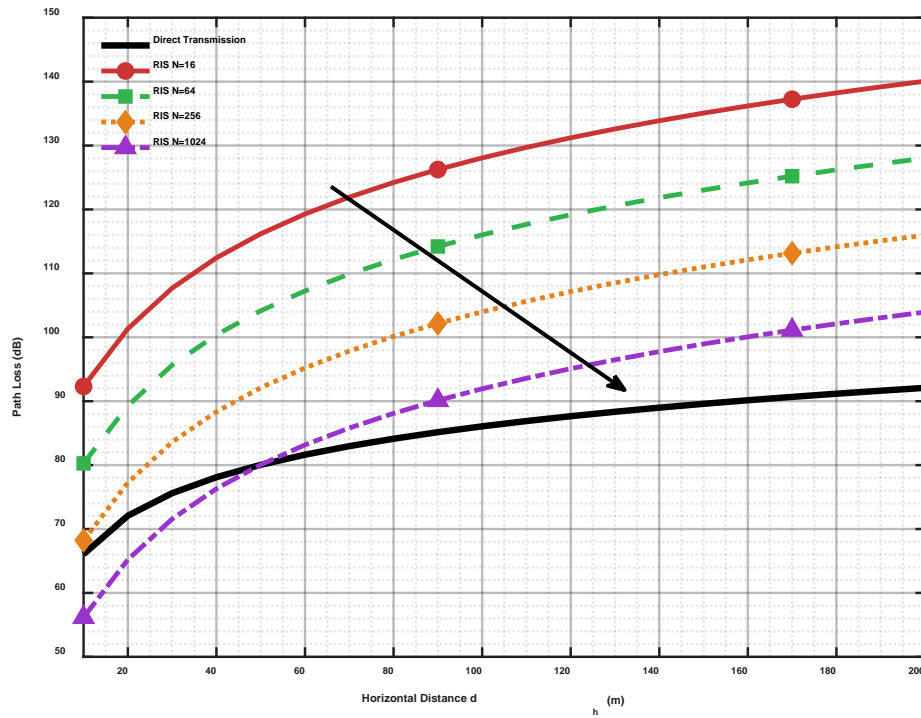


Figure 3.4 : Perte de parcours en fonction de la distance horizontale pour différentes valeurs de  $N_{RIS}$ , modèle 3GPP UMi à 2,4 GHz.

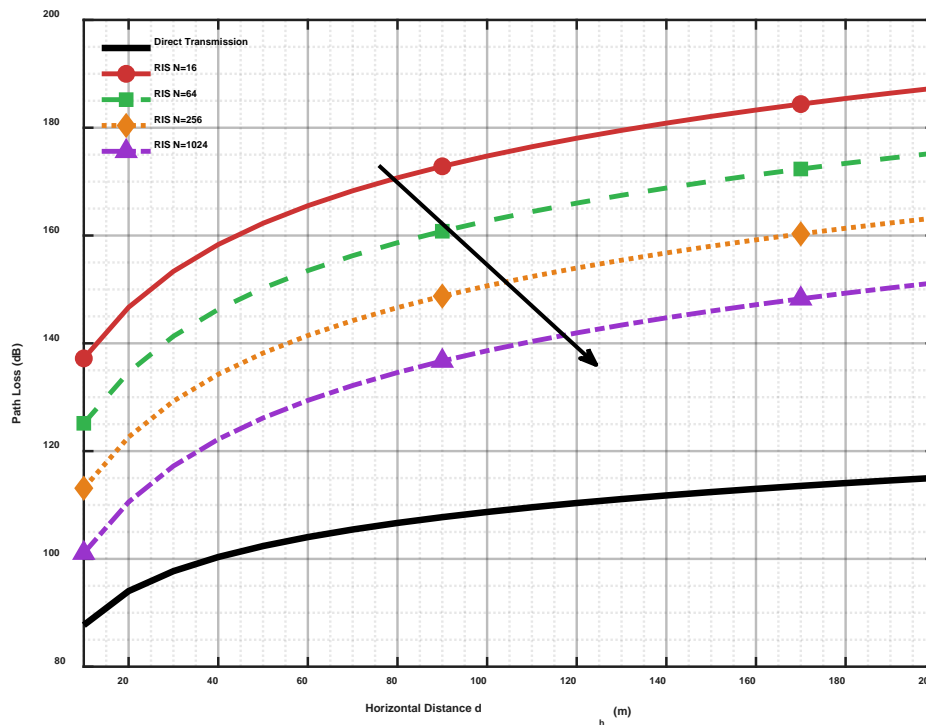
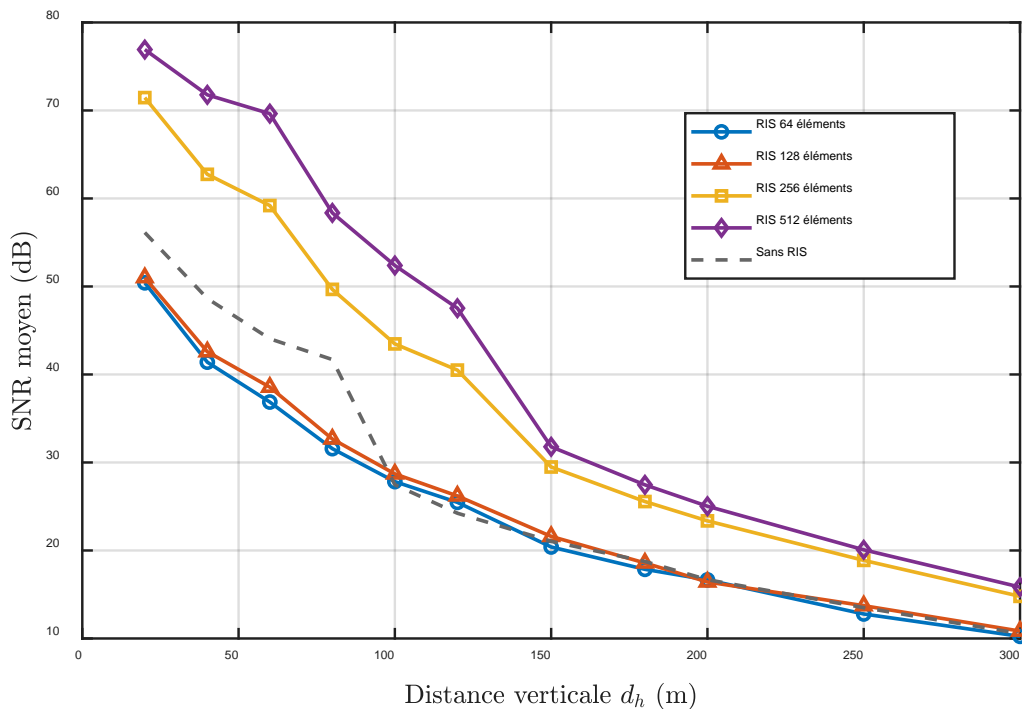


Figure 3.5 : Perte de parcours en fonction de la distance horizontale pour différentes valeurs de  $N_{RIS}$ , modèle 5G UMi-Street Canyon à 28GHz.

### 3.5.3 Analyse du rapport signal sur bruit moyen (SNR)

Les Figure 3.6 et Figure 3.7 illustrent l'évolution du SNR moyen en fonction de la distance verticale  $d_h$  pour différentes tailles de surfaces intelligentes reconfigurables (RIS), dans deux scénarios distincts : un environnement urbain micro-cellulaire (UMi) à 2,4 GHz et un canyon urbain à 28 GHz.

Dans le scénario à 2,4 GHz (Figure 3.6), l'introduction d'un RIS améliore nettement le SNR, notamment pour les petites et moyennes distances. Sans RIS, le SNR diminue régulièrement avec la distance, atteignant environ 15 dB à 300 mètres. En revanche, un RIS de 512 éléments permet d'obtenir un SNR moyen supérieur à 70 dB à courte distance (25 m), et supérieur à 25 dB même à grande distance (300 m). Les configurations avec 128 et 256 éléments apportent également un gain significatif de 10 à 20 dB par rapport au cas sans RIS. En revanche, une RIS de seulement 64 éléments n'apporte que peu d'amélioration à longue distance, ses performances devenant similaires à celles d'un lien direct. Cela confirme que le gain procuré par un RIS à basse fréquence est fortement corrélé à son nombre d'éléments, et que des configurations plus denses permettent une focalisation plus efficace de l'énergie.



**Figure 3.6: Comparaison du SNR en fonction de la distance pour les configurations avec et sans RIS, modèle 3GPP UMi,  $f_c = 2.4$  GHz.**

À 28 GHz (Figure 3.7), le comportement est sensiblement différent. L'environnement étant beaucoup plus contraignant, notamment à cause de l'atténuation atmosphérique et des effets de diffraction, le SNR chute rapidement avec la distance, même en présence d'un RIS. Les configurations de RIS avec 64, 128, 256 ou même 512 éléments ne permettent pas de maintenir un avantage au-delà de 100 mètres. En effet, à partir de cette distance, les courbes RIS croisent ou deviennent inférieures à celle du lien direct sans RIS. Ce phénomène peut s'expliquer par la complexité de la propagation en canyon urbain à 28 GHz, où les réflexions multiples, les pertes par absorption et les désalignements angulaires peuvent dégrader le faisceau réfléchi généré par le RIS. En l'absence de pilotage dynamique ou d'optimisation de phase, une RIS mal dimensionnée ou mal orientée peut même induire des interférences destructives, réduisant le SNR au lieu de l'améliorer.

En résumé, l'analyse montre que l'utilisation d'un RIS offre des gains très significatifs en termes de SNR dans les bandes sub-6 GHz, pourvu que le nombre d'éléments soit suffisant. En revanche, dans les environnements mmWave fortement atténués, un simple ajout de surface réfléchissante ne suffit pas : il faut des RIS massifs, parfaitement calibrés et idéalement adaptatifs, pour garantir un gain réel. Ces résultats soulignent la nécessité d'une approche intégrée combinant matériel avancé et contrôle intelligent pour exploiter pleinement le potentiel des RIS dans les systèmes 5G et au-delà.

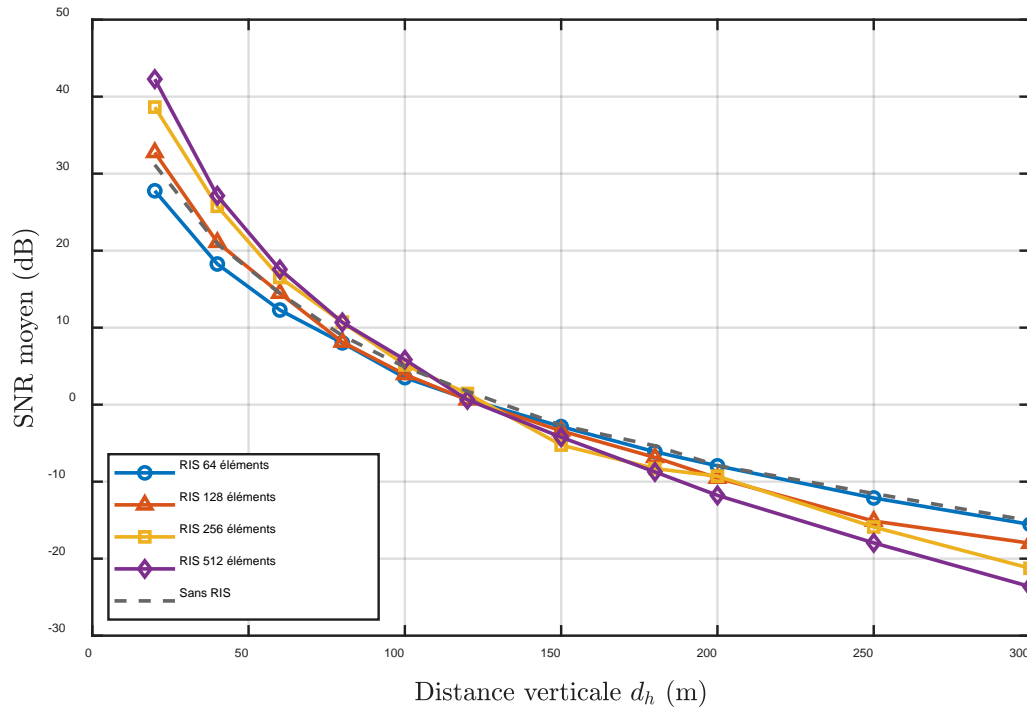


Figure 3.7: Comparaison du SNR en fonction de la distance pour les configurations avec et sans RIS, modèle 5G UMi-Street Canyon,  $f_c = 28$  GHz.

### 3.5.4 Analyse du Taux d'erreur binaire (BER)

Dans cette partie nous analyserons les BER pour une transmission SISO et MIMO.

#### 3.5.4.1 Système SISO assisté par RIS

La Figure 3.8 illustre les performances d'un système de communication SISO assisté par une surface intelligente reconfigurable (RIS) dans un environnement urbain micro-cellulaire (UMi) à 2,4 GHz. Les courbes obtenues révèlent une relation exponentielle inverse classique entre le taux d'erreur binaire (BER) et le rapport signal sur bruit (SNR), ce qui est typique des systèmes de communication numérique soumis à un bruit gaussien additif.

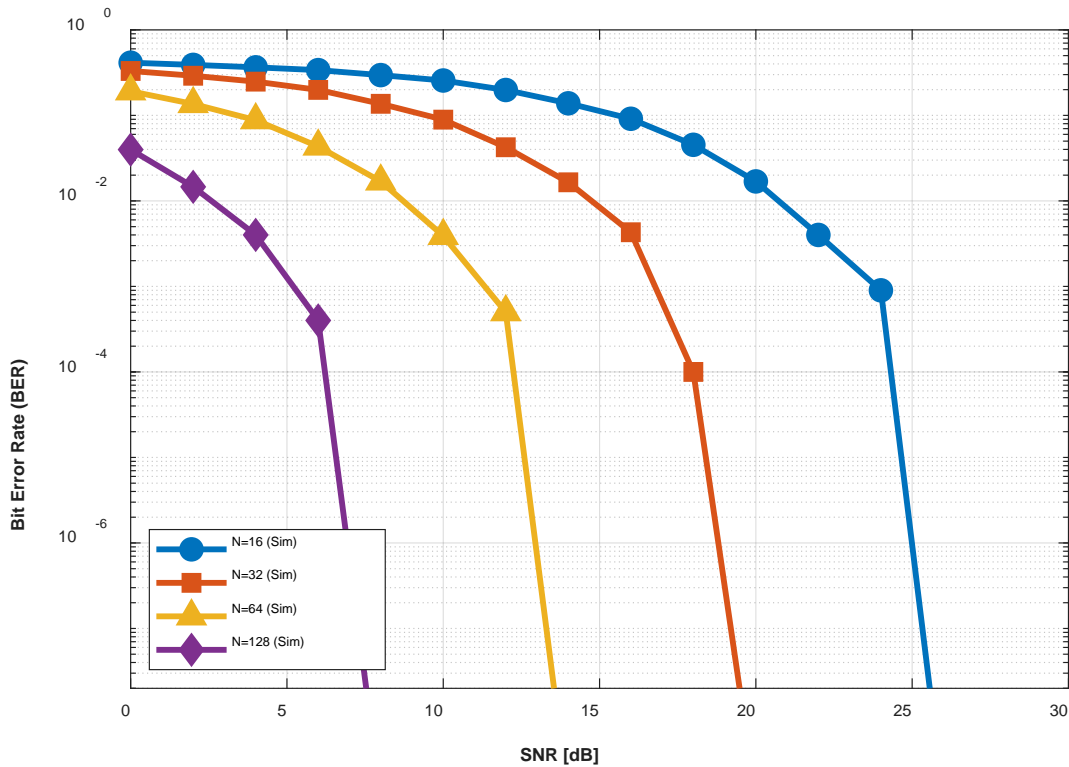


Figure 3.8: BER en fonction du SNR RIS-Assisté. Modèle 3GPP UMi,  $f_c = 2.4 \text{ GHz}$

Le système avec 128 éléments RIS présente des performances exceptionnelles, atteignant un BER de  $10^{-6}$  dès 6 dB de SNR avec une pente très raide indiquant une transition nette entre les régions de forte et faible probabilité d'erreur. La progression systématique avec le nombre d'éléments montre que  $N=64$  nécessite environ 12 dB pour atteindre  $10^{-6}$ ,  $N=32$  requiert approximativement 18 dB pour un BER de  $10^{-4}$ , tandis que  $N=16$  présente les performances les plus modestes nécessitant plus de 25 dB pour des BER très faibles.

Le passage de  $N=16$  à  $N=128$  apporte un gain remarquable de 15-20 dB pour un BER donné, démontrant l'efficacité de l'augmentation du nombre d'éléments RIS grâce à l'amélioration de la diversité spatiale, la meilleure focalisation du signal et la réduction de l'impact des évanouissements. En termes d'applications pratiques,  $N=32$  suffit pour un BER cible de  $10^{-3}$  avec environ 15 dB, tandis que  $N \geq 64$  est recommandé pour des applications critiques nécessitant un BER inférieur à  $10^{-5}$ , et  $N=128$  offre le meilleur compromis efficacité/complexité pour des performances optimales. Les pentes raides observées, particulièrement pour  $N=128$ , indiquent une excellente efficacité spectrale où le système transite rapidement d'un état de forte dégradation à des performances quasi-parfaites sur une plage de SNR réduite, confirmant la robustesse du modèle 3GPP UMi et validant l'approche de beamforming passif pour les environnements urbains à 2,4 GHz.

La Figure 3.9 présente les performances d'un système assisté par RIS dans un environnement 5G UMi-Street Canyon à 28 GHz. Contrairement aux résultats à 2,4 GHz, on observe des caractéristiques distinctes liées aux spécificités de la propagation en bandes millimétriques, notamment une sensibilité accrue aux obstacles et une atténuation atmosphérique plus prononcée.

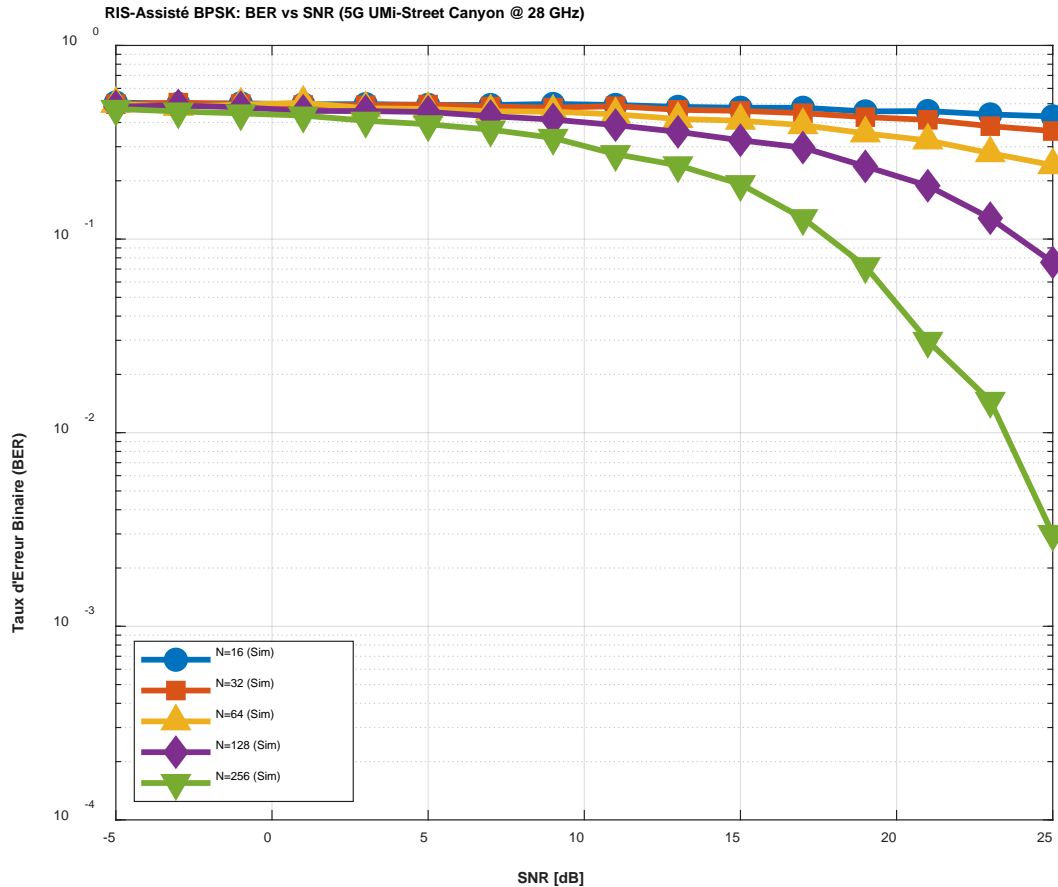


Figure 3.9 : BER en fonction du SNR RIS-Assisté. Mdèle 5G UMi-Street Canyon  $f_c = 28 \text{ GHz}$

L'analyse montre que seule la configuration avec  $N=256$  éléments parvient à améliorer substantiellement les performances, atteignant un BER de  $10^{-3}$  vers 22 dB de SNR avec une chute remarquable qui débute autour de 15 dB. Cette configuration présente une transition progressive mais efficace, passant de  $10^{-1}$  à  $10^{-3}$  sur une plage de SNR d'environ 7 dB (15-22 dB), démontrant une capacité d'adaptation aux conditions de propagation sévères du canyon urbain à 28 GHz.

Les configurations avec  $N=16$ ,  $N=32$ ,  $N=64$  et  $N=128$  présentent des performances similaires, avec des courbes qui se superposent pratiquement et maintiennent un BER élevé autour de  $10^{-1}$  même à fort SNR, indiquant que ces configurations sont insuffisantes pour surmonter les défis de propagation en bande millimétrique dans un environnement urbain dense. Cette observation révèle l'existence d'un seuil critique en termes de nombre d'éléments RIS nécessaires pour obtenir des performances acceptables à 28 GHz, seuil qui se situe clairement au-dessus de  $N=128$  et probablement autour de  $N=256$ . Le plateau observé pour les configurations inférieures à  $N=256$  s'explique par l'incapacité de ces RIS de taille limitée à concentrer suffisamment d'énergie pour compenser les pertes de propagation extrêmes caractéristiques de l'environnement Street Canyon à 28 GHz, où les phénomènes de diffraction, de réflexion multiple et d'absorption atmosphérique sont particulièrement prononcés.

Cette analyse met en évidence la nécessité impérieuse de déployer des RIS massifs ( $N \geq 256$ ) pour les communications mmWave en environnement urbain dense, où l'investissement dans des configurations de taille intermédiaire s'avère inefficace et économiquement non justifié. Les résultats suggèrent également que l'optimisation des phases RIS devient critique à ces fréquences, et que des stratégies de déploiement adaptatives avec des RIS de très grande taille sont indispensables pour

exploiter le potentiel des communications 5G/6G en bande millimétrique, confirmant que le passage aux hautes fréquences nécessite une révision complète des approches de dimensionnement des systèmes RIS par rapport aux bandes sub-6GHz.

### 3.5.4.2 Système MIMO assisté par RIS

#### 1. Configuration MIMO 2×2 avec RIS

La figure 3.10 présente les performances d'une configuration MIMO 2×2 avec RIS. Comme attendu, on observe une amélioration progressive des performances lorsque le nombre d'éléments du RIS augmente. Le passage de  $N_{RIS} = 32$  à  $N_{RIS} = 128$  permet un gain modeste mais bien visible, surtout à des SNR supérieurs à 20 dB. Le système suit une diminution classique du taux d'erreur binaire (BER) à mesure que le SNR augmente, atteignant environ  $10^{-3}$  à 30 dB. Cette configuration représente un bon compromis entre performance et complexité : même avec un nombre relativement réduit d'éléments RIS (32), les résultats restent satisfaisants, ce qui en fait une solution efficace pour des scénarios où la fiabilité est importante sans exiger trop de ressource.

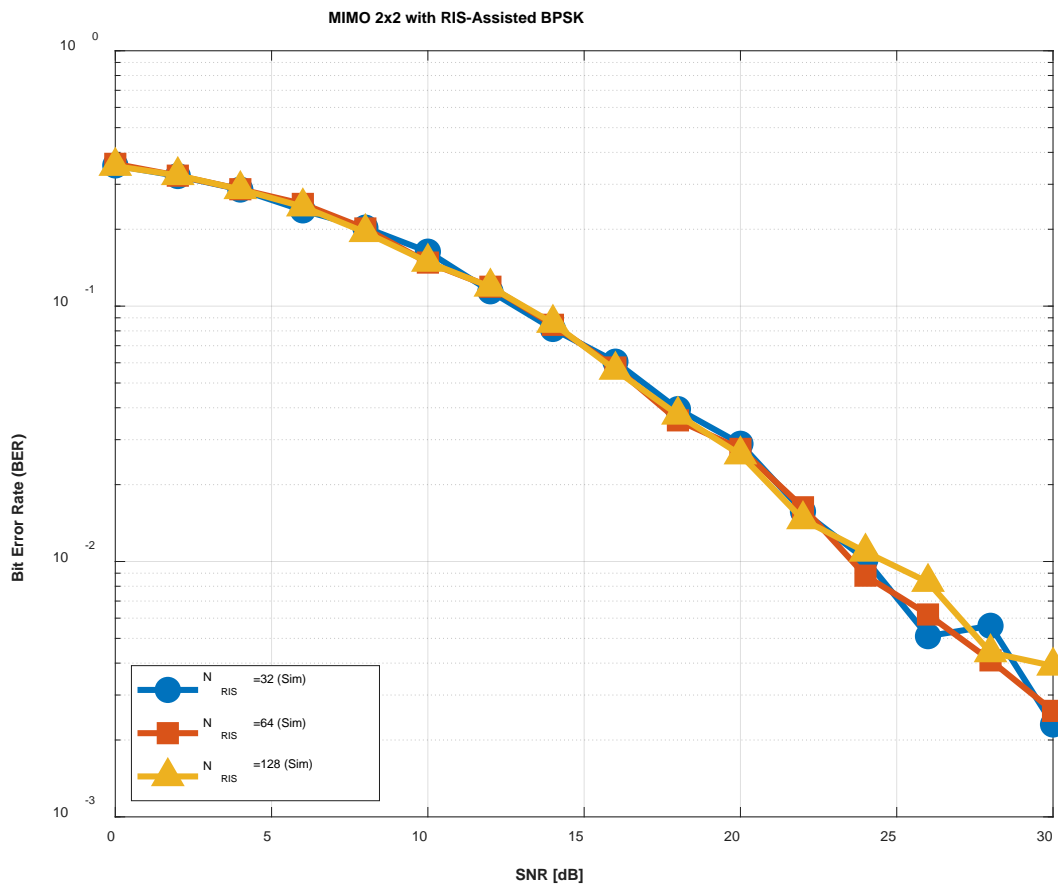


Figure 3.10 : BER en fonction du SNR pour une configuration MIMO 2×2 avec RIS.

## 2. Configuration MIMO 2×4 avec RIS

La figure 3.11 montre les performances d'un système MIMO 2×4 avec RIS. Par rapport à la configuration 2×2, cette configuration offre une nette amélioration grâce à l'ajout de deux antennes de réception, ce qui renforce la diversité spatiale. On observe un effet "cascade" typique : le taux d'erreur chute brutalement à des valeurs très faibles, autour de  $10^{-9}$ , dès que le SNR dépasse les 20–22 dB. Cela signifie qu'il existe un seuil à partir duquel le système devient presque parfait. L'effet du nombre d'éléments RIS est également plus marqué ici : avec  $N_{RIS} = 128$ , la chute du BER commence dès 20 dB, tandis qu'avec  $N_{RIS} = 32$ , il faut attendre 22 dB pour atteindre les mêmes performances. En résumé, augmenter le nombre d'antennes de réception permet de profiter d'une meilleure fiabilité du lien, ce qui est essentiel pour les applications qui exigent une transmission très fiable.

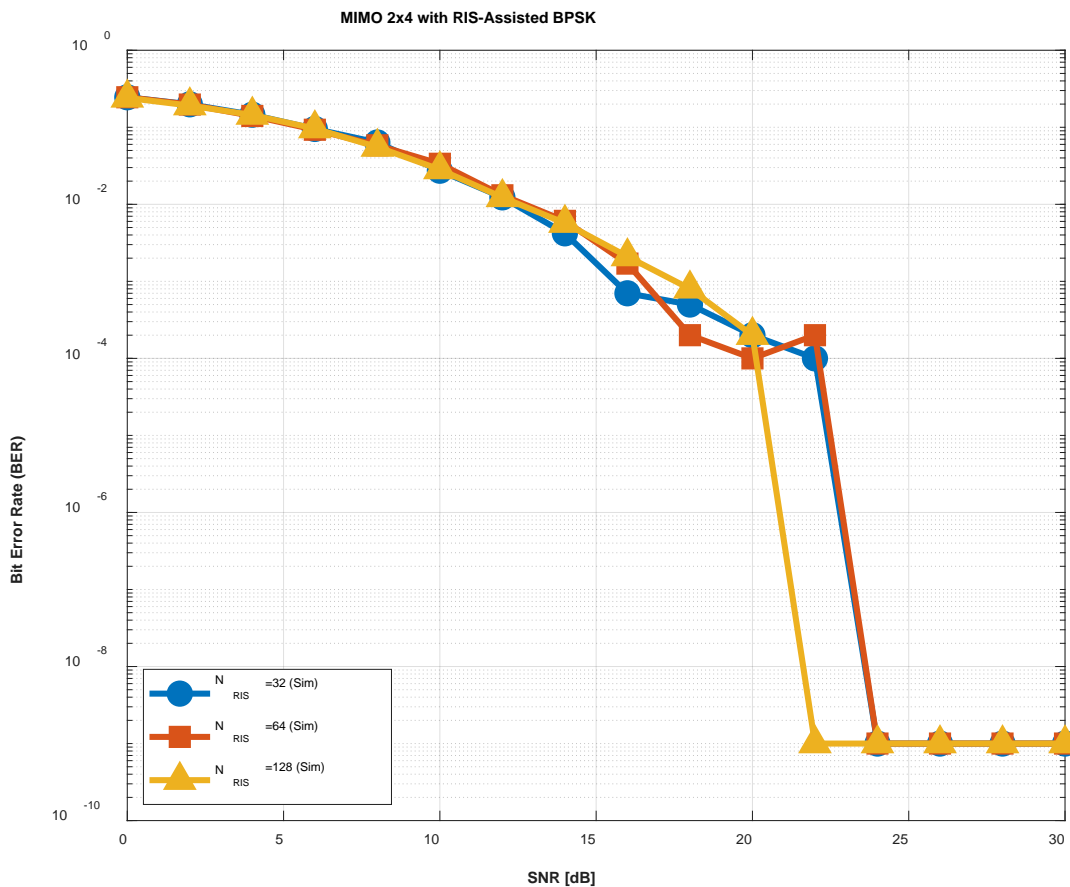


Figure 3.11 : BER en fonction du SNR pour une configuration MIMO 2×4 avec RIS.

## 3. Configuration MIMO 4×2 avec RIS

La figure 3.12 montre aussi les performances d'une configuration MIMO 4×2 avec RIS, qui, contrairement aux autres configurations, affiche des résultats très faible. Même à un SNR élevé de 30 dB, le taux d'erreur reste autour de 15 %, ce qui est bien trop élevé pour être acceptable. Contrairement à la configuration 2×4, aucun effet "waterfall" (chute rapide du BER) n'est observé : les performances plafonnent, indiquant un problème structurel. Ce mauvais résultat s'explique par un déséquilibre entre le nombre d'antennes d'émission (4) et de réception (2). Le système tente d'envoyer trop de flux simultanés par rapport à ce qu'il peut recevoir, ce qui provoque de fortes interférences que même le RIS ne parvient pas à corriger. De plus, le nombre d'éléments du RIS (32, 64 ou 128) n'a que peu d'impact

sur les performances, ce qui confirme que le problème vient de l'architecture elle-même. Ces résultats rappellent une règle essentielle des systèmes MIMO : le nombre de flux spatiaux ne doit jamais dépasser le nombre minimum d'antennes entre l'émetteur et le récepteur. Sinon, même avec un RIS, le système devient inefficace pour des applications pratiques.

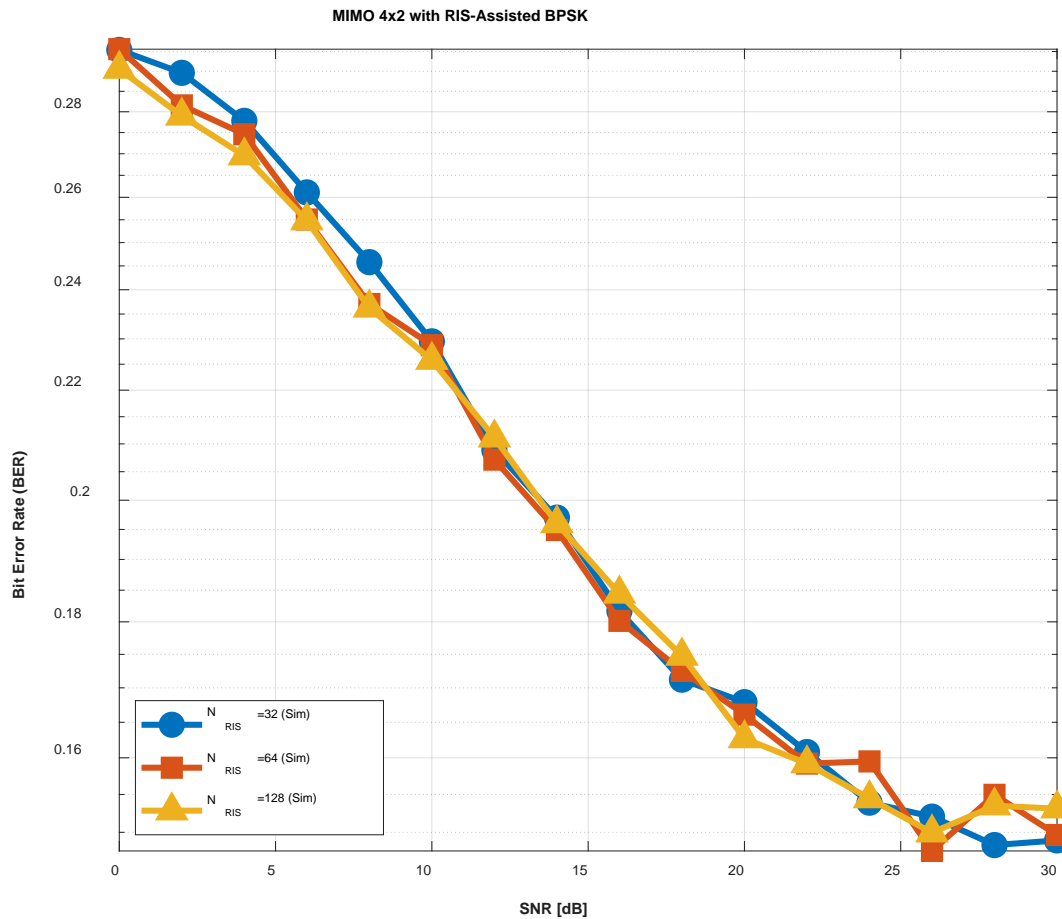


Figure 3.12 : BER en fonction du SNR pour une configuration MIMO 4x2 avec RIS.

#### 4. Configuration MIMO 4x4 avec RIS

La figure 3.13 montre aussi les performances d'une configuration MIMO 4x2 avec RIS. Ce système présente des performances moyennes qui se situent entre les configurations 2x2 et 2x4. Les trois courbes ( $N_{RIS} = 32, 64, 128$ ) sont pratiquement identiques, révélant que l'augmentation du nombre d'éléments RIS n'améliore pas les performances dans cette configuration. Le système atteint un BER d'environ  $7 \times 10^{-3}$  à 30 dB, offrant un compromis entre débit (4 flux simultanés) et qualité de liaison. L'absence d'effet "waterfall" et l'insensibilité au RIS indiquent que les limitations proviennent principalement de la complexité de décodage et de l'interférence inter-flux plutôt que des conditions de propagation radio.

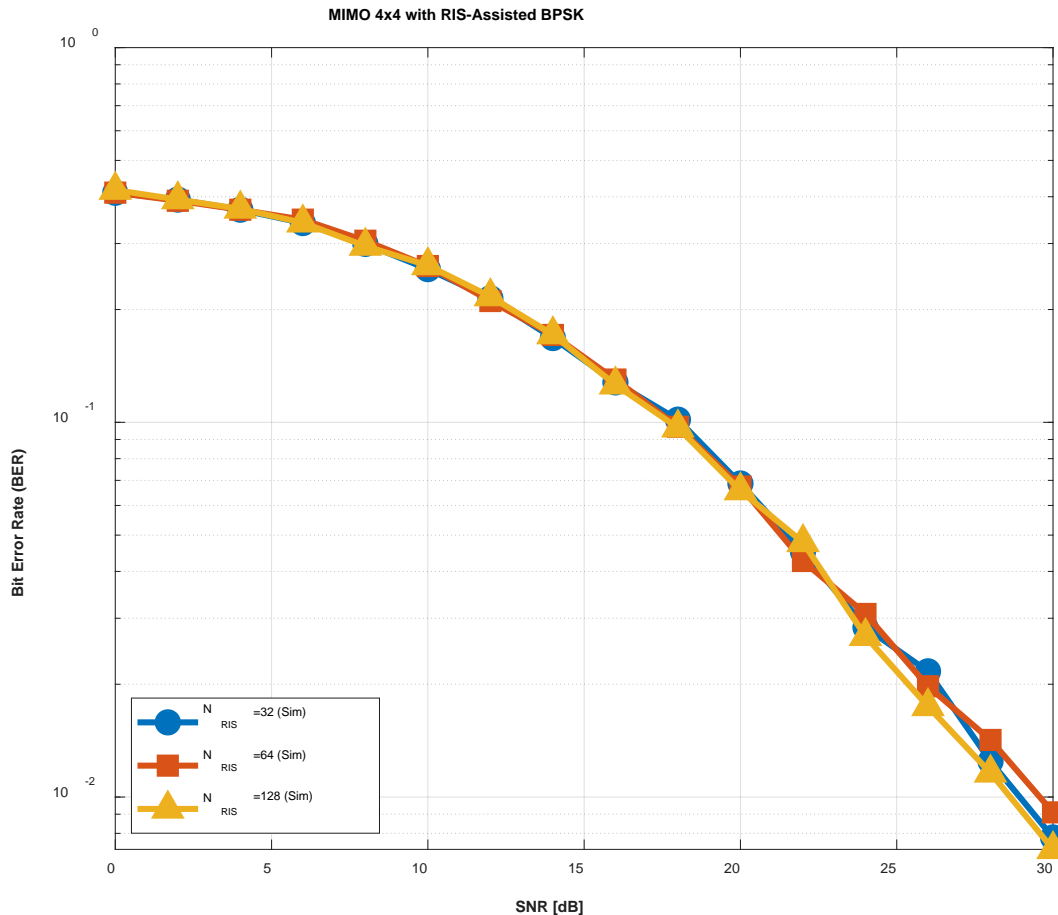


Figure 3.13 : BER en fonction du SNR pour une configuration MIMO 4×4 avec RIS.

## 5. Comparaison des Configurations MIMO

La comparaison des quatre configurations MIMO-RIS met en évidence des écarts de performance très importants, soulignant l'importance d'un bon équilibre entre les antennes d'émission et de réception. La configuration MIMO 2×2 sert de point de référence, avec des performances correctes (BER d'environ  $10^{-3}$  à 30 dB de SNR). En passant à la configuration 2×4, les performances s'améliorent fortement : le taux d'erreur chute jusqu'à  $10^{-9}$ , ce qui montre l'apport majeur de la diversité en réception. La configuration 4×4, quant à elle, offre des résultats intermédiaires mais stables, avec un BER autour de  $10^{-2}$ . En revanche, la configuration 4×2 montre des performances très dégradées : même à fort SNR, le BER reste élevé (environ 15 %). Ce mauvais résultat s'explique par un excès d'antennes d'émission par rapport à la réception, provoquant des interférences multiples que le RIS ne peut pas corriger. En résumé, ces résultats montrent clairement que pour concevoir un système MIMO-RIS efficace, il ne suffit pas d'ajouter des antennes. Il faut surtout veiller à équilibrer la diversité spatiale entre l'émetteur et le récepteur : augmenter les antennes de réception améliore fortement les performances, tandis qu'un excès d'antennes d'émission peut nuire gravement au bon fonctionnement du système.

### 3.6 Synthèse des principaux résultats

Les analyses menées dans le cadre de cette étude mettent en évidence une corrélation directe mais non linéaire entre le nombre d'éléments constituant une surface intelligente reconfigurable (RIS) et les performances globales du système de communication. Dans le cas des communications sub-6GHz (notamment à 2,4 GHz), un seuil critique est identifié autour de 64 éléments, au-delà duquel les gains deviennent significatifs. Les configurations plus denses, comprises entre 256 et 512 éléments, permettent d'atteindre des améliorations notables, avec une augmentation de capacité pouvant atteindre 50 % et des gains de SNR de l'ordre de 10 à 20 dB. Cette capacité de montée en échelle constitue un avantage stratégique pour adapter les RIS aux besoins spécifiques de chaque scénario d'usage.

L'étude comparative entre les bandes de fréquence 2,4 GHz et 28 GHz révèle des dynamiques de propagation fondamentalement distinctes. À 2,4 GHz, les RIS offrent des performances stables et efficaces sur l'ensemble des distances testées, démontrant leur robustesse dans des environnements urbains classiques. En revanche, à 28 GHz, dans un contexte de canyon urbain, les conditions de propagation se dégradent fortement en raison de l'atténuation, de la diffraction et de l'absorption atmosphérique. Dans ce cas, seules des configurations massivement dimensionnées ( $N \geq 256$ ) permettent de compenser ces pertes, soulignant la complexité inhérente au déploiement des RIS en bande millimétrique et la nécessité de stratégies adaptatives.

Par ailleurs, l'analyse des architectures MIMO met en lumière l'importance d'un dimensionnement équilibré entre les antennes d'émission et de réception. La configuration  $2 \times 4$  se distingue par son efficacité, exploitant pleinement la diversité spatiale en réception pour atteindre des taux d'erreur binaire extrêmement faibles (jusqu'à  $10^{-9}$ ). À l'inverse, la configuration  $4 \times 2$  illustre les limites d'un déséquilibre structurel, générant des interférences inter-flux que même des RIS optimisés ne parviennent pas à atténuer efficacement.

### 3.7 Implications pratiques et recommandations de déploiement

Pour les communications sub-6GHz, le déploiement de RIS de taille intermédiaire (64-128 éléments) constitue un compromis optimal entre performance et complexité, offrant des gains substantiels tout en maintenant une faisabilité économique. Ces configurations conviennent particulièrement aux environnements urbains denses où l'amélioration de la couverture et la réduction des zones d'ombre constituent des priorités.

Pour les communications millimétriques, l'impératif de RIS massivement dimensionnés ( $\geq 256$  éléments) nécessite des investissements considérables et des stratégies de déploiement sophistiquées. L'intégration de mécanismes adaptatifs et de contrôle intelligent devient indispensable pour garantir l'efficacité dans des environnements de propagation complexes.

### 3.8 Conclusion

Ce chapitre a exploré en profondeur les performances des systèmes de communication assistés par surfaces intelligentes reconfigurables (RIS), en s'appuyant sur une série d'analyses numériques rigoureuses. Les résultats obtenus confirment le rôle stratégique que peuvent jouer les RIS dans l'optimisation des réseaux sans fil de nouvelle génération, en particulier dans des environnements complexes et hétérogènes.

Les simulations ont mis en évidence le potentiel transformateur de cette technologie, capable d'améliorer significativement la capacité, la couverture et la robustesse des liaisons radio. Toutefois, ces gains ne sont atteignables que sous certaines conditions, notamment en ce qui concerne le

dimensionnement des surfaces, la fréquence d'opération, et l'architecture MIMO associée. Ces éléments doivent être soigneusement pris en compte pour garantir un déploiement efficace et économiquement viable.

En somme, ce chapitre a permis de dégager des lignes directrices claires pour l'intégration des RIS dans les futurs réseaux 6G, tout en ouvrant la voie à des recherches plus poussées sur l'optimisation adaptative, l'intelligence embarquée et la gestion énergétique de ces dispositifs.

# **Conclusion générale**

# Conclusion générale

Ce mémoire a mis en évidence le rôle central que peuvent jouer les surfaces intelligentes reconfigurables (RIS) dans la transformation des systèmes de communication sans fil de nouvelle génération. Loin de constituer une simple amélioration incrémentale, les RIS redéfinissent les paradigmes traditionnels de la propagation radio, en introduisant une capacité inédite à façonner dynamiquement l'environnement électromagnétique.

Les résultats de simulations menées ont permis de dégager plusieurs enseignements clés. D'une part, la relation entre le nombre d'éléments RIS et les performances du système s'avère non-linéaire, avec des seuils critiques identifiés selon les bandes de fréquence. Pour les communications sub-6GHz, des configurations intermédiaires (64 à 128 éléments) permettent d'atteindre un équilibre optimal entre gain de performance, coût énergétique et complexité de déploiement. Ces configurations sont particulièrement adaptées aux environnements urbains denses, où la couverture et la réduction des zones d'ombre sont des enjeux majeurs.

D'autre part, les communications en bande millimétrique (28 GHz) présentent des défis bien plus complexes. Les pertes dues à l'atténuation, à la diffraction et à l'absorption atmosphérique imposent l'utilisation de RIS massivement dimensionnés ( $\geq 256$  éléments) pour maintenir des performances acceptables. Cette exigence implique non seulement des investissements matériels plus importants, mais aussi la mise en œuvre de stratégies de contrôle adaptatif et intelligent, capables de répondre aux dynamiques rapides de l'environnement radio.

L'analyse des configurations MIMO a également révélé l'importance cruciale de l'architecture du système. La configuration  $2 \times 4$  s'est distinguée par sa capacité à exploiter efficacement la diversité spatiale en réception, atteignant des taux d'erreur binaire extrêmement faibles (jusqu'à  $10^{-9}$ ). À l'inverse, des configurations déséquilibrées comme le  $4 \times 2$  peuvent générer des interférences inter-flux significatives, que même des RIS optimisés ne parviennent pas à compenser, soulignant ainsi la nécessité d'une co-conception RIS-MIMO cohérente.

Sur le plan pratique, ces résultats se traduisent par des recommandations concrètes :

- **Pour les bandes sub-6GHz**, privilégier des RIS de taille modérée, facilement intégrables dans les infrastructures existantes.
- **Pour les bandes millimétriques**, adopter une approche systémique combinant RIS massifs, intelligence artificielle embarquée et gestion énergétique optimisée.

Enfin, cette étude ouvre des perspectives de développement particulièrement prometteuses. L'intégration de l'intelligence artificielle pour l'optimisation dynamique des phases RIS, l'étude de

réseaux coopératifs multi-RIS, et la prise en compte des contraintes énergétiques dans la conception des architectures futures constituent autant de leviers pour faire des RIS une technologie clé des réseaux 6G.

En conclusion, les surfaces intelligentes reconfigurables s'imposent comme une technologie de rupture, capable de transformer l'environnement radio en un espace programmable, adaptatif et intelligent. Leur potentiel dépasse largement le cadre des communications classiques, et pourrait s'étendre à des domaines tels que l'Internet des objets, les réseaux véhiculaires, ou encore les systèmes de communication satellitaires. Ce travail constitue ainsi une contribution significative à la compréhension, à l'évaluation et à l'orientation stratégique du déploiement des RIS dans les réseaux du futur.

# **Bibliographie**

# Bibliographie

[1]	ITU, <i>History of Mobile Communications</i> , ITU, 2020.
[2]	ETSI, <i>GSM – The First Digital Mobile System</i> , ETSI, 2021.
[3]	3GPP, <i>3G UMTS and HSPA Evolution</i> , Release 7 & 8.
[4]	GSMA, <i>The Mobile Economy 2019</i> , GSM Association, 2019.
[5]	ITU-R, <i>IMT-2020 Technology Trends</i> , ITU-R, 2021.
[6]	Ericsson, <i>5G: The Next Generation of Mobile Communication</i> , White Paper, 2020.
[7]	W. Saad et al., “A vision of 6G wireless systems,” <i>IEEE Network</i> , vol. 34, no. 3, 2020.
[8]	T. S. Rappaport et al., “Millimeter wave mobile communications,” <i>IEEE Access</i> , vol. 1, 2013.
[9]	A. Al-Fuqaha et al., “On End-to-End Intelligent Automation of 6G Networks,” <i>Future Internet</i> , vol. 14, 2022.
[10]	M. S. Islam et al., “6G Wireless Communication Networks,” <i>IJWMT</i> , vol. 12, no. 1, 2022.
[11]	Q. Wu & R. Zhang, “Intelligent reflecting surface aided wireless network,” <i>IEEE Commun. Mag.</i> , 2020.
[12]	M. Di Renzo et al., “Smart radio environments empowered by RIS,” <i>IEEE JSAC</i> , 2020.
[13]	C. Liaskos et al., “A new wireless communication paradigm via intelligent surfaces,” <i>IEEE Commun. Mag.</i> , 2018.
[14]	W. Tang et al., “Path loss modeling and experimental measurement,” <i>IEEE Trans. Wireless Commun.</i> , 2021.
[15]	S. Abadal et al., “Programmable metasurfaces,” <i>Proc. IEEE</i> , 2022.
[16]	L. Zhang et al., “Metasurfaces for mmWave and THz,” <i>Nature Reviews Materials</i> , 2021.

[17]	T. J. Cui et al., "Coding metamaterials," <i>Light Sci. Appl.</i> , 2014.
[18]	E. Björnson et al., "Massive MIMO is a reality," <i>Digit. Signal Process.</i> , 2019.
[19]	E. Basar et al., "Wireless communications through RIS," <i>IEEE Access</i> , 2019.
[20]	M. Di Renzo et al., "RIS vs. relaying," <i>IEEE Open J. Commun. Soc.</i> , 2020.
[21]	Q. Wu et al., "RIS aided wireless communications: A tutorial," <i>IEEE Trans. Commun.</i> , 2021.
[22]	H. Zhang et al., "RIS with limited phase shifts," <i>IEEE Trans. Wireless Commun.</i> , 2021.
[23]	C. Huang et al., "RIS for energy efficiency," <i>IEEE Trans. Wireless Commun.</i> , 2019.
[24]	A. Abrardo et al., "RIS: Energy vs. spectral efficiency," <i>IEEE ICC Workshops</i> , 2020.
[25]	K. Ntontin et al., "RIS vs. relaying: Positioning and coverage," <i>IEEE ICC Workshops</i> , 2020.
[26]	Y. Han et al., "Large intelligent surface-assisted wireless communication," <i>IEEE Trans. Veh. Tech.</i> , 2019.
[27]	A. Goldsmith, <i>Wireless Communications</i> , Cambridge University Press, 2005.
[28]	T. S. Rappaport, <i>Wireless Communications: Principles and Practice</i> , Prentice Hall, 2002.
[29]	T. S. Rappaport et al., "Wideband mmWave propagation measurements," <i>IEEE Trans. Commun.</i> , 2015.
[30]	A. F. Molisch, <i>Wireless Communications</i> , Wiley, 2012.
[31]	C. A. Balanis, <i>Antenna Theory</i> , Wiley, 2016.
[32]	ITU-R P.526-15, <i>Propagation by Diffraction</i> , ITU, 2019.
[33]	3GPP TR 38.901, <i>Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz</i> , 2022.
[34]	M. R. Akdeniz et al., "Millimeter wave channel modeling," <i>IEEE JSAC</i> , 2014.

[35]	Q. Wu & R. Zhang, "Towards smart and reconfigurable environment," <i>IEEE Commun. Mag.</i> , 2020.
[36]	M. Di Renzo et al., "Smart radio environments empowered by RIS," <i>IEEE JSAC</i> , 2020.
[37]	E. Basar et al., "Wireless communications through RIS," <i>IEEE Access</i> , 2019.
[38]	C. Huang et al., "RIS for energy efficiency," <i>IEEE Trans. Wireless Commun.</i> , 2019.
[39]	E. Björnson et al., "Massive MIMO is a reality," <i>Digit. Signal Process.</i> , 2019.