

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد نخلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

N° RT8

Filière : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Présenter par

LARIBI Abderrahim

&

MANSOUR Wassim eddine

Pour l'obtention du diplôme de Master

Thème

**Les scénarios de communication sans
fils assistées par les surfaces
réfléchissantes intelligents « IRS »**

Proposé par : Mr. AIT SAADI Hocine

Année Universitaire 2024-2025

Remerciement

Nous remercions d'abord Dieu Le Tout-Puissant de nous avoir accordé la santé, la force et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nos remerciements les plus sincères vont à nos parents et nos frères et sœurs pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien permanent.

*Nous exprimons notre profonde gratitude à Monsieur **AIT SAADI Hocine**, pour son encadrement, ses conseils précieux, sa disponibilité et son soutien tout au long de cette année. Ce fut un honneur d'apprendre à ses côtés.*

Nous remercions également les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire et pour l'attention qu'ils lui ont portée.

Enfin, nous remercions toutes les personnes, de près ou de loin, qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Du fond de cœur je dédie ce travail à mes chers parents, pour leur amour infini, leur patience et leurs sacrifices constants.

À ma mère, source de tendresse et de prières.

À mon père, exemple de force et de sagesse.

*À mes sœurs et frère **Fatima Zahra, Nour El Houda et Mohamed El Mehdi** pour leur soutien et leur présence réconfortante.*

*À mon binôme **Wassim**, pour la collaboration, l'engagement et l'esprit d'équipe tout au long de ce projet.*

*À mon encadreur, Monsieur **AIT SAADI Hocine**, pour sa confiance et ses conseils éclairés.*

À tout ma famille, Pour votre présence rassurante, vos encouragements constants et votre foi en moi à chaque étape.

À mes amis fidèles et à toutes les personnes qui ont cru en moi.

Que ce modeste travail soit un témoignage de ma reconnaissance et de mon affection.

ABDERRAHIM

Dédicace

À mes chers parents,

Pour votre amour inestimable, votre soutien indéfectible et vos sacrifices silencieux qui ont été le socle de mon parcours.

À ma famille,

Pour votre présence rassurante, vos encouragements constants et votre foi en moi à chaque étape.

À mes amis sincères,

Pour les moments de partage, d'entraide et de motivation vécus ensemble.

*À mon binôme **Abderrahim,***

Pour la collaboration harmonieuse, la complicité professionnelle et l'engagement partagé durant tout ce travail.

*À mon encadrant **Mr Hocine AIT SAADI,***

Pour ses conseils éclairés, sa disponibilité et son accompagnement rigoureux qui ont grandement contribué à l'aboutissement de ce mémoire.

Que ce mémoire soit dédié à vous tous, en témoignage de ma profonde reconnaissance, de mon estime et de mon respect.

WASSIM

ملخص: الأسطح الذكية العاكسة هي هياكل مكونة من العديد من العناصر الخاملة القابلة لإعادة ال والتي تستطيع تعديل طور (وأحياناً سعة) الإشارات الكهرومغناطيسية التي تصطدم بها بشكل ديناميكي. على عكس المرآة التقليدية التي تعكس الموجات بشكل ثابت، يمكن للأسطح الذكية العاكسة التحكم في اتجاه وشكل الإشارة المنعكسة بفضل جهاز تحكم نكي داخلي يقوم بضبط كل عنصر من عناصر السطح.

يسمح ذلك بتحسين تغطية الشبكة، وتقليل التداخلات، وزيادة نسبة الإشارة إلى الضوضاء، وحتى تأمين الاتصالات، دون استهلاك طاقة في الإرسال. إنها تقنية أساسية لشبكات الجيل السادس

كلمات المفاتيح: الأسطح الذكية العاكسة، نسبة الإشارة إلى الضوضاء، تعدد المداخل والمخارج، شبكة الجيل السادس.

Résumé : Une surface réfléchissante intelligente, où IRS, est une structure composée de nombreux éléments passifs reconfigurables capables de modifier dynamiquement la phase (et parfois l'amplitude) des signaux électromagnétiques qui la frappent. Contrairement à un miroir classique qui réfléchit les ondes de façon fixe, l'IRS peut contrôler la direction et la forme du signal réfléchi, grâce à un contrôleur intelligent qui ajuste chaque élément de la surface.

Cela permet d'améliorer la couverture réseau, réduire les interférences, augmenter le SNR et même sécuriser les communications, sans consommer d'énergie pour l'émission. C'est une technologie clé pour les réseaux 6G.

Mots clés : IRS, SNR, MIMO, 6G.

Abstract: An Intelligent Reflecting Surface (IRS) is a structure composed of many reconfigurable passive elements capable of dynamically modifying the phase (and sometimes the amplitude) of incident electromagnetic signals. Unlike a conventional mirror that reflects waves in a fixed manner, the IRS can control the direction and shape of the reflected signal, thanks to an intelligent controller that adjusts each element of the surface.

This enables the enhancement of network coverage, interference reduction, and SNR improvement, while consuming no power for signal transmission. It is considered a key technology for future 6G wireless network

Keywords: IRS, SNR, MIMO, 6G.

Liste des abréviations

- **1G** → **6G** : 1st to 6th Generation of mobile networks
- **AI / IA** : Artificial Intelligence / Intelligence Artificielle
- **AF** : Amplify-and-Forward
- **ASK** : Amplitude Shift Keying
- **BLE** : Bluetooth Low Energy
- **BS** : Base Station
- **BPSK** : Binary Phase Shift Keying
- **CDMA** : Code Division Multiple Access
- **CPU** : Central Processing Unit
- **CSI** : Channel State Information
- **CNN** : Convolutional Neural Network
- **DNN** : Deep Neural Network
- **DF** : Decode-and-Forward
- **EDGE** : Enhanced Data Rates for GSM Evolution
- **FD** : Full Duplex
- **FDMA** : Frequency Division Multiple Access
- **FPGA** : Field Programmable Gate Array
- **FSK** : Frequency Shift Keying
- **GPRS** : General Packet Radio Service
- **GSM** : Global System for Mobile Communications
- **HD** : Half Duplex
- **IoT** : Internet of Things
- **IRS / RIS** : Intelligent Reflecting Surface

- **ISM** : Industrial, Scientific and Medical band
- **JTACS** : Japan Total Access Communication System
- **LDPC** : Low-Density Parity-Check
- **LEO** : Low Earth Orbit
- **LoS / NLoS** : Line of Sight / Non-Line of Sight
- **LTE** : Long Term Evolution
- **MIMO** : Multiple Input Multiple Output
- **mmWave** : Millimeter Wave
- **NMT** : Nordic Mobile Telephone
- **PIN** : Positive-Intrinsic-Negative (diode)
- **PSK** : Phase Shift Keying
- **QAM** : Quadrature Amplitude Modulation
- **QoS** : Quality of Service
- **RTMI** : Réseau de Téléphonie Mobile Intégré
- **Rx** : Receiver
- **SNR** : Signal to Noise Ratio
- **TACS** : Total Access Communications System
- **TDMA** : Time Division Multiple Access
- **THz** : Terahertz
- **TMA** : Telefónica Móvil de España
- **Tx** : Transmitter
- **UMTS** : Universal Mobile Telecommunications System
- **URLLC** : Ultra-Reliable Low-Latency Communications
- **Wi-Fi** : Wireless Fidelity

Table de matière

Introduction générale	14
------------------------------------	----

CHAPITRE 1 : Généralité sur les communications sans fils

1.1 Introduction.....	16
1.2 Historique et évolution des communications sans fil	16
1.2.1 Origines des communications sans fils	16
1.2.2 L'évolution des réseaux mobiles (1G à 5G)	17
1.2.3 les principales technologies de communications sans fils	21
1.3 Principes fondamentaux des communications sans fils	24
1.3.1 transmission des signaux :	24
1.3.2 Modulation et codage :	25
1.3.2.1 La modulation :	25
1.3.2.2 Codage de canal :	28
1.3.3 Techniques de multiplexage	28
1.3.3.1 TDMA (Time Division Multiplexing) :	28
1.3.3.2 FDMA (Frequency Division Multiplexing) :	28
1.3.3.3 CDMA (Code Division Multiple Access) :	29
1.4 Problèmes de propagation dans les réseaux sans fil.....	30
1.4.1 Zones mortes et pertes de signal.....	30
1.4.2 Interférences intercellulaires	30
1.4.3 Multipath et évanouissement.....	30
1.5 Technologies émergentes : vers des réseaux intelligents	31
1.5.1 Massive MIMO	31
1.5.2 Formation de faisceaux (Beamforming)	31
1.5.3 Surfaces Réfléchissantes Intelligentes (IRS)	32
1.6 intégration de l'intelligence artificielle dans les communications sans fils	33
1.7 Conclusion	34

CHAPITRE 2 : Les surfaces réfléchissantes intelligentes « IRS »

2.1 Introduction.....	36
2.2 Définition et principe de fonctionnement des surfaces réfléchissantes intelligences.....	36
2.2.1 Définition d'IRS.....	36
2.2.2 Principe de fonctionnement	38
2.2.3 IRS vs relais traditionnels	40

2.3 Architecture matériel des IRS.....	41
2.3.1 Structure Général d'une IRS.....	41
2.3.2 Matériaux composites de l'élément individuel	42
2.3.3 Contrôleur IRS et puces accordables.....	43
2.3.4 Mécanisme d'ajustement de phase.....	44
2.3.5 Fonctions du contrôleur intelligent :.....	45
2.3.6 Différents types d'architecture IRS	46
2.4 Rôle des IRS dans les réseaux sans fils.....	47
2.4.1 contrôle intelligent de la propagation du canal.....	47
2.4.2 Amélioration du SNR et formation de faisceaux passive « passive-beamforming ».....	48
2.4.3 Réduction des interférences et amélioration de la QoS.....	49
2.4.3.1 Atténuation des interférences par contrôle de phase.....	49
2.4.4 Réduction de la consommation énergétique dans les réseaux 6G.....	51
2.4.4.1 Passivité et efficacité énergétique de l'IRS.....	51
2.4.4.2 L'IRS comme composant technologique des réseaux verts (green networks).....	51
2.4.4.3 Mise en place urbaine à grande échelle sans infrastructures lourdes	51
2.5 Application pratique des IRS dans les réseaux sans fils	52
2.6 Avantage et défis pratique	53
2.7 Conclusion	54

CHAPITRE 3 : Les scénarios de communication assistées par IRS

3.1 Introduction.....	56
3.2 Les scénarios de communication sans fil assistées par IRS	56
3.2.1 Scénario 1 : connectivité dans les zones rurales.....	56
3.2.1.1 Contexte et défis	56
3.2.1.2 Définition des satellites LEO	57
3.2.1.3 Rôle des satellites LEO.....	57
3.2.1.4 L'IRS comme solution	58
3.2.1.5 Modélisation du système.....	59
3.2.2 Scénario 2 : communication dans les systèmes mmWave	61
3.2.2.1 Contexte et défis.....	61
3.2.2.2 IRS comme solution	61
3.2.2.3 Modèle de système	62
3.2.3 Scénario 3 : la sécurité physique des communications	63
3.2.3.1 Contexte et défis.....	63

3.2.3.2 IRS comme solution	64
3.2.3.3 Modèle de système	64
3.3 L'optimisation d'utilisation d'IRS	68
3.3.1 Dans les communications mmWave et THz.....	68
3.3.2 Dans les systèmes satellitaires.....	70
3.3.3 Dans les systèmes de sécurité	71
3.4 Critères d'équité dans l'allocation des ressources.....	71
3.5 Le scénario adopté dans la partie pratique.....	73
3.5.1 Définition d'un système sub-6GHz assistée par IRS	73
3.5.2 Cas Mono-Utilisateur :	73
3.5.3 Cas Multi-Utilisateurs	76
3.6 Perspective et amélioration future	79
3.6.1 Dans les réseaux future 6G	79
3.6.2 Intégration de deep learning avec IRS	80
3.7 Conclusion	81

CHAPITRE 4 : Résultats et simulations

4.1 Introduction de la partie pratique.....	83
4.2 Scénario 1 : Mono-Utilisateur	83
4.2.1 Paramètres de simulation	83
4.2.2 Résultats et interprétations	84
4.3 Scénario 2 : Multi-Utilisateurs	94
4.3.1 Paramètres de Simulation	94
4.3.2 Résultats et interprétation	95
4.4 Comparaison et synthèse des simulations	99
4.5 Conclusion	100
Conclusion générale	102

Liste des figures

Figure 1.1 : évolution des réseaux mobiles.....	20
Figure 1.2 : Communication satellitaire	24
Figure 1.3 : exemple de modulation ASK.....	25
Figure 1.4 : modulation FSK	26
Figure 1.5 : modulation PSK « BPSK »	27
Figure 1.6 : modulation 8-QAM et leur diagramme de constellation	27
Figure 1.7 : Accès multiple par répartition par temp	28
Figure 1.8 : Accès multiple par répartition par fréquence.....	29
Figure 1.9 : Accès multiple par répartition par code.....	29
Figure 1.10 : illustration massive MIMO	31
Figure 1.11 : classification de beamforming	32
Figure 1.12 : schéma d'un IRS	33
Figure 2.1 : système de communication assistée par IRS	37
Figure 2.2 : Changements de paradigme potentiels des conceptions des réseaux sans fils avec IRS	38
Figure 2.3 : principe de fonctionnement d'un IRS	39
Figure 2.4 : exemple d'un IRS.....	40
Figure 2.5 : Différence entre un réflecteur classique (a) et une surface réfléchissante intelligente « IRS » (b).....	41
Figure 2.6 Architecture d'IRS	42
Figure 2.7 : exemple d'un élément réfléchissant accordable basé sur la diode PIN.....	41
Figure 2.8 : orientation des signaux reçu par modification des phases des ondes par l'IRS ...	47
Figure 2.9 (A) : Interférence destructive et constructive d'une IRS	49
Figure 2.9 (B) : Principe des interférences constructives et destructives selon la phase des ondes	50
Figure 2.10 : les applications différentes d'IRS dans les réseaux sans fils.	53
Figure 3.1 : Communications par satellite LEO assistées par IRS avec des IRS côté satellite et côté réseau terrestre	58
Figure 3.2 : Une illustration du système de communication par satellite LEO avec des IRS coopératifs double-face (vue 3D).....	59
Figure 3.3 : Une illustration de la propagation des ondes et des angles d'arrivée/départ (AoA/AoD) entre les côtés réseau terrestre et satellite (vue 2D).	60

Figure 3.4 : Système MIMO massif en mm-Wave assisté par IRS.....	62
Figure 3.5 : Illustration d'un scénario de communication sécurisée assistée par IRS.....	65
Figure 3.6 : Environnement radio intelligent et reconfigurable avec des IRS massifs et des réflexions de signal multi-hop « multi-sauts ».....	70
Figure 4.1 : Topologie 3D du système.....	85
Figure 4.2 : comparaison des performances entre lien direct et avec obstacle	86
Figure 4.3 : comparaison de variation de SNR et Capacité en fonction de la distance entre BS et utilisateur pour LOS avec obstacle vs lien avec IRS	87
Figure 4.4 : comparaison de variation de SNR et Capacité en fonction de distance entre IRS et l'utilisateur pour IRS Aléatoire et Optimisé	88
Figure 4.5 : comparaison ente IRS optimisé et IRS aléatoire du SNR en fonction de nombre d'éléments IRS	89
Figure 4.6 : Impact du Nombre d'Éléments IRS sur l'Efficacité Énergétique : IRS Optimisé vs. Aléatoire	90
Figure 4.7 : Comparaison de l'efficacité énergétique vs distance « moyenne ergodique »	91
Figure 4.8 : Comparaison de la puissance de transmission requise : direct vs avec IRS.....	92
Figure 4.10 : Topologie du 2 ^{ème} partie.....	95
Figure 4.11 : Comparaison des performances des scénarios de communication Direct, IRS seul et Hybride	96
Figure 4.12 : Comparaison des SNR et capacité avant et après l'utilisation du IRS....	Erreur !
Signet non défini.	
Figure 4.13 : Comparaison de l'impact de nombre d'éléments d'IRS sur le Sum-Rate pour les 3 cas (direct, IRS seul, hybride).....	98

Liste des tableaux

Tableau 1. 1 Comparaison entre les différentes générations des réseaux mobiles	21
Tableau 1. 2 : Les normes et le débit théorique de Wi-Fi	22
Tableau 2. 1 : Comparaison entre IRS et d'autre relais.....	41
Tableau 2. 2 : comparaison des principales architectures d'IRS	46
Tableau 3. 1 : Comparaison des métriques d'équité : Indice de Jain vs. Alpha-Fairness dans les réseaux IRS-assistés.....	73
Tableau 4. 1 : les paramètres de simulation de partie I.....	84
Tableau 4. 2 : les paramètres de simulation partie II.....	94
Tableau 4. 3 : comparaison des résultats	99

Introduction générale

Le monde connaît un développement technologique impressionnant, marqué par des avancées rapides dans divers domaines. Parmi ces évolutions, la communication sans fil occupe une place centrale, car elle constitue l'un des piliers majeurs de cette transformation numérique globale. Au fil des générations, les systèmes de communication sans fil ont connu une évolution remarquable, passant de systèmes simples à des technologies modernes et intelligentes, comme c'est le cas avec l'avènement de la 5G et les recherches actuelles autour de la 6G.

Cependant, malgré tous les progrès réalisés, les systèmes de communication sans fil continuent de rencontrer plusieurs difficultés et défis majeurs qui limitent leur performance optimale. Parmi ces défis figurent la difficulté à assurer une couverture réseau complète, la présence d'interférences, ou les signaux transmis sont atténués par l'évanouissement du la propagation par trajets multiples et par l'ombrage dû aux grands obstacles entre l'émetteur et le récepteur, ce qui représente un défi fondamental pour une communication fiable. C'est ici qu'est apparue l'idée des surfaces réfléchissantes intelligentes comme solution potentielle à ces problèmes, Ces surfaces contiennent des particules électroniques contrôlables, qui permettent de réfléchir, rediriger, ou même concentrer les signaux reçus incidents vers des directions spécifiques de manière intelligente, Elles peuvent être installées sur des murs, des façades d'immeubles, ou d'autres structures pour améliorer la couverture, et minimiser les pertes de signal.

Ces surfaces trouvent leur utilité dans plusieurs scénarios pratiques, et c'est ça le sujet qui sera discuté dans ce mémoire. Nous intéresserons aux principes de fonctionnement des surfaces réfléchissantes intelligentes, à leurs avantages, leurs limitations, ainsi qu'aux différents scénarios dans lesquels elles peuvent être utilisées pour améliorer les performances des réseaux de communication sans fil.

Notre mémoire est organisé en quatre chapitres, on introduit dans le premier chapitre les fondements théoriques des communications sans fils, le deuxième chapitre en étudie les surfaces réfléchissantes intelligentes « IRS », le troisième chapitre en traite les scénarios de communications sans fil assistées par IRS et le quatrième chapitre est réservé pour la partie pratique de projet et l'explication de scénario choisi.

CHAPITRE 1 : Généralité sur les communications sans fils

1.1 Introduction

La communication sans fil a complètement changé notre manière de communiquer, de travailler et d'interagir avec le monde, que ce soit au téléphone, à l'ère des premiers systèmes radio, ou encore grâce aux propriétés des réseaux cellulaires. Les technologies sans fil sont omniprésentes et progressent rapidement dans l'espace alors même qu'elles rendent interopérables des réseaux de types très différents. Ce chapitre a pour ambition, dès lors, de fournir le cadre théorique de compréhension de tout le mémoire, en n'hésitant pas à aborder d'entrée de jeu l'historique des technologies sans fil, les principes de leur fonctionnement, les problèmes liés à la propagation des signaux et, enfin, les technologies du futur que sont les surfaces réfléchissantes intelligentes IRS.

1.2 Historique et évolution des communications sans fil

1.2.1 Origines des communications sans fils

La communication sans fil commence à faire ses premiers progrès dans les dernières années du XIXe siècle soit, en tout état de cause, à l'époque où apparaissent les recherches sur les ondes électromagnétiques.

En 1864, James Clerk Maxwell dresse les équations régissant les champs électrique et magnétique et surtout, initie une véritable base théorique en matière de transmission sans fil. En 1895, l'inventeur italien Guglielmo Marconi parvient à la première transmission, dans l'air, de signaux radio, acte qui inaugure la communication sans fil moderne. En effet, Marconi prouve qu'il est désormais possible de transmettre sur de longues distances, révolutionnant autant les communications maritimes que terrestres. Depuis cet événement fondamental, un certain nombre de protocoles comme la modulation d'amplitude (amplitude modulation, AM) ou la modulation de fréquence (frequency modulation, FM) apparaissent progressivement et viennent enrichir la portée de cette méthode de communication sans fil, ainsi que la qualité et la clarté des sons émis.

En cette fin des années 1970, alors que se déploient les premières technologies numériques et sont progressivement installés des systèmes aujourd'hui bien connus, comme le Wi-Fi ou les réseaux cellulaires, la communication sans fil sort de son statut d'outil de niche pour devenir un outil généralisé et banal, des terminaux d'une grande variété (smartphones, objets connectés) modifiant nos manières d'utiliser la communication, comme d'accéder à l'information, ainsi que de les partager [1] [2] [4].

1.2.2 L'évolution des réseaux mobiles (1G à 5G)

Les réseaux mobiles ont connu plusieurs générations de développement, chacune apportant des améliorations significatives :

➤ **1G (années 1980) :**

La première génération de réseaux mobiles ou « 1G » a commencé dans les années 1980. Il était basé sur des techniques de transmission radio analogique et de commutation de circuits. Le principal service mobile fourni par 1G était les communications vocales à commutation de circuits [5], dans des réseaux analogiques sommaires, très peu performants par rapport à nos normes contemporaines, laissant appel aux utilisateurs sans service de données sur Internet et connexion de tous types d'appareils dans ces réseaux [6].

Une des normes 1G était le téléphone mobile nordique (NMT) des pays nordiques, en Suisse, aux Pays-Bas, à l'Est de l'Europe comme en Russie. L'Amérique du Nord et l'Australie utilisaient le système de téléphonie mobile avancé (AMPS) [1]. TACS (Total Access Communications System) au Royaume-Uni, C-450 en République fédérale d'Allemagne, au Portugal et en Afrique du Sud, Radiocom 2000 en France, TMA en Espagne, RTMI en... En Japon plusieurs systèmes apparurent : TZ-801, TZ-802, TZ-803 développés par NTT [2], d'un côté, un système concurrent de Daini Denden Planning, Inc. (DDI) abordant la norme JTACS (Japan Total Access Communication System).

➤ **2G (années 1990) :**

La 2G a été introduite au début des années 1990 et a considérablement amélioré la 1G. Il introduit la communication vocale numérique, ce qui a amélioré la qualité des appels et permis certains services de données de base comme l'envoi de messages texte (SMS). Cependant l'accès à Internet restait limité, la 2G s'appuie sur la norme GSM (Global System for Mobile communication) [6].

Le réseau 2G est une infrastructure complète qui facilite la communication de la voix et des données. Il fonctionne sur la base de différentes technologies, dont le GSM et le CDMA (Code Division Multiple Access). Ces technologies jettent les bases d'un fonctionnement harmonieux des systèmes de communication mobile [9].

Les réseaux GSM et D-AMPS d'origine n'étaient pas vraiment équipés pour les services de données. **GPRS** (General Packet Radio Service) et **EDGE** (Enhanced Data for Global Evolution), respectivement appelés **2.5G** et **2.75G**, ont été introduits dans les réseaux GSM pour fournir des services de données mobiles [8].

Les technologies 2G englobent un éventail de progrès qui contribuent à l'efficacité du réseau. De l'amélioration de la qualité de la voix à l'introduction des SMS (Short Message Service), les technologies 2G marquent une évolution significative dans la manière dont nous communiquons sans fil [9].

➤ **3G (années 2000) :**

La 3G est apparue au début des années 2000 et a apporté des améliorations substantielles aux communications mobiles. Cela permis des taux de transfert de données plus rapides, rendant possible l'accès à Internet sur les appareils mobiles. Avec la 3G, les utilisateurs pouvaient naviguer sur le web, envoyer des emails et utiliser des applications plus avancées basées sur les données [6].

La 3G offre une vitesse plusieurs fois supérieure à celle de ses prédécesseurs, y compris l'éphémère réseau 2.5G qui offrait également une connectivité internet. Les vitesses de la 3G sont suffisamment élevées pour permettre le streaming audio et vidéo. Elles se sont avérées parfaitement adaptées aux outils de collaboration à distance, tels que les communications unifiées, tout en offrant une clarté vocale claire et réactive sur toute la ligne. Le réseau 3G a plus de stabilité, moins de consommation d'énergie La plupart des réseaux 3G fonctionnent dans les bandes de fréquences 800 MHz, 850 MHz, 900 MHz, 1 700 MHz, 1 900 MHz et 2 100 MHz [10].

La 3G a connu trois améliorations successives avec la 3G+ (aussi appelée HSPA), le H+ (HSPA+) et le H+ Dual Carrier (DC-HSPA+). Il s'agit d'évolutions de l'UMTS visant à bénéficier de meilleurs débits : 3,6Mbits/s pour la 3G+, 5Mbits/s pour le H+ et 10Mbits/s pour le H+ Dual Carrier. Ces avancées ont permis d'aller plus loin dans les usages internet, avec la possibilité de visionner des vidéos instantanément, sans patienter le temps du chargement [12].

➤ **4G (à partir de 2010) :**

La 4G, déployée à la fin des années 2000, représentait un bond majeur dans la technologie mobile. Cela a permis des vitesses de données encore plus rapides et une latence réduite, rendant le streaming de vidéos en haute définition, les jeux en ligne et les vidéoconférences plus fluides et plus fiables [6].

L'une des principales différences entre les modèles 4G et 3G est la vitesse à laquelle ils peuvent télécharger des fichiers sur Internet. Un téléphone 3G typique peut se connecter à l'internet à une vitesse maximale de 21 Mbps, alors qu'un téléphone 4G peut le faire à des vitesses maximales théoriques de 300 Mbps. De plus, la 4G est entièrement basée sur IP, ce qui signifie qu'elle utilise des protocoles internet même pour les données vocales. Ses débits de données plus élevés pourraient rendre les smartphones et les dispositifs M2M beaucoup plus comparables aux PC, en leur donnant de meilleures capacités [11], et comme le GSM et l'UMTS, la norme LTE a connu des évolutions qui ont abouti au développement de la 4G+. Celle-ci offre des débits pouvant atteindre 1Gbit/s à l'arrêt et 100Mbits/s en mouvement [12].

➤ **5G (actuelle) :**

La 5G est la 5e génération de réseau mobile. Il s'agit d'une nouvelle norme sans fil mondiale après les réseaux 1G, 2G, 3G et 4G. La 5G permet un nouveau type de réseau qui connecte virtuellement tout le monde et toute ensemble, y compris les machines, les objets et les appareils. La technologie sans fil 5G est censée offrir à un plus grand nombre d'utilisateurs des débits de pointe supérieurs de plusieurs Gbps, une latence ultra-faible, une plus grande fiabilité, une capacité de réseau massive, une disponibilité accrue et une expérience utilisateur plus uniforme. Des performances plus élevées et une efficacité améliorée permettent de nouvelles expériences utilisateur et connectent de nouvelles industries [13].

La 5G est une interface radio unifiée et plus performante. Elle a été conçue avec une capacité étendue pour permettre aux utilisateurs de vivre des expériences de nouvelle génération, d'adopter de nouveaux modèles de déploiement et de fournir de nouveaux services. Grâce à des vitesses élevées, une fiabilité supérieure et une latence négligeable, la 5G va étendre l'écosystème mobile à de nouveaux domaines. La 5G aura un impact sur tous les secteurs d'activité, faisant des transports plus sûrs, des soins de santé à distance, de l'agriculture de

précision, de la logistique numérisée, etc. une réalité [13]. On dit que la 5G fonctionne à une bande passante supérieure à 1Gbps avec une latence inférieure à 10 secondes et une vitesse moyenne de 200mbps. La 5G est utilisée à travers trois principaux types de services connectés, notamment le haut débit mobile amélioré, les communications critiques et l'IoT. La 5G fonctionne sur trois bandes de spectre différentes, le spectre à bande basse, le spectre à bande moyenne et le spectre à bande haute [13]. Ses débits théoriques pourraient atteindre 20 Gbit/s sur les bandes de fréquence les plus performances (bande 24-27 Ghz, bien que celle-ci ne soit pas employée par les réseaux mobiles). On compte environ 31 000 antennes 5G mises en service en France à l'heure actuelle (avril 2025) [12]. La figure 1.1 et le tableau 1.1 représente l'évolution et une comparaison des générations de réseaux mobiles



Figure 1.1 : évolution des réseaux mobiles [7].

Tableau1. 1 Comparaison entre les différentes générations des réseaux mobiles

Génération	Vitesse de réseaux	Caractéristiques principales
1G (1980's)	2.4 Kbit/s	Appels vocaux analogiques de base
2G (1990's)	14.4 à 217.6 Kbit/s	Appels vocaux numériques et SMS
3G (2000's)	384 Kbit/s à 336 Mbit/s	Accès à l'internet mobile et aux smartphones
4G (2010's)	100 Mbit/s à 1 Gbit/s	Vitesse de données rapides pour le streaming et la navigation & VoLTE
5G (2020's)	2 Gbit/s à 20 Gbit/s	Connectivité avancée avec faible latence, pris en charge de l'IOT

1.2.3 les principales technologies de communications sans fils

Au cours des années, les moyens utilisés en télécommunication se sont multipliés et diversifiés pour répondre à différents besoins des gens, allant de la communication de personne à personne en courte portée à la communication de façon massive, sur plusieurs milliers de kilomètres. Parmi les moyens les plus utilisés aujourd'hui se trouvent le Wi-Fi, le Bluetooth, les réseaux cellulaires (4G/5G), le NFC, le Zigbee, ainsi que la communication par satellite.

➤ Wi-Fi

Le Wi-Fi est une technologie qui permet à des appareils électroniques (ordinateurs, téléphones, tablettes, objets connectés, etc) d'obtenir un accès sans fil au réseau local, de même qu'à Internet par le biais d'une passerelle sur le réseau. Il s'agit en réalité de la version sans-fil du protocole Ethernet. Un appareil connecté par Wi-Fi utilise donc les protocoles de la suite TCP/IP pour communiquer avec les autres appareils [14].

La technologie Wi-Fi est spécifiée par la série des normes IEEE 802.11. La norme actuelle IEEE 802.11ax dite également Wi-Fi 6(E) promet des vitesses de transmission allant jusqu'à 11 Gbit/s alors que lors du lancement du Wi-Fi en 1999, le débit maximal ne pouvait guère dépasser 2 Mbit/s [15].

Tableau 1. 2 : Les normes et le débit théorique de Wi-Fi [14]

Standard	Nom familier	Année d'introduction	Débit théorique maximal
IEEE 802.11be	Wi-Fi 7	2024	46 Gigabits/s
IEEE 802.11ax	Wi-Fi 6	2019	9,6 Gigabits/s
IEEE 802.11ac	Wi-Fi 5	2013	3,46 Gigabits/s
IEEE 802.11n	Wi-Fi 4	2009	600 Mégabits/s
IEEE 802.11g	Wi-Fi 3(<i>nommé rétroactivement</i>)	2003	54 Mégabits/s
IEEE 802.11a	Wi-Fi 2(<i>nommé rétroactivement</i>)	1999	54 Mégabits/s
IEEE 802.11b	Wi-Fi 1(<i>nommé rétroactivement</i>)	1999	11 Mégabits/s

Les protocoles de sécurité WiFi empêchent l'accès non autorisé. La sécurité sans fil la plus courante est le WEP (Wired Equivalent Privacy), ratifié en 1997 et déclaré obsolète en 2004 en raison de ses limites [16]. Remplacé par le WPA (Wi-Fi Protected Access) et WPA2 (Wi-Fi Protected Access II) à partir de 2003, un WPA3 est aujourd'hui en cours pour un cryptage encore plus fort et une solution contre les mots de passe trop faibles [14].

➤ Bluetooth

Contrairement au Wi-Fi, le Bluetooth ne permet pas la connexion d'un point au plusieurs dispositifs. Il est le plus souvent utilisé pour échanger des données entre deux dispositifs localisés à une distance très courte, après qu'une connexion a été établie entre eux (souvent nommée par son nom anglais, « pairing »).

Le Bluetooth opère sur la bande de fréquence 2,4 GHz, bande que le Wi-Fi utilise également. Il est donc possible que ces deux technologies entrent en conflit, ce qui peut être cause d'une diminution des débits fournis. Il existe plusieurs versions du standard Bluetooth, la plus récente étant la version 6, dont les caractéristiques techniques ont été publiées en septembre 2024. Cette version permet d'atteindre des débits de transmission pouvant atteindre 3 Mégabits/s, suffisant pour acheminer des flux audios, mais pour des usages plus lourds (ex : transmission vidéo), le Wi-Fi reste privilégié [14].

Il y a 2 grands modes de fonctionnement du Bluetooth, très différents l'un de l'autre, tant dans leur approche que dans leur façon de fonctionner :

- Le Bluetooth Classic, autrement nommé Bluetooth BR/EDR,
- Le Bluetooth Low Energy (BLE), ou Bluetooth Smart, intégré à partir de la version 4.0 du Bluetooth [17].

➤ **Zigbee**

Zigbee est une technologie sans fil développée en tant que norme ouverte de connectivité du marché mondial pour répondre aux besoins uniques des réseaux de données sans fil à faible coût et à faible consommation d'énergie (IoT). Elle est conçue pour prendre en charge les communications sans fil, la surveillance et le contrôle des appareils fonctionnant sur batterie et des réseaux de capteurs. Zigbee fonctionne selon la spécification IEEE 802.15.4 et il est largement utilisé dans la domotique, la collecte de données médicales et les systèmes de contrôle industriel.

La spécification est un protocole basé sur des paquets destiné aux appareils et produits à faible coût fonctionnant sur batterie. Le protocole Zigbee IoT permet aux appareils de communiquer des données de manière transparente dans une variété de topologies de réseau en utilisant une puissance extrêmement limitée. Grâce à Zigbee, les appareils de différents fabricants peuvent communiquer de manière compatible [18].

➤ **Communication Par Satellites**

La communication par satellite est un système qui utilise des satellites artificiels en orbite pour transmettre des signaux de télécommunication autour du globe, facilitant ainsi la diffusion d'informations à longue distance. Ces satellites jouent un rôle crucial dans les services de télévision, d'internet et de communications d'urgence, offrant une connectivité même dans les régions les plus reculées. Grâce à leur capacité à couvrir de vastes zones géographiques, ces systèmes de communication améliorent l'efficacité et la fiabilité de la transmission des données au niveau mondial [19].

Un système de communication par satellite est composé de plusieurs éléments clés qui assurent son bon fonctionnement. Ces systèmes comprennent principalement :

- **Satellite** : L'élément central qui relaye les signaux entre les stations terrestres.
- **Stations terrestres** : Installations au sol qui envoient et reçoivent les signaux du satellite.
- **Liaisons montante et descendante** : La communication se fait via une liaison montante (de la Terre vers le satellite) et une liaison descendante (du satellite vers la Terre).

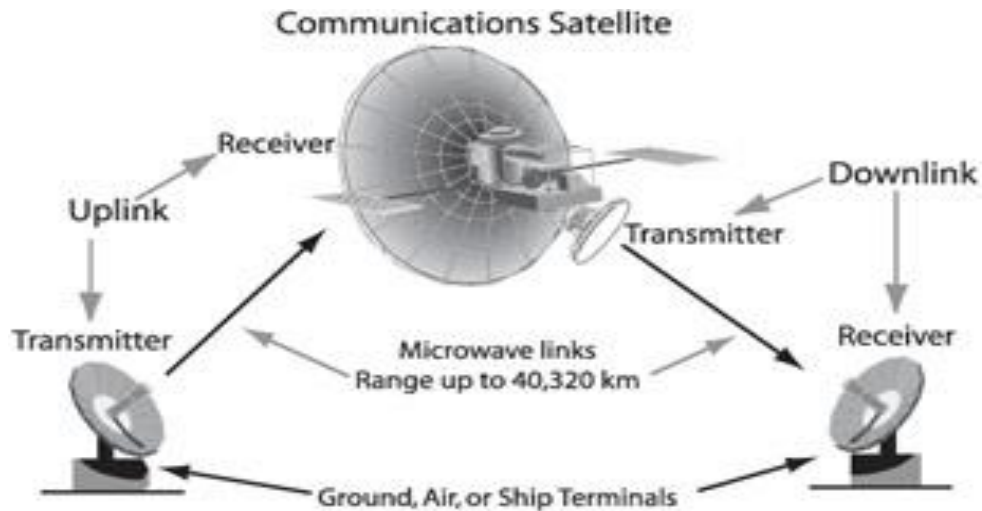


Figure 1.2 : Communication satellitaire

1.3 Principes fondamentaux des communications sans fils

Les communications sans fil reposent sur l'utilisation d'ondes électromagnétiques pour transmettre des informations entre appareils sans nécessiter de câbles physiques. Ce type de communication utilise principalement des radiofréquences, Les principes fondamentaux incluent la modulation des signaux, l'utilisation d'antennes et de récepteurs, ainsi que la gestion des interférences pour assurer une transmission efficace.

1.3.1 transmission des signaux :

La transmission des signaux repose sur deux aspects fondamentaux : le traitement du signal à émettre et les caractéristiques du canal traversé.

Du côté de la transmission, le signal émis soumise à des opérations de modulation (comme la QAM ou PSK) qui adaptent le signal numérique aux contraintes de la transmission radio. Ces techniques permettent de maximiser le débit. Ces méthodes permettant d'augmenter le débit et assuré la résistance aux interférences. Et du côté du le canal qui représente le milieu. Durant ce parcours, le signal est soumis à plusieurs phénomènes qui affectent sa forme comme

l'atténuation et les interférences qui affecte directement sur la qualité et la performance de la transmission sans fil.

1.3.2 Modulation et codage :

1.3.2.1 La modulation :

Les techniques de modulations sont utilisées pour adapter le signal à la bande transposée. Il existe plusieurs manières dont une porteuse analogique peut être modulée pour représenter des données numériques la modulation par saut d'amplitude, la modulation par saut de fréquence et la modulation par saut de phase et la modulation en QAM. Il existe plusieurs types de modulation, notamment :

1. Modulation par Déplacement d'Amplitude (ASK) :

Est une technique de modulation numérique utilisée pour transmettre des données en modifiant l'amplitude d'une onde porteuse. Cette méthode est largement utilisée dans les systèmes de communication numérique, notamment dans les transmissions radio et les réseaux sans fil.

Le principe de cette modulation est de représenter l'information binaire par deux niveaux d'amplitude distincts de l'onde porteuse. Typiquement, un niveau d'amplitude élevé représente un bit '1', tandis qu'un niveau d'amplitude bas ou nul représente un bit '0'.

L'expression de signal modulé donner par :

$$m(t) = \sum_k a_k(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1.1)$$

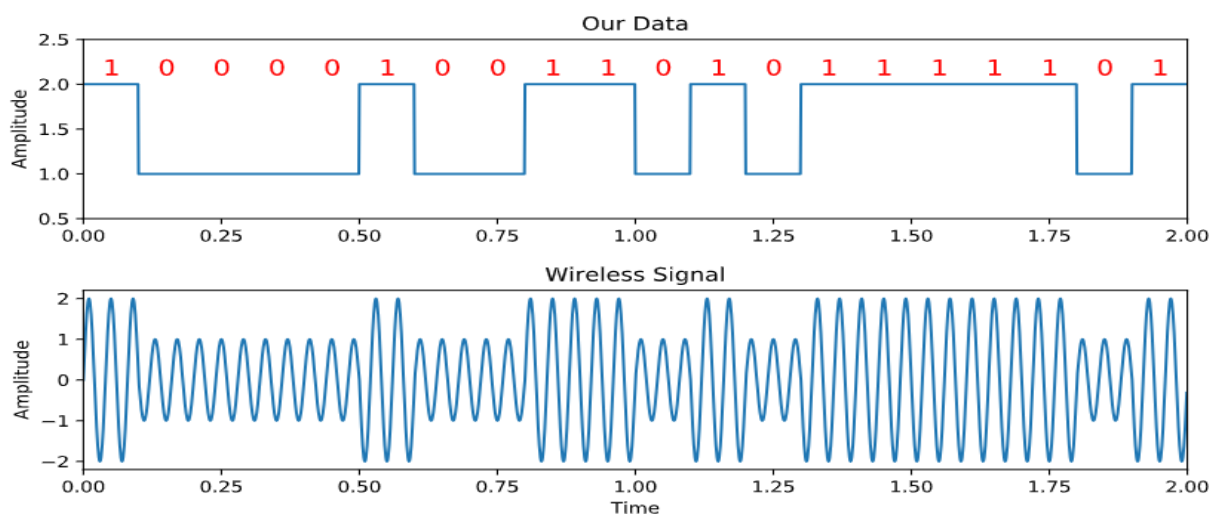


Figure 1.3 : exemple de modulation ASK [20].

2. Modulation par Déplacement de Fréquence (FSK) :

Est une technique de modulation en fréquence utilisée en télécommunications pour transmettre des données numériques en variant la fréquence d'une onde porteuse. Cette méthode emploie deux fréquences distinctes pour représenter les états binaires 0 et 1.

Le FSK est couramment utilisé dans les modems, les systèmes de communication radio et les technologies RFID.

L'expression de signal modulé donner par :

$$m(t) = \cos(\omega_0 t + \varphi(t)) = \cos(2\pi f_0 t + \varphi(t)) \quad (1.2)$$

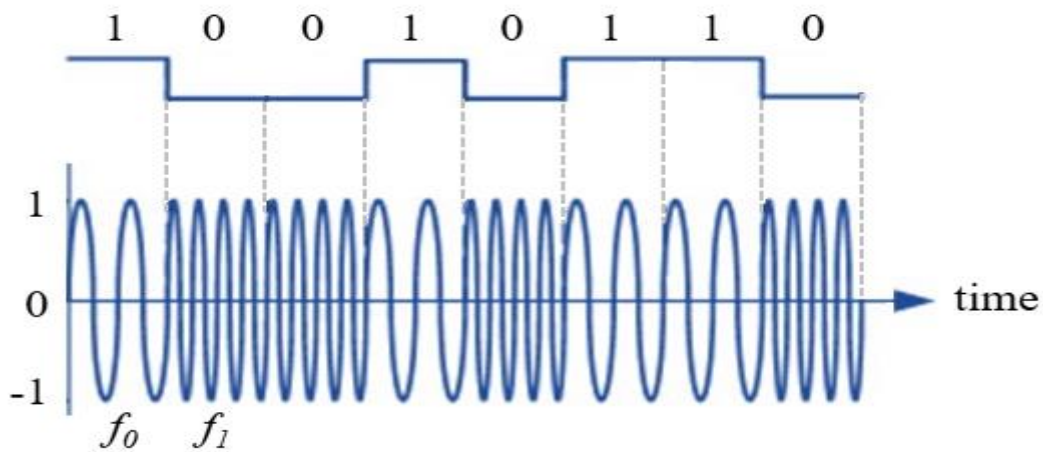


Figure 1.4 : modulation FSK [20].

3. Modulation par Déplacement de Phase (PSK) :

La modulation par déplacement de phase (PSK) modifie la phase du signal porteur pour transmettre des données. Dans la modulation de phase c'est la phase de l'onde porteuse qui varie en fonction du signal binaire transmis.

Le principe fondamental du PSK consiste à attribuer différentes phases de l'onde porteuse à des séquences binaires. Dans le cas le plus simple, appelé Binary Phase Shift Keying (BPSK), deux phases (généralement séparées de 180°) sont utilisées pour représenter les bits '0' et '1'.

L'expression de signal modulé donner par :

$$m(t) = \sum_k g(T - kT) \cos(\omega_0 t + \varphi_k) \quad (1.3)$$

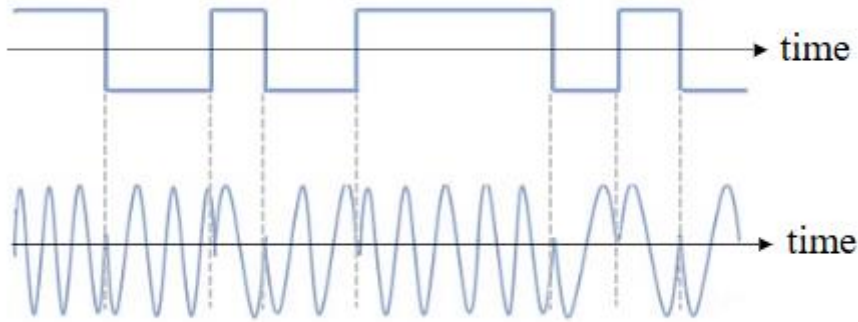


Figure 1.5 : modulation PSK « BPSK » [20].

4. Modulation d'Amplitude en Quadrature (QAM) :

La modulation QAM combine les techniques ASK et PSK, Il peut représenter des informations numériques en modifiant simultanément la phase et l'amplitude du signal, la modulation QAM est basée sur la superposition de signaux orthogonaux. Il divise les données numériques en groupes de bits et mappe chaque groupe de bits à un point de signal spécifique. Ces points de signal se trouvent sur un plan complexe, où l'axe réel représente l'amplitude du signal et l'axe imaginaire représente la phase du signal.

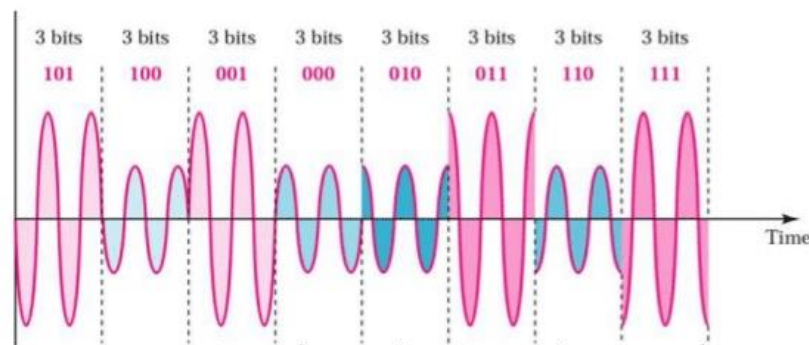
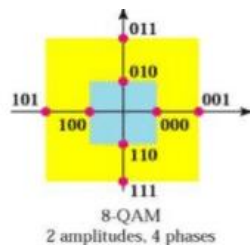


Figure 1.6 : modulation 8-QAM et leur diagramme de constellation [20].

Le signal modulé donner par l'expression suivant :

$$m(t) = \sum_k a_k g(T - kT) \cos(\omega_0 t + \varphi_k) \tag{1.4}$$

1.3.2.2 Codage de canal :

Le codage de canal est une technique essentielle en télécommunications visant à protéger les données contre les erreurs lors de leur transmission. En ajoutant des redondances intelligentes, il permet de détecter et de corriger les erreurs causées par le bruit et les interférences dans le canal de communication. Il existe plusieurs types de codage de canal, tels que les codes de bloc, les codes convolutifs et les codes LDPC. Le codage de canal est important pour garantir une qualité de service élevée tout en optimisant l'efficacité spectrale et énergétique des transmissions [21].

1.3.3 Techniques de multiplexage

Le multiplexage est une technologie essentielle permettant la transmission simultanée de multiples signaux sur un seul support physique, optimisant ainsi l'utilisation de ressources tout en réduisant les coûts.

1.3.3.1 TDMA (Time Division Multiplexing) :

Le multiplexage en temps consiste à répartir la transmission d'une porteuse sur des intervalles de temps distincts, La porteuse est émise sur des intervalles de temps, appelés time slots, de durée T_s , chacune de ces durées correspondant à un temps pendant lequel un utilisateur peut transmettre ses données [22].

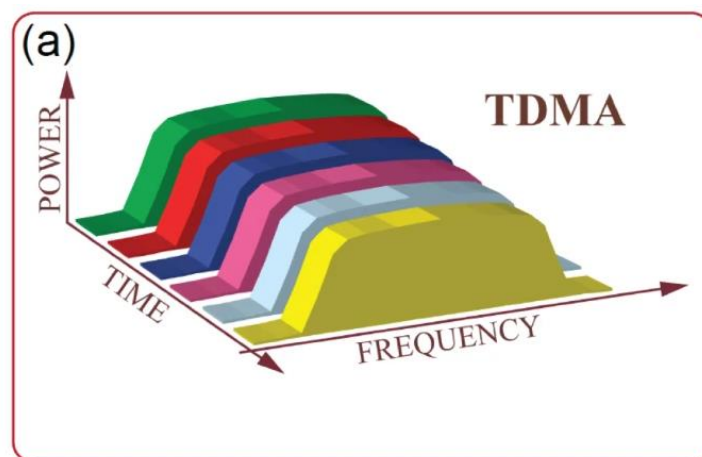


Figure 1.7 : Accès multiple par répartition par temp [23].

1.3.3.2 FDMA (Frequency Division Multiplexing) :

Est une technique de multiplexage par répartition de fréquence, Le multiplexage fréquentiel consiste à partager la bande de fréquence disponible en un certain nombre de canaux ou sous-

bandes plus étroites et à affecter en permanence chacun de ces canaux à un utilisateur ou à un usage exclusif [22].

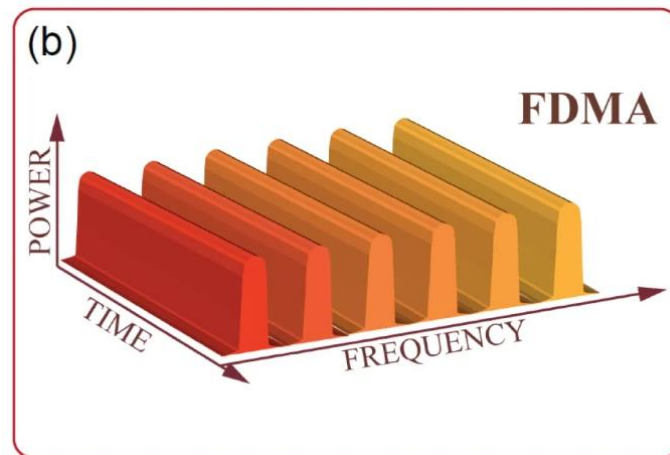


Figure 1.8 : Accès multiple par répartition par fréquence [23].

1.3.3.3 CDMA (Code Division Multiple Access) :

Est une technique de multiplexage plus récente que le TDMA et le FDMA. Dans cette technique d'accès multiple, les utilisateurs partagent le même espace fréquentiel et transmettent sur les mêmes intervalles temporels, chaque utilisateur correspond une clé (ou code) à l'aide de laquelle son message est codé avant d'être émis, qui lui permet de transmettre des informations en évitant d'interférer avec les messages provenant d'autres utilisateurs [22].

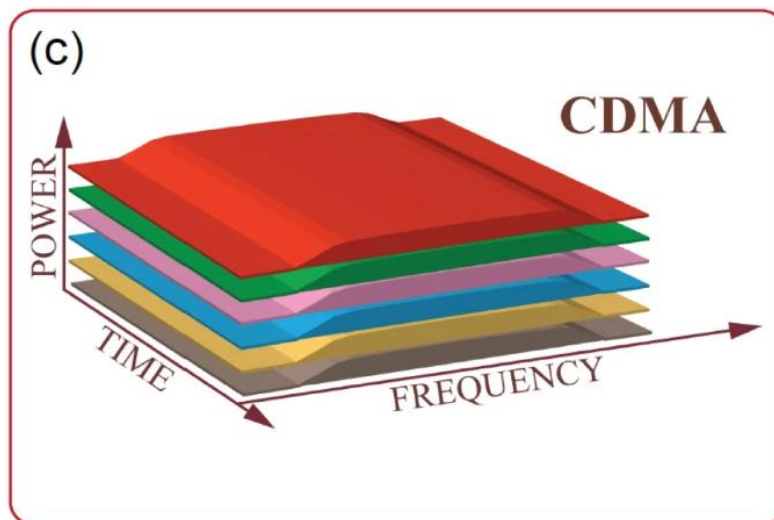


Figure 1.9 : Accès multiple par répartition par code [23].

1.4 Problèmes de propagation dans les réseaux sans fil

1.4.1 Zones mortes et pertes de signal

Les zones mortes ou bien les zones d'ombre sont des espaces dans lesquels le signal du réseau est trop faible pour que la connexion reste stable. La cause en est bien souvent la distance à laquelle on se trouve du point de connexion, ainsi que la présence des obstacles (murs, différents meubles, personnes...), mais également la nature des matériaux de construction (absorption et réflexion des ondes radio), qui peut nuire à la réception du signal. Les pertes de signal peuvent aussi survenir lors d'une congestion dans les réseaux saturés lorsque trop d'appareils essaient de se connecter, empêchant une connexion stable, d'où la nécessité de bien planifier le réseau en tenant compte de l'emplacement des points d'accès et de bien se servir d'appareils tels que des répéteurs ou des amplificateurs de signal.

1.4.2 Interférences intercellulaires

Les interférences intercellulaires, c'est un phénomène qui se produit quand plusieurs réseaux sans fil opèrent sur des fréquences similaires, ce qui cause des perturbations dans la transmission des données, dégrade le débit et augmente la latence. Dans les zones urbaines denses où coexistent de multiples réseaux Wi-Fi, ces interférences sont particulièrement fréquentes. Ces interférences peuvent provenir également d'autres appareils électroniques, tels que les micro-ondes ou les téléphones sans fil qui émettent sur des bandes de fréquence similaires.

1.4.3 Multipath et évanouissement

Le Multipath c'est un phénomène de propagation qui fait que les signaux atteignent le récepteur par deux chemins ou plus, ce qui est le cas dans les systèmes sans fil du monde réel. Tous les canaux sans fil réalistes comportent de nombreux "réflecteurs", étant donné que les signaux RF rebondissent. Tout objet situé entre ou près de l'émetteur (Tx) ou du récepteur (Rx) peut créer des chemins supplémentaires que le signal emprunte. Chaque chemin subit un déphasage (retard) et une atténuation (réduction d'amplitude) différents. Au niveau du récepteur, tous les chemins s'additionnent. Ils peuvent s'additionner de manière constructive, destructive ou un mélange des deux. Nous appelons ce concept de trajets multiples du signal « multi-trajets » [20][24]. L'évanouissement, quant à lui, se réfère à la perte temporaire de signal due à des changements dans l'environnement, comme le mouvement d'objets ou de personnes [20].

1.5 Technologies émergentes : vers des réseaux intelligents

1.5.1 Massive MIMO

Le massive MIMO est une technologie récente basée sur l'utilisation d'un très grand nombre d'antennes au niveau de la station de base. Cette configuration permet d'améliorer la qualité du signal et d'augmenter la capacité des connexions de données. Le principal avantage réside sur la possibilité de concentrer le signal émis uniquement vers les utilisateurs actifs à un instant donné. Cette technologie joue un rôle clé dans le développement des réseaux 5G, en offrant un débit de données élevées et une latence réduite. Ce passage à massive MIMO représente un pas en avant dans la fourniture d'une communication sans fil robuste et hautes performances [25].

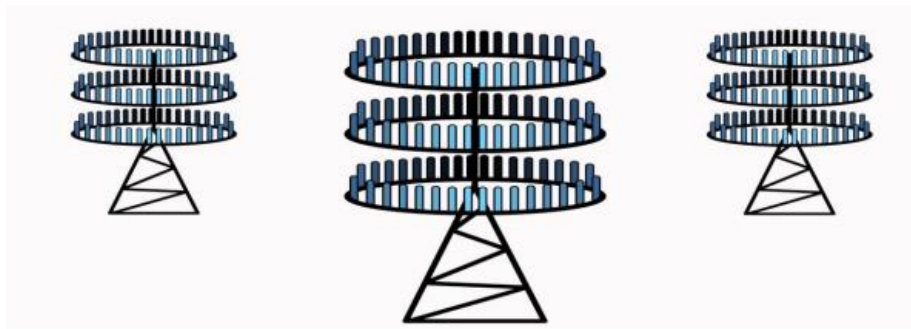


Figure 1.10 : illustration massive MIMO [25].

1.5.2 Formation de faisceaux (Beamforming)

Est une technique essentielle dans la massive mimo qui a profondément transformé la manière dont les signaux radio sont transmis et reçus. Cette technique consiste à ajuster la direction d'un faisceau d'ondes électromagnétiques pour optimiser la communication entre une station de base et un appareil mobile, ou entre plusieurs appareils. La formation de faisceau permet de concentrer l'énergie du signal dans une direction spécifique, améliorant ainsi la qualité de la transmission, augmentant les débits de données et réduisant les interférences.

Le beam-forming s'appuie principalement sur deux approches, le beamforming analogique, qui utilise des déphaseurs pour ajuster la phase du signal de manière matérielle, et le beamforming numérique, plus flexible, qui traite les signaux par algorithmes pour un ajustement dynamique. Cette dernière méthode, combinée au Massive MIMO, est au cœur des réseaux 5G et Wi-Fi 6, offrant une adaptation en temps réel aux mouvements des utilisateurs et aux conditions du canal. Son déploiement dans les réseaux modernes a permis de résoudre des

défis majeurs comme la couverture des zones densément peuplées ou la gestion efficace des ressources spectrales [27].

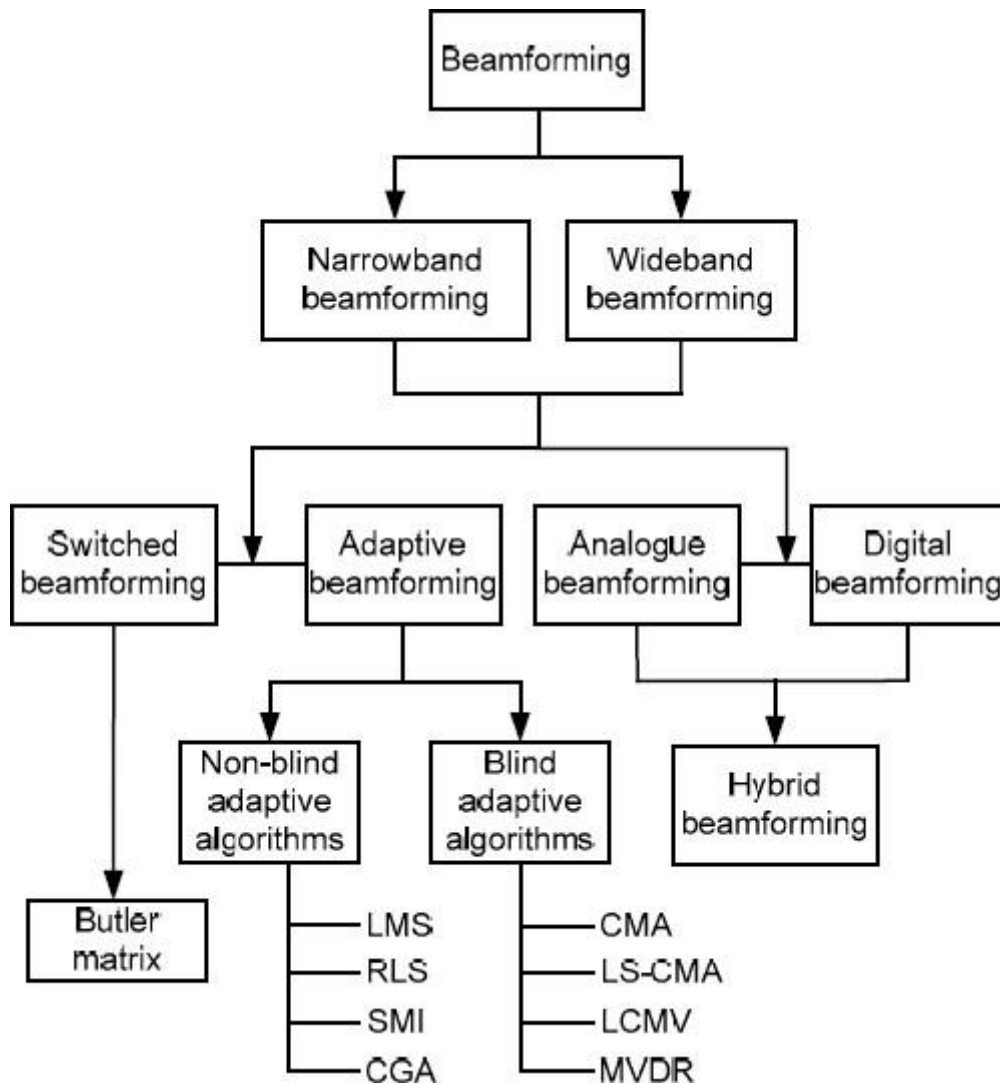


Figure 1.11 : classification de beamforming [26].

1.5.3 Surfaces Réfléchissantes Intelligentes (IRS)

Est une technologie moderne constituer comme une véritable solution pour améliorer les communications sans fils, l'IRS composé d'éléments passifs contrôlables peuvent ajuster la phase des signaux réfléchis pour rédiger le signal émis au utilisateurs concernés et réduisent les interférences. L'IRS est considéré comme une solution économique et facilement intégrable dans les réseaux existants. Les IRS sont en train de se développer comme un pont vers les réseaux sans fil intelligents, en particulier dans les architectures 5G et futures 6G. ils offrent aussi des nouvelles opportunités pour élaborer des scénarios de communication avancés.

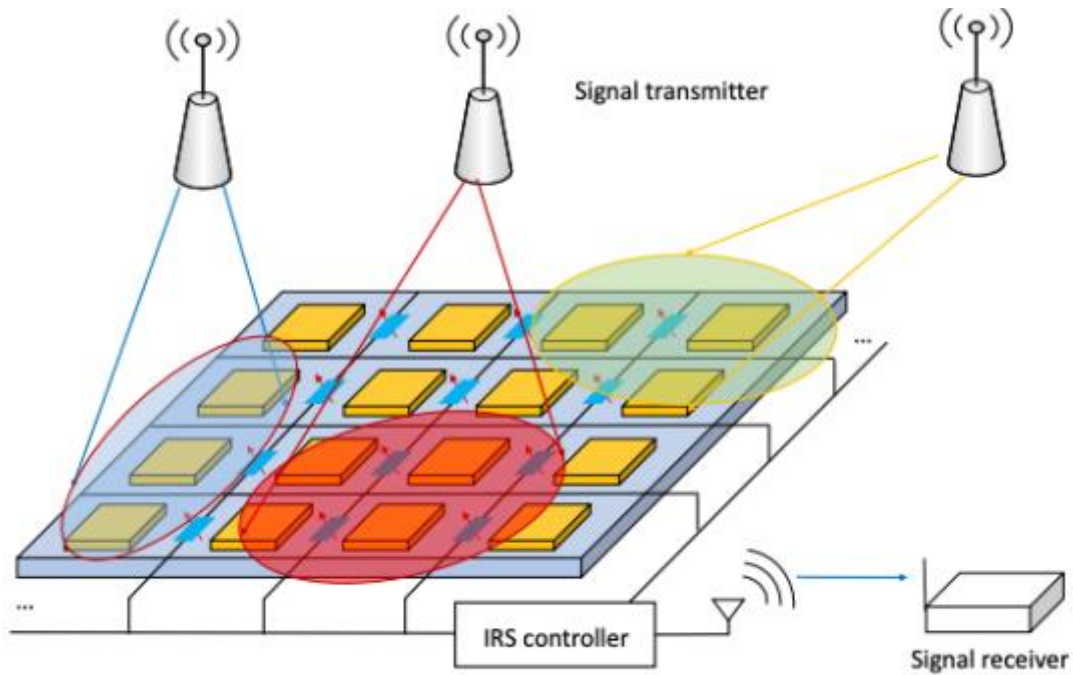


Figure 1.12 : schéma d'un IRS [36].

1.6 intégration de l'intelligence artificielle dans les communications sans fils

L'intelligence artificielle (IA) est de plus en plus utilisée dans divers secteurs, notamment les télécommunications et la gestion des réseaux mobiles. L'intégration de l'intelligence artificielle dans ce domaine est une réponse aux besoins de plus en plus complexes des utilisateurs et opérateurs de réseaux en raison de volume croissant des données rendent l'IA indispensable pour optimiser l'exploitation des réseaux mobiles modernes.

Les réseaux mobiles, notamment la 5G, 5G+ déployée dans le monde entier par les grands opérateurs télécoms et dans un futur proche la 6G. Font face à une complexité croissante en raison de la densification des antennes, de la gestion de la bande passante et de la diversité des services proposés. Pour répondre à ces défis. L'IA joue un rôle clé en automatisant de nombreux aspects de la gestion du réseau. Les algorithmes d'apprentissage automatique (machine learning) et d'analyse prédictive permettent de prédire les besoins en capacité réseau et d'adapter les ressources en conséquence, tout en réduisant les coûts et en améliorant la qualité de service (QoS).

Par exemple, l'IA peut analyser en temps réel les flux de données pour détecter des anomalies, comme des pannes de matériel ou des congestions, et proposer des solutions aux gestionnaires de réseau pour minimiser les interruptions de service. De plus, l'IA facilite

l'optimisation dynamique des ressources en ajustant la puissance de transmission ou la répartition des canaux en fonction des conditions du réseau et de la demande des utilisateurs, toujours en temps réel. Exit les anciens systèmes de gestion demandant des actions humaines sur des logiciels et matériels de gestion de réseaux télécom. Pouvant provoquer par inadvertance des pannes d'ampleur importante.

L'IA supplante l'humain pour exécuter des tâches en quelques nanosecondes, anticiper la montée en charge des réseaux et serveurs et les besoins des utilisateurs finaux sur leur mobile. L'IA libérer du temps aux ingénieurs supervisant les réseaux. Pour réfléchir à l'avenir et développer de nouvelles technologies dont nous parlerons plus tard [28].

1.7 Conclusion

Ce premier chapitre a permis de couvrir les fondements théoriques indispensables à la compréhension des systèmes de communication sans fil. Nous avons exploré leur évolution, leurs principes de fonctionnement, les défis liés à la propagation, et enfin introduit les innovations récentes. Ce cadre de compréhension est nécessaire avant d'aborder, dans le prochain chapitre, la théorie détaillée des surfaces réfléchissantes intelligentes (IRS), qui représentent une rupture prometteuse dans l'optimisation des réseaux sans fil du futur.

CHAPITRE 2 : Les surfaces réfléchissantes intelligentes « IRS »

2.1 Introduction

Dans cette ère numérique, le concept de connectivité joue un rôle crucial pour relier les zones urbaines et rurales en termes d'accès à la technologie des télécommunications. Avec le développement rapide des technologies de communication, une part significative de la population dans les zones rurales n'a toujours pas accès à un réseau radio fiable, ce qui donne lieu à ce que l'on appelle communément des « zones mortes ».

Cette absence de couverture est souvent attribuée à la réticence des opérateurs de réseaux mobiles à investir dans des zones à rentabilité limitée. En réponse à ce défi, notre travail explore des solutions innovantes pour déployer des réseaux de communication rentables capables de s'adapter aux conditions environnementales des zones rurales. Une telle solution serait de concevoir et de mettre en œuvre des surfaces réfléchissantes intelligentes comme relais pour les stations de base dans les zones rurales. Cette approche implique la planification de la densification du réseau, l'optimisation des performances des environnements radio intelligents et le déploiement de sites rentables. L'objectif ultime est d'améliorer la couverture du signal radio, de réduire les coûts d'infrastructure, de fournir flexibilité et évolutivité, et de minimiser les interférences dans les réseaux de communication ruraux [29].

2.2 Définition et principe de fonctionnement des surfaces réfléchissantes intelligences

2.2.1 Définition d'IRS

La surface réfléchissante intelligente (IRS) a récemment émergé comme un nouveau paradigme prometteur pour réaliser des canaux sans fil intelligents et reconfigurables environnements de propagation radio pour les systèmes de communication sans fil B5G/6G.

En général, l'IRS est une surface plane comprenant un grand nombre d'éléments réfléchissants passifs, chacun capable d'induire indépendamment un changement d'amplitude et de phase contrôlable au signal incident. En déployant densément des IRS dans le réseau sans fil et coordonner intelligemment leurs réflexions, la propagation du signal/les canaux sans fil entre les émetteurs et les récepteurs peuvent être reconfigurés de manière flexible pour atteindre les réalisations et les distributions souhaitées, ce qui fournit ainsi un nouveau moyen de traiter fondamentalement le problème d'affaiblissement et d'interférence des canaux sans fil, et potentiellement d'atteindre une amélioration spectaculaire de la capacité et de la fiabilité des communications sans fil [30].

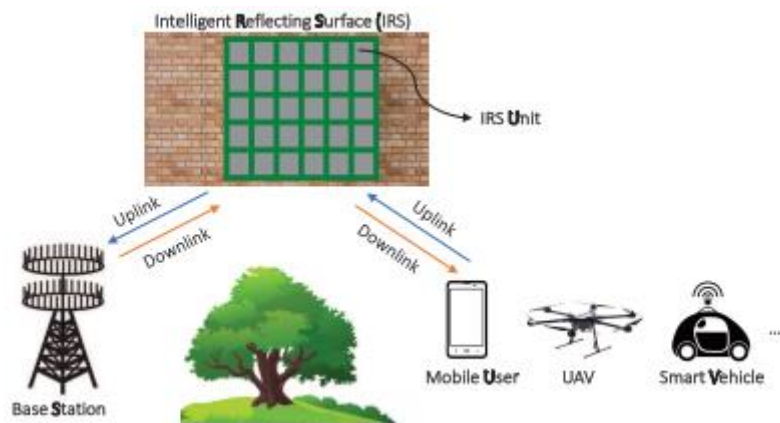


Figure 2.1 : système de communication assistée par IRS [31].

L'IRS est capable d'accomplir plusieurs fonctions attrayantes dans la reconfiguration des canaux sans fil, telles que la création d'un lien de ligne de vue virtuel (LoS) pour éviter les obstacles entre les émetteurs-récepteurs via une réflexion intelligente et l'ajoute de chemin de signal supplémentaires vers la direction souhaitée, [3][31], et aussi possible d'utiliser l'IRS pour renforcer la sécurité de la couche physique [35].

Jusqu'à présent, dans la plupart des études le changement est considéré comme une phase passer uniquement au signal d'incident, de sorte qu'un IRS consomme aucune puissance de transmission. En gros, un SRI configure intelligemment l'environnement sans fil pour faciliter les transmissions entre l'expéditeur et le récepteur, lorsque les communications directes ont mauvaises qualités [31].

En outre, la surface réfléchissante intelligente (IRS) fonctionne en mode duplex intégral (FD) et est dépourvue de toute amplification du bruit d'antenne ainsi que de toute interférence automatique, offrant ainsi des avantages compétitifs substantiels par rapport aux relais actifs classiques, tels que les relais semi-duplex (HD) qui sont entravés par une faible efficacité spectrale, et les relais full duplex (FD) qui nécessitent des méthodologies avancées pour l'annulation automatique des interférences. De plus, en raison de son profil minimal, de sa construction légère et de sa géométrie conforme, il peut être facilement monté ou détaché d'objets environnementaux à des fins de déploiement ou de remplacement. Enfin, l'IRS fonctionne comme un composant auxiliaire au sein des réseaux sans fil et peut y être intégré de manière fluide, offrant ainsi une flexibilité et une compatibilité importantes avec les systèmes sans fil préexistants, tels que les réseaux cellulaires ou le WiFi.

Enfin, l'IRS sert de dispositif auxiliaire dans les réseaux sans fil et peut y être intégré de manière transparente, offrant ainsi une grande flexibilité et une compatibilité avec les systèmes sans fil existants. En raison des avantages prometteurs mentionnés ci-dessus, l'IRS est adapté à un déploiement massif dans les réseaux sans fil pour améliorer de manière significative son efficacité spectrale et énergétique de manière rentable. Ainsi, il est envisagé que l'IRS conduira à des changements de paradigme fondamentaux dans la conception des réseaux sans fils, notamment du système M-MIMO existant sans IRS au nouveau système M-MIMO assisté par l'IRS, ainsi qu'à partir le réseau sans fil hétérogène existant au nouveau réseau hybride assisté par IRS à l'avenir, comme le montrent respectivement les Fig2.2 (a) et (b) [3].

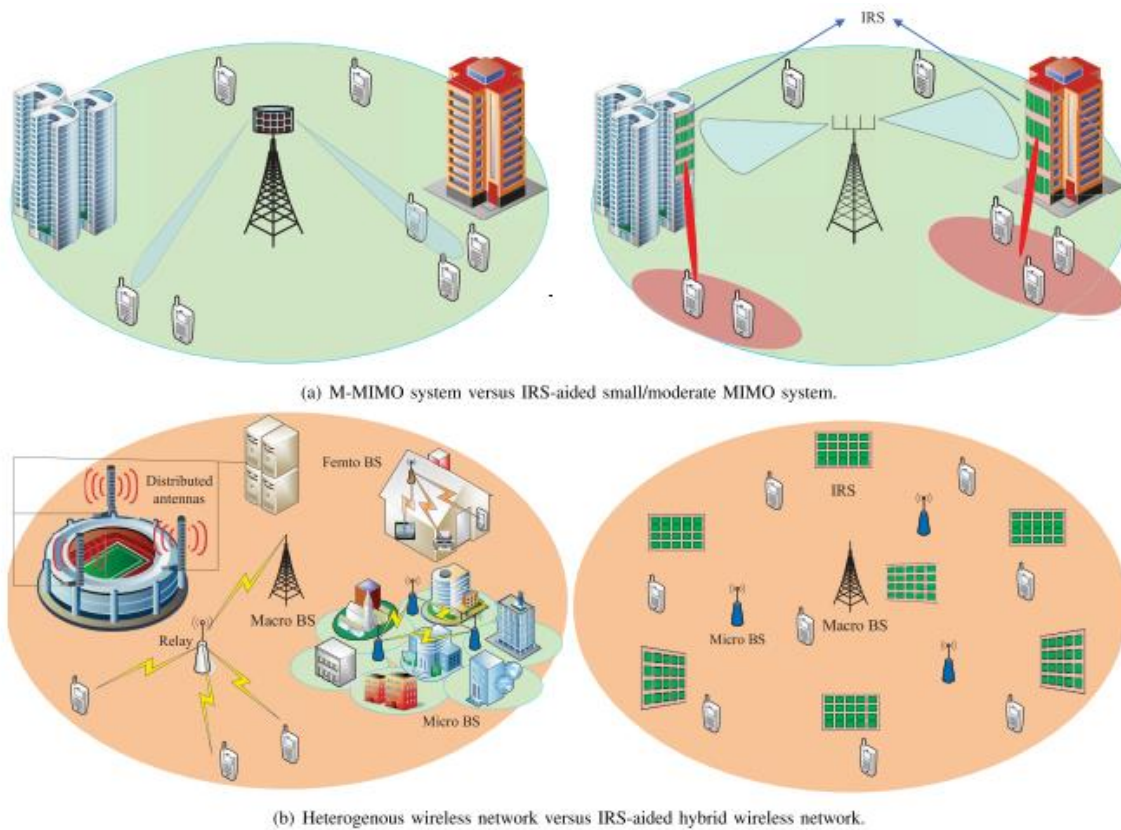


Figure 2.2 : Changements de paradigme potentiels des conceptions des réseaux sans fils avec IRS [3].

2.2.2 Principe de fonctionnement

Un exemple du principe de fonctionnement d'un RIS est donné dans la Figure 2.3. Une onde radio incidente est divisée en deux parties : l'onde radio réfléchie et l'onde radio transmise (ou réfractée).

Les ondes radio réfléchies et transmises peuvent être reconfigurées avec des arrangements spécifiques des particules de diffusion sur le RIS [32], ce qui est réalisé en utilisant des diodes PIN dans cet exemple.

Le RIS est capable de façonner les ondes radio grâce aux lois généralisées de réflexion et de réfraction de Snell, ce qui rend l'angle de réflexion des ondes radio contrôlable. Typiquement, la reconfiguration intelligente est réalisée à l'aide de capteurs intégrés au RIS et d'un lien de rétroaction connecté à un contrôleur CPU (processeur) [33].

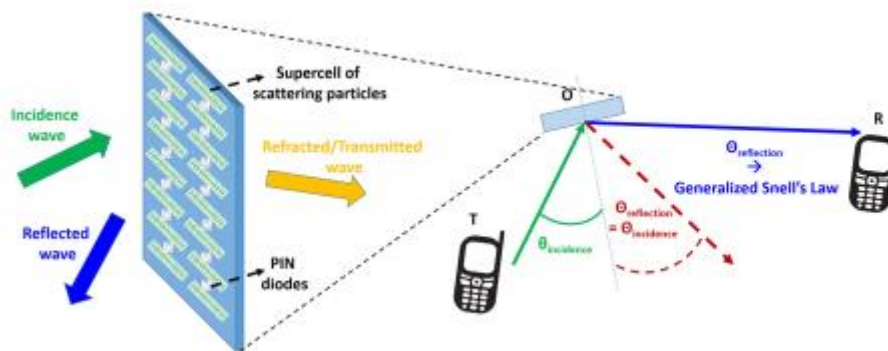


Figure 2.3 : principe de fonctionnement d'un IRS [34].

La Figure 2.4 montre un scénario d'application typique d'un IRS. Comme indiqué dans la Fig. 2.4 (a), lorsque l'équipement utilisateur M souhaite se connecter à Internet via sa station de base (BS) la plus proche, BS1, le lien sans fil est bloqué par l'objet O1. Dans ce cas, M doit choisir BS2 avec un signal plus faible car BS2 est plus éloigné de M. Dans la Fig. 2.4 (b) où les IRS sont installés sur les surfaces des objets O2, O3 et O4, les signaux de BS1 peuvent être transmis à M par réfraction depuis O2 et réflexion depuis O3 et O4. C'est parce que les réponses des IRS sont optimisées pour réfracter ou réfléchir vers des directions anormales selon les lois généralisées de Snell, c'est-à-dire que les réfractions et les réflexions des RIS sont contrôlables.

Dans les communications futures, le blocage causé par les objets environnementaux est plus sévère car les signaux à haute fréquence ont des pertes de pénétration élevées et une diffraction réduite. Par conséquent, les IRS pourraient être une technologie clé dans les futures communications sans fils [34].

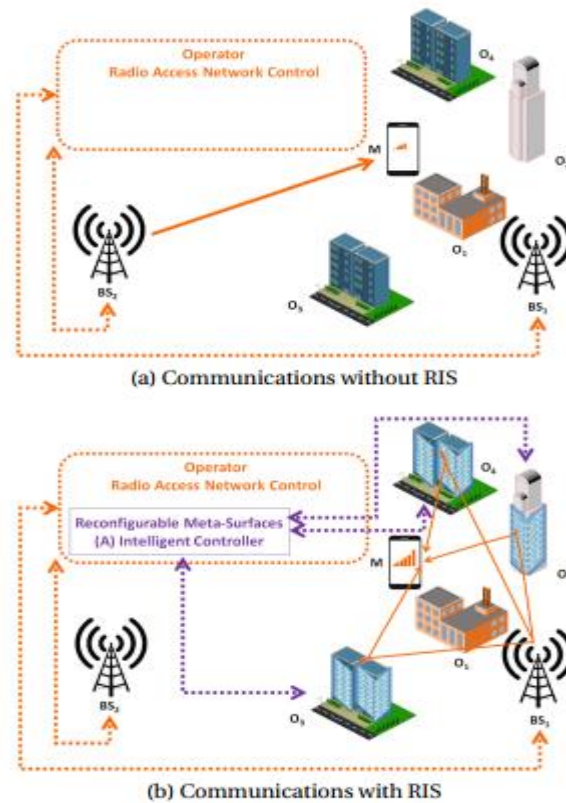


Figure 2.4 : exemple d'un IRS [34].

2.2.3 IRS vs relais traditionnels

Les surfaces réfléchissantes intelligentes (IRS) et les relais traditionnels amplify-and-forward (AF), decode-and-forward (DF) représentent deux approches distinctes pour améliorer la couverture des communications sans fil. Contrairement aux relais, qui traitent activement les signaux en les amplifiant (AF) ou en les décodant puis retransmettant (DF), les IRS agissent passivement, en ajustant dynamiquement la phase des signaux réfléchis sans générer ni amplifier de puissance propre. Cette différence fondamentale leur permet d'être déployées avec une consommation énergétique minimale et une complexité matérielle réduite [36]. Un IRS peut former un faisceau réfléchi vers un utilisateur cible sans ajout de bruit, mais au prix d'un gain de canal relativement faible par élément, nécessitant ainsi un grand nombre d'unités pour atteindre les performances d'un relais actif. Par ailleurs, les travaux montrent que les IRS surpassent les relais AF en termes d'efficacité énergétique [37], tandis que d'autres identifient leur potentiel en tant que solution de modulation avancée pour les réseaux 6G [38]. Toutefois, les IRS restent dépendantes de conditions optimales de canal et d'une estimation précise, contrairement aux relais DF plus robustes dans des environnements variés. Ainsi, le choix entre

IRS et relais dépend du compromis visé entre performance, consommation et complexité de déploiement.

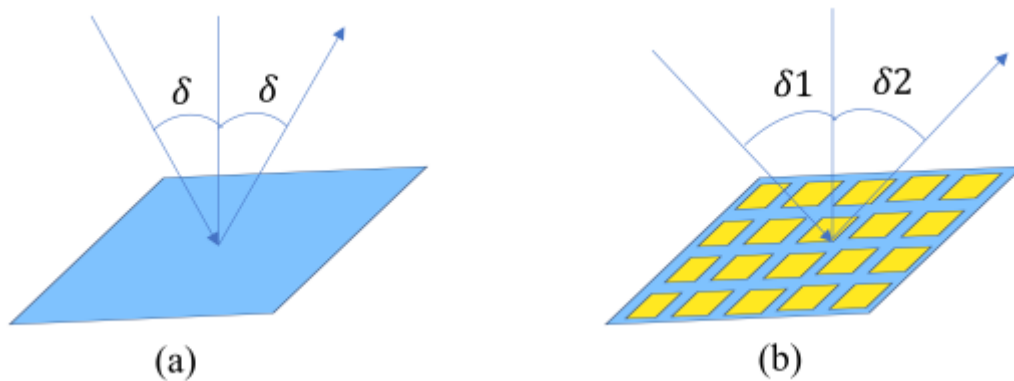


Figure 2.5 : Différence entre un réflecteur classique (a) et une surface réfléchissante intelligente « IRS » (b) [39].

Tableau 2. 1 : Comparaison entre IRS et d'autres relais [40]

Technologie	Mode de duplex	Bruit	Interférence	Coût de matériel	Energie utilisé
<i>IRS</i>	Complet	No	Très faible	Faible	Passive faible
<i>AF Relay</i>	Demi	Additive	Elevé	Elevé	Active élevé
<i>DF Relay</i>	Demi	Additive	Elevé	Elevé	Active élevé

2.3 Architecture matériel des IRS

2.3.1 Structure Général d'une IRS

Un IRS typique a trois couches. Ces couches peuvent être expliquées comme suit :

- **La première/couche externe :** cette couche se compose d'un grand réseau de patches passifs reconfigurables imprimés sur un substrat diélectrique pour manipuler les signaux incidents [3][40].

- **La deuxième/couche intermédiaire** : cette couche consiste en une plaque de cuivre pour réduire les fuites d'énergie du signal lors de la réflexion [3][43].
- **La troisième/couche intérieure** : cette couche se compose d'une carte de circuit de contrôle capable de diriger la phase et l'amplitude de réflexion en temps réel [3][43].
- **Le contrôleur intelligent** est généralement un FPGA qui régule la réflexion et la configuration et sert également de passerelle entre la BS et la destination [3][40].

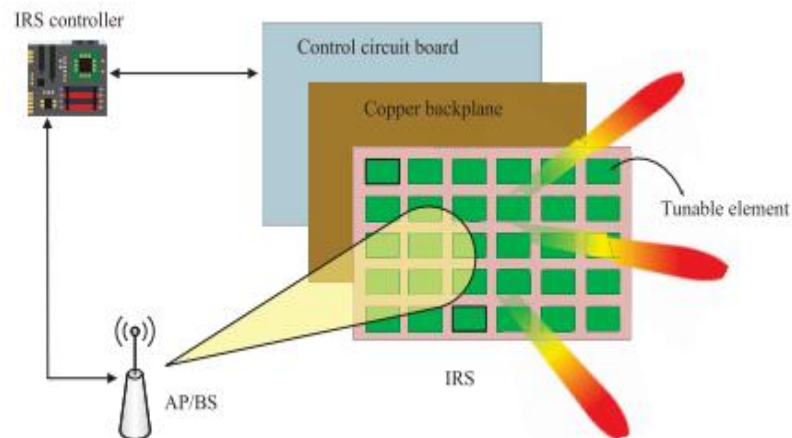


Figure 2.6 : Architecture d'IRS [3].

2.3.2 Matériaux composites de l'élément individuel

Une surface réfléchissante intelligente (IRS) est constituée d'un réseau bidimensionnel artificiel composé de nombreux petits patches passifs, imprimés sur un substrat diélectrique [3][40]. Ces patches sont conçus pour être reconfigurables, leur permettant de manipuler la direction, la phase ou l'amplitude des ondes électromagnétiques incidentes [41][3][40]. Leur objectif principal est de contrôler la réflexion ou la transmission des signaux, afin d'améliorer la qualité des communications sans fils et de réduire les interférences [40][43].

Chaque cellule unitaire fonctionne comme un élément passif qui réfléchit les ondes reçues. Ces cellules peuvent agir de manière autonome, mais c'est leur action coordonnée qui permet de former des faisceaux dirigés ou de concentrer les signaux dans une zone précise [41][3].

Pour rendre ces patches reconfigurables, ils intègrent des composants électroniques à faible coût, comme des diodes PIN à capacité variables ou d'autres semi-conducteurs [40][43]. Ces

composants permettent de modifier localement l'impédance, ce qui ajuste la réponse électromagnétique de chaque cellule [3][43].

L'espace entre les cellules est généralement de l'ordre de $\lambda/2$, afin d'éviter les lobes indésirables et de conserver un contrôle précis du front d'onde réfléchi [3][43].

Un espacement mal adapté peut nuire à l'efficacité du système, en réduisant la capacité de concentration des signaux ou en provoquant des interférences entre cellules [3][43].

Les performances de l'IRS dépendent fortement de la conception de ses matériaux : forme géométrique, propriétés électriques, disposition [41][40][43]. Ces éléments garantissent une réponse rapide, fiable et adaptative. Ainsi, ces matériaux composites sont essentiels à l'efficacité des IRS dans les réseaux de communication sans fil [3][40][43].

2.3.3 Contrôleur IRS et puces accordables

Les éléments individuels d'un IRS peuvent être reconfigurés électroniquement à l'aide de dispositifs tels que des diodes positives-intrinsèques-négatives (PIN), des transistors à effet de champ (FET) ou des commutateurs de systèmes micro-électromécaniques (MEMS), qui sont couramment utilisés en raison de leur réponse rapide en réflexion, de leur faible perte de réflexion, de leur faible consommation d'énergie et de leur coût matériel réduit [3][40].

Généralement, dans un IRS, le circuit équivalent de diode PIN est utilisé pour contrôler la tension de polarisation à l'aide d'une ligne d'alimentation en courant continu (CC). La diode PIN a deux états : ON ou OFF. Les états peuvent être générés à l'aide d'une différence de décalage de phase de π [40][43].

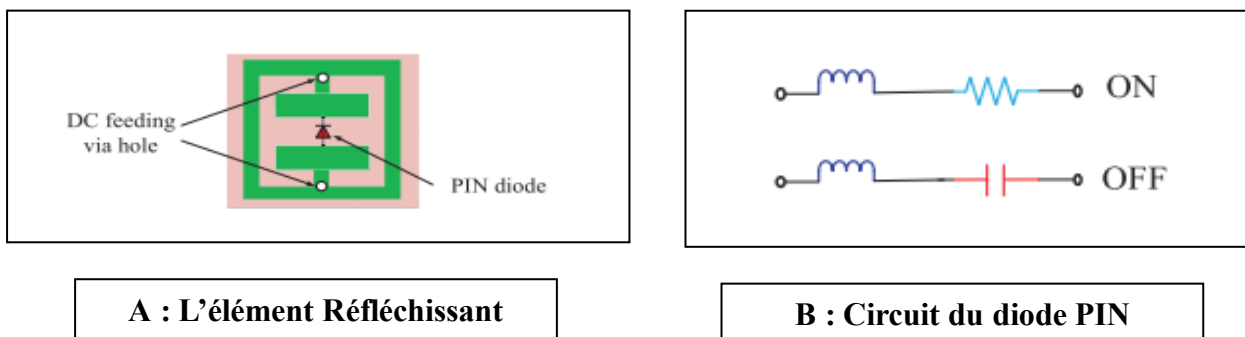


Figure 2.7 : exemple d'un élément réfléchissant accordable basé sur la diode PIN

Les différents décalages de phase des éléments individuels d'un IRS peuvent être obtenus en variant la tension de polarisation correspondante du contrôleur intelligent pour ajuster l'amplitude de réflexion [3][40]. Une charge de résistance variable peut être appliquée à chaque conception d'élément. Pratiquement, il est préférable d'avoir un contrôle indépendant de l'amplitude et du décalage de phase de chaque élément, suivi d'une intégration efficace du circuit IRS [3][43].

Un IRS est capable de reconfigurer les signaux incidents. Cela aide à réduire la communication intercellulaire grâce aux puces accordables. La communication entre les cellules unitaires de l'IRS peut être soit filaire, soit sans fil, la première étant préférée, et l'interconnexion peut facilement co-intégrer des contrôleurs sur la même puce, comme implémenté dans les systèmes embarqués à faible consommation d'énergie [40]. La communication intercellulaire câblée pour l'IRS peut être limitée lors de l'augmentation de la taille. Plusieurs puces peuvent entraîner une disposition et un routage complexes. En tenant compte de l'énergie, de la latence et de la robustesse, il est idéal de mettre en œuvre une communication sans fil intercellulaire pour les IRS à grande échelle ou denses [3][43].

2.3.4 Mécanisme d'ajustement de phase

Les signaux incidents sont dirigés vers l'utilisateur en manipulant la phase de chaque élément unitaire de l'IRS [3]. Au départ, les MS étaient conçues pour des tâches fixes à des fréquences spécifiques et nécessitaient une redéfinition et une refabrication pour fonctionner à une autre plage de fréquences. Cependant, actuellement, les MS ont évolué de manière significative et sont capables de répondre à des stimuli contrôlés par logiciel [40]. Ces stimuli contrôlés par logiciel seront capables d'ajuster les ondes électromagnétiques vers une direction souhaitée sans nécessiter une nouvelle conception du mécanisme d'accord pour différentes fréquences ou fonctionnalités [40][43].

Les stimuli externes tels que les stimuli électriques, magnétiques, lumineux ou thermiques, lorsqu'ils sont appliqués, induisent un changement dans la fonctionnalité du MS qui peut être qualifié de mécanisme d'accord global. L'accord local se produit au niveau de la cellule unitaire en intégrant des diodes polarisées dans les éléments individuels de la cellule unitaire pour activer localement les cellules unitaires et leur permettre de se reconfigurer et de modifier leur fonctionnalité [43]. De plus, l'accordage binaire à phase contrôlée électriquement ou les mécanismes réactifs continus utilisant des diodes à capacité variables constituent une approche

d'accordage fiable [40][43]. Un IRS dispose d'une large gamme de fonctions réglables telles que l'absorption parfaite, la réflexion anormale, la formation de faisceaux et le guidage de faisceaux [40][43].

2.3.5 Fonctions du contrôleur intelligent :

La gestion du fonctionnement autonome et dynamique d'une Surface Réfléchissante Intelligente (IRS) repose sur un contrôleur intelligent. Ce contrôleur ne traite pas directement les signaux radiofréquences (RF), mais il organise la configuration électromagnétique de toute la surface. Son objectif est de faire en sorte que la surface réponde parfaitement aux besoins du réseau. Selon la recherche récente, les rôles principaux par le contrôleur sont résumés comme suit :

1. Réception des commandes réseau

Le contrôleur reçoit les instructions de configuration de la station de base (BS) ou de l'entité gestionnaire centrale sur un lien de commandement qui peut être filaire (Ethernet ou fibre), mais également sans fil à faible fréquence (typiquement dans les bandes ISM) pour ne pas interférer avec les communications principales [3][40].

Ces commandes portent sur : les coefficients de réflexion souhaités (phase et amplitude) ; les modes de fonctionnement (réflexion, absorption, transparence partielle) ; ou des stratégies d'économie d'énergie selon l'état du réseau [43].

2. Évaluation des coefficients réfléchis

À partir de la topologie, du canal et de l'objectif de QoS, le contrôleur intelligent est capable de calculer localement les phases et amplitudes à appliquer à chaque cellule de l'IRS. Cela peut se faire selon :

- Des algorithmes embarqués tournant sur une FPGA ou un microcontrôleur basse consommation [41][3].
- Soit en exécutant des ordres pré-calculés envoyé par la station de base [43].

L'objectif étant d'appliquer les coefficients réfléchis optimaux pour (matrice diagonale Θ avec phase θ_n et amplitude β_n pour chacune des cellules) pour améliorer : La qualité du lien (formation de faisceaux), Suppression des interférences, Efficacité énergétique [3][40].

3. Communication avec les éléments passifs

Le contrôleur s'occupe de l'adressage et de l'activation des cellules unitaires, chaque cellule pouvant être liée au contrôleur par : Un réseau câblé interne, souvent selon une architecture série ou bus (SPI, I²C), Ou de manière locale mais sans fil pour tout IRS de grande taille ou répartie [43]. Il envoie des signaux numériques pour le réglage des composants électroniques de chaque cellule (comme la polarisation des diodes PIN ou la tension des varicaps) [40].

4. Collecte et traitement des données des capteurs

Dans les architectures avancées, des capteurs RF ou environnementaux peuvent constituer la surface réfléchissante. Ces capteurs permettent de : détecter la présence d'utilisateurs ou d'obstacles, mesurer la puissance ou la direction d'arrivée des signaux, surveiller des grandeurs de température, d'humidité ou de vibration [3][43].

Le contrôleur exploite ces données pour adapter dynamiquement la configuration de l'IRS, facilitant ainsi la capacité d'auto adaptation du système proposé [40].

5. Support à la synchronisation en temps et à la mise à jour du firmware

Enfin, le contrôleur peut également assurer la synchronisation en temps avec le réseau hôte elle-même indispensable à des scénarios temps réel (URLLC, beam tracking, etc.), et la mise à jour à distance du firmware de l'IRS garantissant l'évolutivité et la maintenance logicielle de ce dernier [43].

2.3.6 Différents types d'architecture IRS

Tableau 2. 2 : comparaison des principales architectures d'IRS

Architecture	Description	Avantages	Inconvénients
Passive Pure	Réflexion sans traitement actif	Très basse consommation	Moins de flexibilité
Semi-passive avec amplification	Amplification modérée des signaux	Amélioration SNR	Plus de consommation
Hybride IRS	Combinaison passive et active	Équilibre performance/énergie	Plus complexe

2.4 Rôle des IRS dans les réseaux sans fils

2.4.1 contrôle intelligent de la propagation du canal

Dans les systèmes de communication sans fil, la présence d'obstacles, la diffraction, les trajets multiples ou l'absence de ligne de mire peuvent généralement affecter le canal radio.

Ces facteurs restreignent la portée du signal et détériorent la qualité des connexions. La Surface à Réflexion Intelligente (IRS) constitue une méthode innovante pour pallier ces restrictions. L'IRS, grâce à sa faculté de reconfigurer dynamiquement l'environnement de propagation, est formé de surfaces intégrant des éléments passifs contrôlables qui modifient les phases des ondes incidentes pour orienter les signaux vers les objectifs souhaités, produisant ainsi des trajets de transmission optimisés [37].

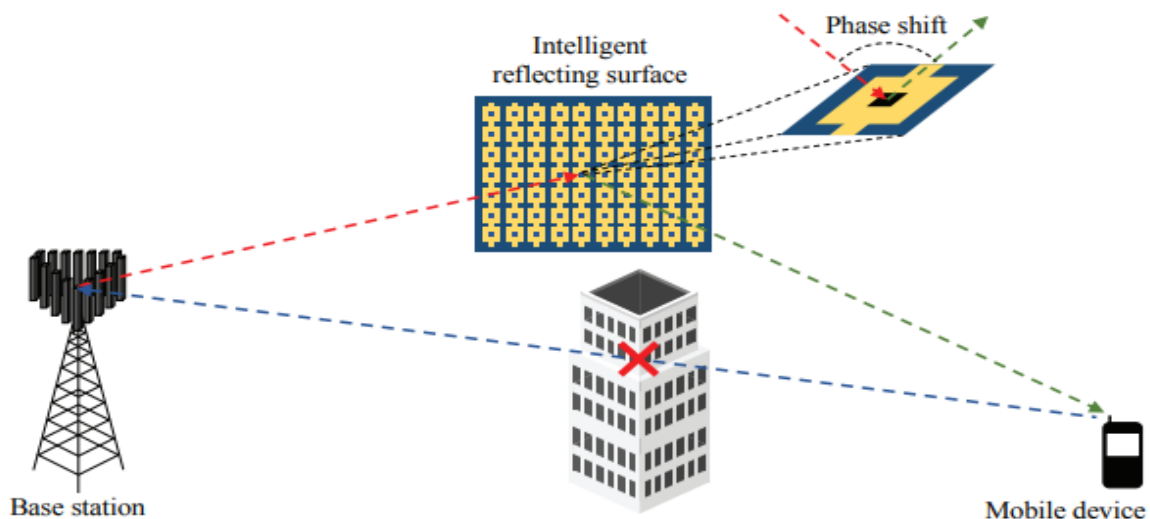


Figure 2.8 : orientation des signaux reçu par modification des phases des ondes par l'IRS [50].

Cette fonctionnalité offre la possibilité non seulement de gérer de manière astucieuse le canal de diffusion, mais également d'agir sur la distribution spatiale de l'énergie transmise. En orientant les pensées vers les destinataires, même sans avoir une visibilité directe, l'IRS compense les zones de couverture faible et amplifie l'étendue effective du réseau, sans nécessiter une puissance de transmission supplémentaire [42]. Elle représente donc une option alternative face aux relais traditionnels ou aux petites cellules, en garantissant une amélioration passive de la couverture radio et sans interférence active.

L'intérêt est particulièrement palpable dans des contextes complexes où la topologie entrave ou disperse considérablement les signaux. À l'inverse des dispositifs actifs, l'IRS n'émet

pas de bruit et utilise seulement une faible quantité d'énergie pour modifier ses composants. De ce fait, son intégration à l'infrastructure du réseau offre une gestion souple de la topologie de couverture, tout en assurant une grande efficacité énergétique [44].

2.4.2 Amélioration du SNR et formation de faisceaux passive « passive-beamforming »

Un des grands apports technologiques des surfaces réfléchissantes intelligentes (IRS) en communications sans fil est le fait qu'elles permettent la formation de faisceaux passifs (passive beamforming), c'est-à-dire la possibilité de concentrer le signal réfléchi dans une direction donnée sans émettre activement. En effet, cela s'effectue grâce au contrôle adéquat de la phase (et parfois de l'amplitude) des signaux réfléchis pour chaque cellule unitaire composant l'IRS. En choisissant judicieusement ces phases, l'IRS permet de construire de façon cohérente le signal dans une direction donnée, particulièrement évident dans la direction d'un récepteur cible, tout en éteignant le signal dans les autres directions [3].

Ce processus de focalisation évoque celui des antennes directionnelles, mais en mode passif. Il est alors principalement responsable de l'augmentation du rapport signal sur bruit (SNR) au niveau du récepteur, à l'inverse des systèmes classiques où l'élévation du SNR nécessite une puissance de transmission plus forte, un IRS, lui, ne cherchant pas à émettre directement, mais plutôt à relayer l'énergie incidente, de signal d'origine, pour le rediriger efficacement [3] [45].

Les simulations et études empiriques évoquées précédemment montrent que le beamforming passif peut améliorer considérablement le SNR, surtout dans les cas où le composant direct est affaibli (zones d'ombre, propagation NLoS). En concentrant la puissance vers l'utilisateur visé, l'IRS permet aussi d'augmenter la couverture utile du réseau tout en diminuant la consommation en énergie, la station de base ou l'émetteur n'ayant plus besoin d'augmenter sa puissance pour compenser la perte de signal [45].

De plus, cette optimisation passive du canal contribue à diminuer les interférences entre utilisateurs, l'énergie étant spatialement confinée, limitant les brouillages entre communications simultanées dans un environnement dense [40] [45].

D'une façon plus générale, la formation passive de faisceaux au moyen de l'IRS représente une avancée majeure pour les systèmes de communication sans fil, car elle permet d'ajuster la qualité du lien radio sans coût énergétique supplémentaire, en s'inscrivant dans une démarche vers des réseaux durables et intelligents.

2.4.3 Réduction des interférences et amélioration de la QoS

Un des principaux avantages des surfaces réfléchissantes intelligentes (IRS) dans les systèmes modernes de communication sans fil est leur capacité à contrer les interférences, notamment dans les environnements denses (en termes de nombre d'utilisateurs). Contrairement aux techniques classiques faisant appel à la coordination active ou à l'optimisation de la puissance, l'IRS agit passivement sur le canal. Il règle de manière appropriée les phases des signaux réfléchis pour mener soit à l'annulation soit à l'atténuation des signaux parasites.

2.4.3.1 Atténuation des interférences par contrôle de phase

Le principe repose sur la programmable des coefficients de réflexion de chaque cellule unitaire de l'IRS. Il est alors possible, en jouant sur la phase des signaux réfléchis, de mener à une interférence destructive à la position d'un récepteur non désiré tout en renforçant le signal utile entre l'utilisateur désiré et l'émetteur ciblé. Cela revient à gérer l'environnement de propagation selon nos propres critères, en favorisant, pénalisant ou même éliminant certaines directions. À l'inverse des antennes classiques ou des techniques MIMO actives, cette approche ne nécessite pas d'accroître la puissance émise, ce qui traduit un bon rendement énergétique de l'IRS [46] [47].

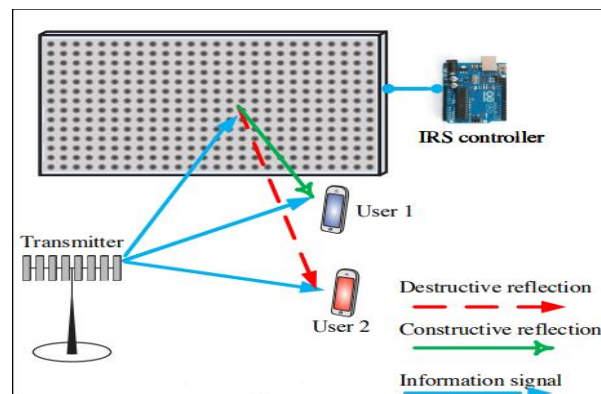


Figure 2.9 (A) : Interférence destructive et constructive d'une IRS

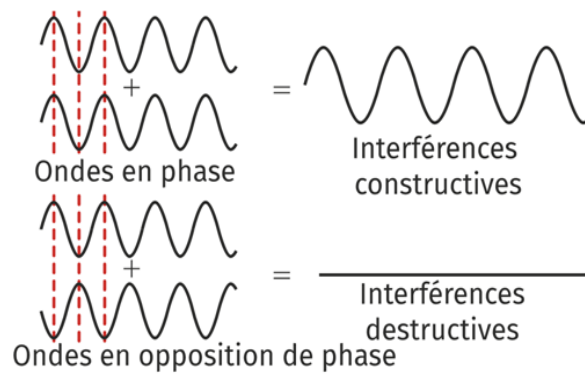


Figure 2.9 (B) : Principe des interférences constructives et destructives selon la phase des ondes

2.4.3.2 Efficacité dans les scénarios multi-utilisateurs (MIMO massifs, environnements denses)

Dans une stratégie multi-utilisateur, où plusieurs terminaux communiquent simultanément avec une même station de base, les interférences croisées constituent une limite très perturbante au bon comportement du réseau. L'IRS, grâce à son architecture passive distribuée, fournit une solution agréable pour découpler spatialement les liaisons. Lorsqu'il est correctement configuré en fonction de la topologie du réseau et des emplacements utilisateurs, l'IRS permet de redéfinir les profils de propagation pour minimiser les chevauchements de signaux utilisateurs. Cette capacité est particulièrement utile en massive MIMO et dans des scénarios ultra-denses où les utilisateurs sont également tout aussi gênants que le bruit thermique lui-même [37] [47].

2.4.3.3 Amélioration de la qualité de service (QoS)

En réduisant efficacement les interférences, l'IRS contribue directement à l'amélioration de la qualité de service (QoS), qui se décline en plusieurs indicateurs clés :

- **Stabilité de la connexion :** L'élimination de la composante parasite permet d'améliorer la robustesse du lien, en particulier pour les utilisateurs mobiles.
- **Débit :** une meilleure isolation des liaisons permet une augmentation du SNR et donc un meilleur débit binaire, même dans des canaux encombrés.
- **Latence :** L'IRS, une fois fixé, permet de réduire à la fois la latence de bout en bout (essentielle pour certaines applications critiques telles que la télé-chirurgie ou les véhicules autonomes), en stabilisant le canal et en réduisant la nécessité de retransmissions/erreurs.

Les études théoriques et les simulations, en effet, confirment que l'intégration des IRS dans les systèmes sans fils peut donner lieu à une optimisation fine de la QoS (sans surcharge des ressources en réseau), y compris dans des scénarios complexes [46] [47].

2.4.4 Réduction de la consommation énergétique dans les réseaux 6G

Dans la perspective des réseaux 6G, la problématique énergétique représente une priorité majeure, non seulement parce que les futurs réseaux se doivent non seulement d'offrir des performances hors normes en matière de débit, de latence, de connectivité massive, mais également parce qu'ils doivent réduire significativement leur empreinte carbone. Les surfaces réfléchissantes intelligentes (IRS) constituent ainsi une solution de rupture, du fait de leur mode de fonctionnement passif et de leur très faible consommation.

2.4.4.1 Passivité et efficacité énergétique de l'IRS

Non émetteur, l'IRS ne produit pas de signal mais réfléchit et reconfigure l'onde électromagnétique qu'il reçoit. Dans la plupart des cas, chaque cellule unitaire, le plus souvent des métamatériaux à commande passive, ne se contente que de modifier la phase (et éventuellement l'amplitude) du signal reçu sans traitement actif, si bien que la consommation électrique est très faible, souvent de quelques milliwatts pour le contrôle des éléments [48].

À titre de comparaison, les relais actifs et les small cells, utiles pour étendre la couverture et améliorer le débit, intègrent des circuits d'émission, de réception, d'amplification et de traitement qui entraînent une consommation énergétique non négligeable. Ainsi, une small cell standard consomme entre 5 et 100W selon sa configuration, quand un IRS de taille équivalente est alimenté avec moins de 1W [49].

2.4.4.2 L'IRS comme composant technologique des réseaux verts (green networks)

Les IRS passifs s'intègrent dans les enjeux des réseaux verts visés par la 6G. En améliorant l'efficacité spectrale et en atténuant les pertes de propagation, l'IRS permet d'optimiser les performances sans accroître la puissance côté émetteur, ce qui participe à la réduction de la consommation d'énergie du réseau et du même coup à la QoS (qualité de service) des liens. En ce sens, l'IRS constitue une solution durable, parfaitement cohérente avec les objectifs stratégiques de la 6G en matière de sobriété énergétique et d'environnement [48][50].

2.4.4.3 Mise en place urbaine à grande échelle sans infrastructures lourdes

Les IRS présentent aussi l'avantage de pouvoir être déployés avec aisance, en tant que capteurs passifs, sans alimentation électrique forte ni connexion permanente avec un cœur de

réseau : ils peuvent être intégrés facilement dans des structures urbaines existantes : murs d'immeubles, panneaux publicitaires, façades de verre, mobilier urbain, etc. Cette intégration discrète permet d'envisager un maillage dense du canal radio, sans les contraintes logistiques, énergétiques et esthétiques des installations actives classiques [50].

Les IRS font ainsi émerger une nouvelle architecture de réseau, un environnement intelligent, dans lequel chaque surface participe à la communication sans en devenir un poids au niveau de la consommation d'énergie.

2.5 Application pratique des IRS dans les réseaux sans fils

Les surfaces intelligentes reconfigurables (IRS) représentent une avancée majeure vers une nouvelle génération de réseaux sans fil, dans lesquels l'environnement radio devient entièrement contrôlable. Grâce à leur capacité à manipuler les ondes électromagnétiques de manière dynamique, les IRS peuvent s'adapter à divers scénarios concrets, améliorant ainsi la couverture, la sécurité et l'efficacité des communications dans les futurs réseaux intelligents.

La figure 2.10 illustre plusieurs applications typiques du réseau sans fil assisté par IRS. Dans la Figure 2.10 (a), un utilisateur se trouve dans une zone morte où le lien direct entre lui et sa station de base (BS) est sévèrement bloqué par un obstacle. Dans ce cas, déployer un IRS qui a des liaisons claires avec la BS et l'utilisateur aide à contourner l'obstacle via une réflexion intelligente du signal et crée ainsi un lien de ligne de vue (LoS) virtuel entre eux. Cela est particulièrement utile pour l'extension de la couverture dans les communications mmWave qui sont très vulnérables aux blocages intérieurs.

La figure 2.10 (b) montre l'utilisation de l'IRS pour améliorer la sécurité de la couche physique. Lorsque la distance du lien entre la station de base (BS) et l'intercepteur est inférieure à celle de l'utilisateur légitime (par exemple, utilisateur 1), ou que l'intercepteur se trouve dans la même direction que l'utilisateur légitime (par exemple, utilisateur 2), les taux de communication secrète réalisables sont fortement limités (même en utilisant le beamforming de transmission à la BS dans le dernier cas).

Cependant, si un IRS est déployé à proximité de l'espion, le signal réfléchi par l'IRS peut être ajusté pour annuler le signal (non réfléchi par l'IRS) provenant de la BS chez l'espion, réduisant ainsi efficacement la fuite d'informations. Dans la Figure 2.10 (c), pour un utilisateur en bordure de cellule qui subit à la fois une forte atténuation du signal de sa station de base (BS) et une sévère interférence sous-canal d'une station de base voisine, un IRS peut être déployé à la périphérie de la cellule pour aider non seulement à améliorer la puissance du signal désiré

mais aussi supprimer l'interférence en concevant correctement son faisceau de réflexion, créant ainsi une « zone de hotspot de signal » ainsi qu'une « zone sans interférence » dans ses environs.

La figure 2.10 (d) illustre l'utilisation de l'IRS pour permettre des communications massives entre appareils (D2D), où l'IRS agit comme un centre de réflexion du signal pour soutenir les transmissions simultanées à faible puissance par atténuation des interférences.

Enfin, la Figure 2.10 (e) montre l'application de l'IRS pour réaliser le transfert simultané d'informations et d'énergie sans fil (SWIPT) vers divers appareils dans un réseau Internet des objets (IoT), où la grande ouverture de l'IRS est utilisée pour compenser la perte de puissance significative sur de longues distances via le beam-forming passif vers les appareils IoT à proximité afin d'améliorer l'efficacité du transfert d'énergie sans fil [37].

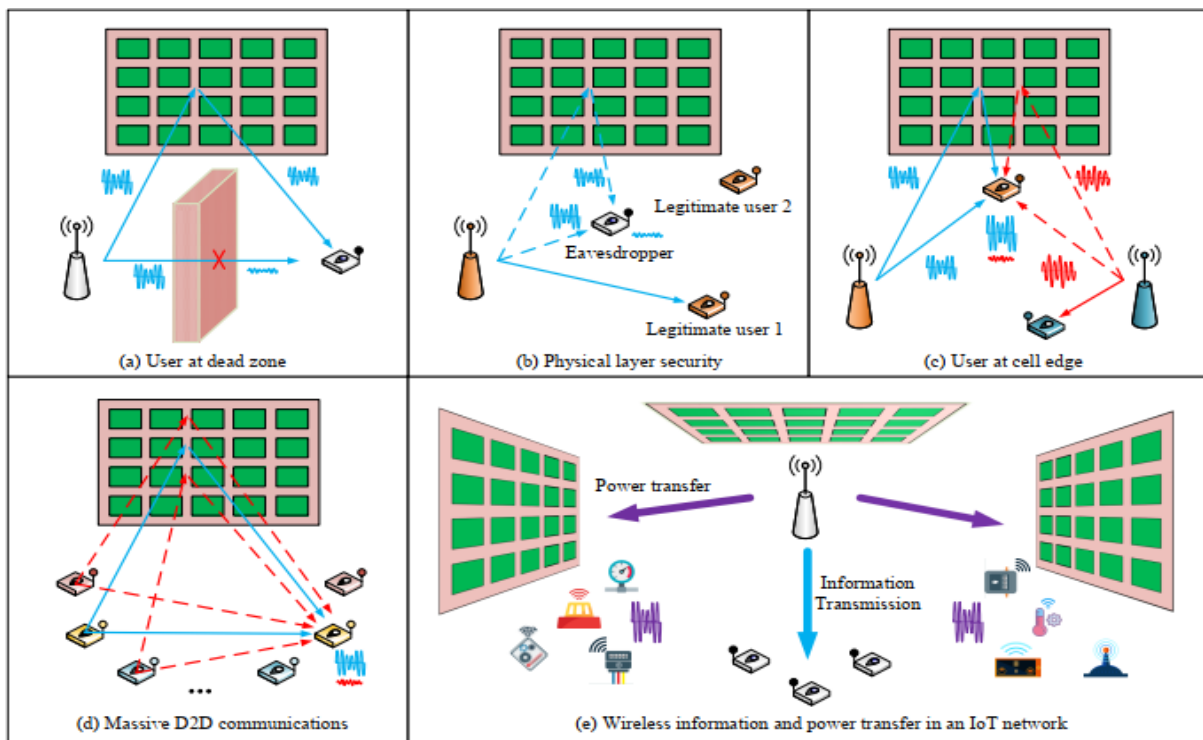


Figure 2.10 : les applications différentes d'IRS dans les réseaux sans fils [37].

2.6 Avantage et défis pratique

Une surface réfléchissante intelligente (IRS) est une structure plane composée d'un ensemble d'éléments passifs, appelés méta-atomes, capables d'ajuster dynamiquement la phase (et potentiellement l'amplitude ou la polarisation) d'un signal incident, dans le but de façonner le canal de propagation sans générer ni amplifier de puissance propre [3]. Contrairement aux relais actifs, les IRS ne nécessitent ni traitement complexe du signal ni amplification, ce qui leur confère une consommation énergétique extrêmement faible et une

complexité matérielle réduite [51]. Elles peuvent être facilement intégrées dans l'environnement urbain (murs, panneaux, façades) pour améliorer la couverture, notamment dans les zones mal desservies [52].

Les IRS permettent également une augmentation du gain de faisceau par alignement constructif des réflexions, ainsi qu'un contrôle reconfigurable du canal, ce qui les positionne comme une technologie clé pour les réseaux 6G. Par ailleurs, plusieurs défis majeurs subsistent. Parmi ceux-ci, on retrouve la complexité du contrôle en temps réel d'un grand nombre d'éléments réfléchissants, la difficulté de l'estimation du canal en présence de signaux indirects [53].

En outre, comme les IRS sont des éléments passives qui ne peuvent ni amplifier ni décoder les signaux, ce qui limite leur efficacité dans les environnements très obstrués. Ces défis mettent en évidence l'importance d'une recherche soutenue en conception matérielle, en optimisation du contrôle passif et en protocoles de communication adaptés.

2.7 Conclusion

L'IRS apparaît comme une technologie fondamentale pour les réseaux sans fil du futur, permettant la reconfiguration passive et économique des canaux de propagation. Leur architecture innovante et leurs usages pratiques (extension de couverture, faisceau passif, réduction des interférences) en font une solution attractive pour les problèmes des réseaux 6G. Cependant, il existe encore des limitations, notamment en termes d'estimation de canaux et de gestion dynamique à grande échelle. Pour atteindre leur plein potentiel, beaucoup de recherche sur l'optimisation et l'intégration de l'IA sera nécessaire. Les IRS représentent ainsi une avancée majeure vers des réseaux plus intelligents, performants et durables.

CHAPITRE 3 : Les scénarios de communication assistées par IRS

3.1 Introduction

Face aux défis croissants rencontrés par les réseaux sans fil tels que l'augmentation de la densité urbaine, la fracture numérique dans les zones rurales et les risques liés à la sécurité des données plusieurs scénarios concrets mettent en évidence la pertinence des surfaces intelligentes reconfigurables (IRS) pour optimiser les communications. Les IRS constituent une solution à la fois moins énergivore, moins complexe et moins coûteuse à déployer que l'introduction de petites cellules ou de répéteurs.

Ce chapitre examine trois scénarios représentatifs où les IRS peuvent apporter des bénéfices notables : l'amélioration de la connectivité dans les zones rurales et mortes, l'extension de couverture en milieu urbain dense, et la sécurisation physique des communications sans fil.

Dans le premier scénario, scénario met l'accent sur leur capacité à élargir l'accès au réseau dans des régions mal desservies, en évitant des déploiements lourds et coûteux. Le deuxième scénario, nous explorons comment les IRS peuvent compenser les effets de blocage dus aux bâtiments, en réorientant intelligemment les signaux vers les utilisateurs situés dans des zones d'ombre, ce qui améliore la qualité de service (QoS). Enfin, le troisième scénario met en lumière le rôle des IRS dans la protection contre les interceptions, via la création d'interférences destructives ciblées pour perturber les canaux non autorisés.

Une analyse comparative sera ensuite proposée pour évaluer les avantages, les limitations et les coûts relatifs à chaque cas d'usage, suivie d'une discussion sur le choix du scénario adapté selon les contraintes opérationnelles. Ce chapitre s'achève par l'examen des perspectives futures, en particulier l'intégration des IRS dans les architectures de réseaux 6G et leur pilotage automatique à l'aide de l'intelligence artificielle.

3.2 Les scénarios de communication sans fil assistées par IRS

3.2.1 Scénario 1 : connectivité dans les zones rurales

3.2.1.1 Contexte et défis

L'extension de la couverture des réseaux sans fil à des zones géographiques isolées comme les déserts, les montagnes ou les zones rurales pose encore de nombreuses difficultés. Dans ces zones, le déploiement de ressources terrestres classiques est souvent économiquement et techniquement impossible à réaliser. Les satellites, notamment ceux en orbite terrestre basse (LEO), constituent alors une solution attractive puisqu'ils sont capables de fournir une

connectivité mondiale à faible latence. Les solutions classiques comme les réflecteurs passifs à phase fixe ne permettent pas d'aligner le signal sur les variations rapides du canal. Par ailleurs, l'utilisation de relais actifs est limitée en raison des contraintes d'énergie et de complexité.

Dans ce contexte, l'intégration des IRS dans les communications satellites soulève une question centrale : comment concevoir un système à la fois flexible, économe en énergie et capable de s'adapter dynamiquement aux conditions du canal satellite-sol ?

3.2.1.2 Définition des satellites LEO

Définie comme son nom l'indique, une orbite terrestre basse ou orbite « LEO » (Low Earth Orbit en anglais), une orbite relativement proche de la surface de la Terre, situés généralement entre 500 et 2 000 kilomètres d'altitude, les satellites en orbite LEO se déplacent à très grande vitesse.

Ces satellites sont largement utilisés dans différents domaines, notamment pour l'accès à l'Internet haut débit, l'observation de la Terre, ainsi que pour la recherche scientifique. Leur durée de vie est généralement comprise entre 5 et 15 ans.

3.2.1.3 Rôle des satellites LEO

Les satellites en orbite terrestre basse (LEO), situés à des altitudes comprises entre 500 et 2000 km, constituent une opportunité stratégique pour étendre la connectivité dans les régions où la présence d'infrastructures terrestres est inexistante. En raison de leur altitude plus basse, ils offrent plusieurs avantages comme une latence réduite, une zone de couverture élargie et un coût opérationnel inférieur par rapport aux satellites géostationnaires (GEO).

Cependant, la grande distance entre un satellite LEO et les utilisateurs au sol entraîne des pertes de trajet importantes, des transmetteurs puissants et de récepteurs très sensibles, ce qui augmente les coûts et la consommation énergétique. Pour compenser cela, l'introduction de surfaces réfléchissantes intelligentes (IRS) permet d'optimiser passivement les liens de communication satellite-sol en réfléchissant intelligemment les signaux selon les conditions dynamiques du canal.

Cette étude propose une architecture innovante où des IRS sont déployées à la fois du côté satellite (SAT-side IRS), souvent intégrées au dos des panneaux solaires, et près des utilisateurs terrestres (GN-side IRS). Cette configuration facilite l'établissement de connexions à réflexion simple ou double, en tirant parti de la prédominance du canal LoS (Line-Of-Sight) entre le satellite et la Terre. Elle fournit donc une couverture flexible, réduit au minimum l'atténuation

du signal et s'adapte de manière passive et efficace à la vitesse rapide du satellite. En outre, la prévisibilité des trajectoires orbitales offre un suivi de faisceau précis et économique, améliorant ainsi l'efficacité du système.

3.2.1.4 L'IRS comme solution

L'utilisation d'Intelligent Reflecting Surfaces (IRS) dans les systèmes de communication par satellite LEO permet de réorienter les signaux grâce à des surfaces passives contrôlables installées soit sur le satellite (SAT-side IRS), soit au sol près des utilisateurs (GN-side IRS).

Contrairement aux réflecteurs classiques à phase fixe, les IRS permettent un beamforming passif et dynamique, capable de s'adapter à des conditions de canal très variables notamment en raison de la mobilité élevée des satellites.

Dans les environnements ruraux, les IRS montés sur des toits de maisons, tentes ou véhicules permettent d'établir des liens indirects LoS (ligne de vue), améliorant considérablement la couverture dans les zones mortes [54].

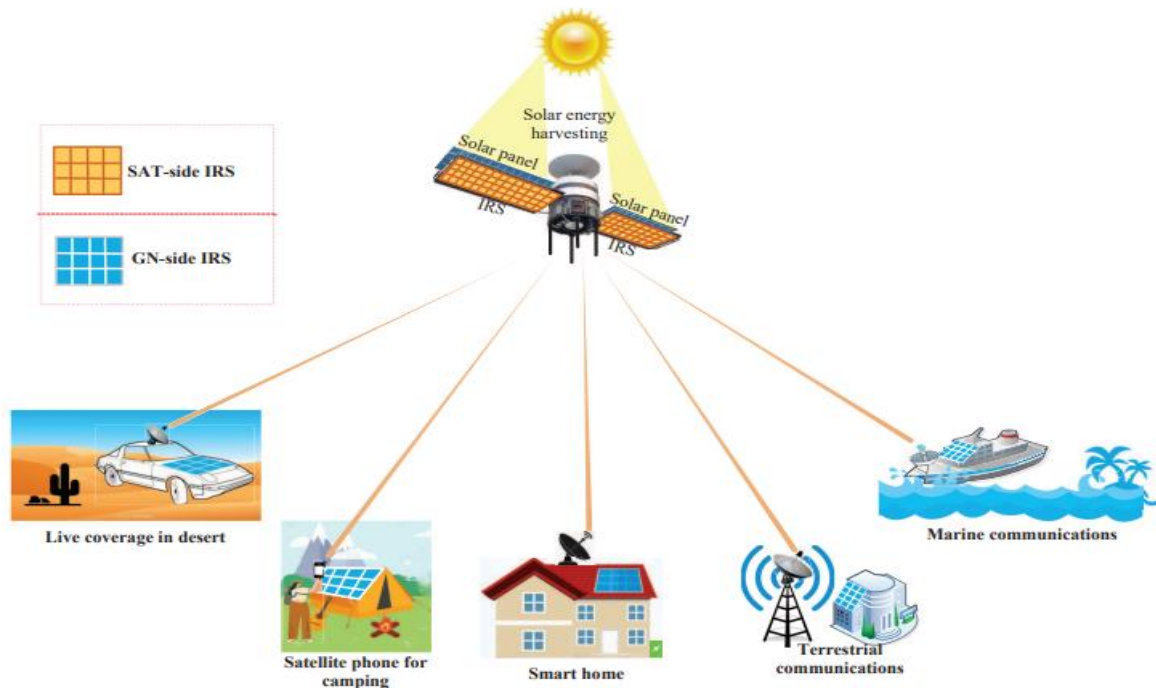


Figure 3.1 : Communications par satellite LEO assistées par IRS avec des IRS côté satellite et côté réseau terrestre [54].

3.2.1.5 Modélisation du système

Dans cette section, nous modélisons le canal de communication pour le système IRS-double côté proposé dans la Figure 3.2 en supposant un environnement LoS, les canaux à chaque lien peuvent être modélisés comme suit.

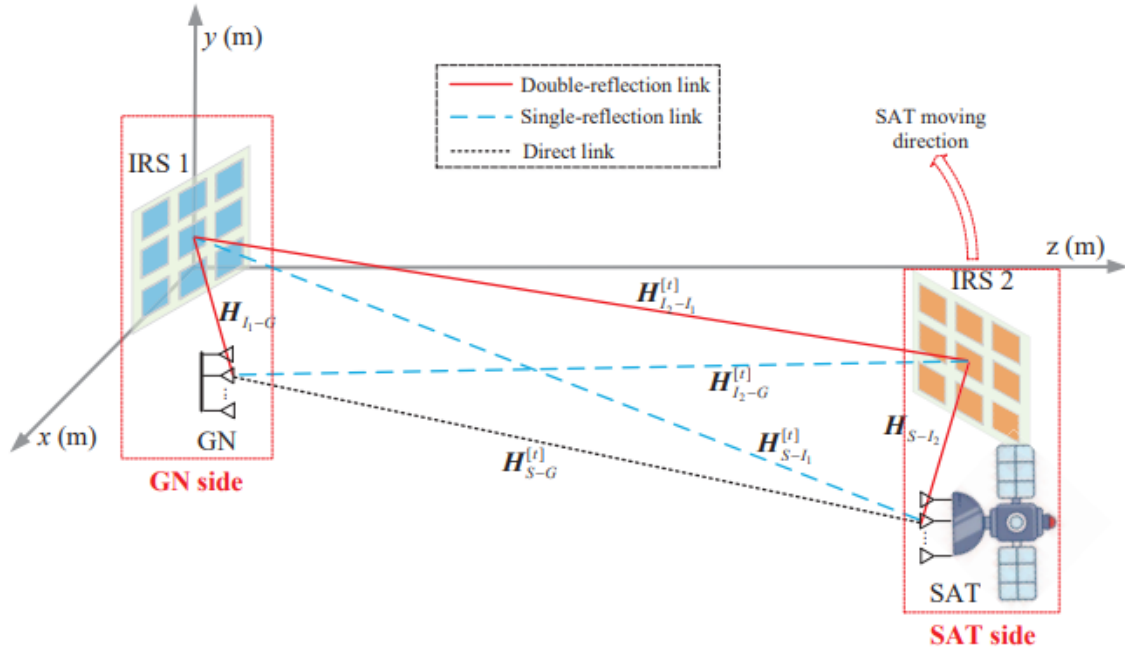


Figure 3.2 : Une illustration du système de communication par satellite LEO avec des IRS coopératifs double-face (vue 3D) [54].

➤ Canal IRS–GN (sol) et IRS–SAT (satellite)

Nous considérons des réponses de canal LoS entre les IRS et la station GN, ainsi qu'entre le satellite LEO et les IRS. La réponse du canal entre l'élément réflecteur passif m de l'IRS et l'antenne $n^{\text{ème}}$ de GN peut être modélisée comme :

$$[H_{I_1-G}]_{n,m} = \sqrt{\frac{\beta}{d_{n,m}}} e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} d_{n,m}}, \quad (3.1)$$

Où :

- $d_{n,m}$ est la distance entre le m -ième élément de l'IRS et la n -ième antenne de la station GN ;
- β Est le coefficient de perte de trajet dépendant du type d'environnement ;
- λ Est la longueur d'onde du signal.

De manière similaire, les autres canaux LoS par exemple :

$$H_{S-I_1}, H_{S-I_2}, H_{I_2-G}, H_{I_2-I_1} \quad (3.2)$$

Peuvent être modélisés en utilisant la même formulation. [54]

➤ **Canal total IRS-double**

En combinant les chemins directs et réfléchis, la réponse du canal agrégé entre le satellite et la station GN à l'instant t est donnée par :

$$\bar{H}_{S-G}^{[t]} = H_{S-G}^{[t]} + H_{I_1-G} \Theta_1^{[t]} H_{S-I_1}^{[t]} + H_{I_2-G} \Theta_2^{[t]} H_{S-I_2}^{[t]} + H_{I_1-G} \Theta_1^{[t]} H_{I_2-I_1}^{[t]} \Theta_2^{[t]} H_{S-I_2}^{[t]} \quad (3.3)$$

Où :

- $H_{S-G}^{[t]}$ Est le canal direct satellite–GN à l'instant t ,
- $\Theta_1^{[t]}$ Et $\Theta_2^{[t]}$ sont les matrices diagonales contenant les coefficients de réflexion des IRS I_1 et I_2 respectivement à l'instant t ,

$H_{I_1-G}, H_{S-I_1}, H_{S-I_2}, H_{I_2-G}, H_{I_2-I_1}$ Sont les canaux LoS entre les différents nœuds comme indiqué dans la Figure 3.2.

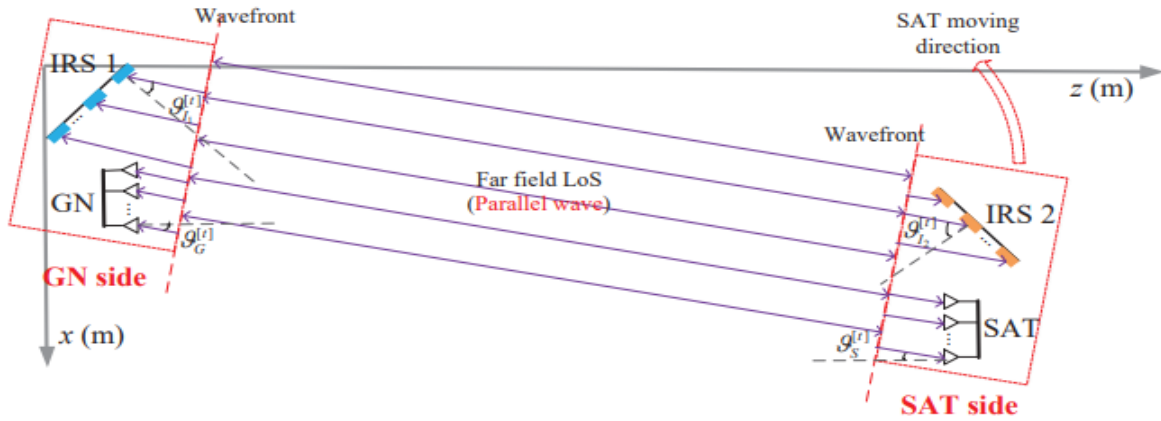


Figure 3.3 : Une illustration de la propagation des ondes et des angles d'arrivée/départ (AoA/AoD) entre les côtés réseau terrestre et satellite (vue 2D) [54].

3.2.2 Scénario 2 : communication dans les systèmes mmWave

3.2.2.1 Contexte et défis

Dans les environnements urbains dense, la propagation des ondes radio est affecté par les obstacles présents tels que les bâtiments, les véhicules ou les structures métalliques qui rendent les liaisons directes entre les stations de base et les utilisateurs régulièrement inaccessibles. Ces zones d'ombre, où les communications sont empruntées en conditions Non-Line-of-Sight (NLoS), posent problème pour les systèmes à haute fréquence (en particulier à mmWave), où la sensibilité au blocage et à l'atténuation des signaux est forte.

Les solutions mises en œuvre via les petites cellules ou relais actifs, traditionnellement, élargissent le domaine de couverture, mais coûtent chères et nécessitent une gestion complexe. Dès lors, une question se pose : comment étendre efficacement la couverture sans fil dans les zones urbaines densément bâties tout en limitant le coût et la consommation ?

3.2.2.2 IRS comme solution

Dans les zones urbaines denses, les IRS constituent une alternative technique pleinement efficace pour rétablir la connectivité lorsque les trajets directs sont bloqués. En effet, ils sont installés sur des surfaces urbaines stratégiques (façades, murs, toits) ils permettent de refléter les signaux incidents de manière active vers l'utilisateur situés en conditions NLoS, en tenant compte de la phase des ondes à chaque élément réflecteur.

Cette reconfiguration passive du canal permet alors de diriger avec précision les réflexions et maximiser la puissance reçue et minimiser les interférences. À la différence des relais traditionnels, les IRS n'introduisent aucun bruit supplémentaire, ni durée de transmission, tout en réduisant la consommation énergétique du système. Leur performance repose sur des algorithmes de configuration en temps réel, capables d'adapter les coefficients de réflexion aux variations du canal. Ainsi, les IRS permettent de reconfigurer l'environnement urbain en un support actif de transmission, contribuant à améliorer la couverture dans les zones d'ombre et à renforcer la fiabilité des communications, même dans les contextes à forte densité de bâtiments [55].

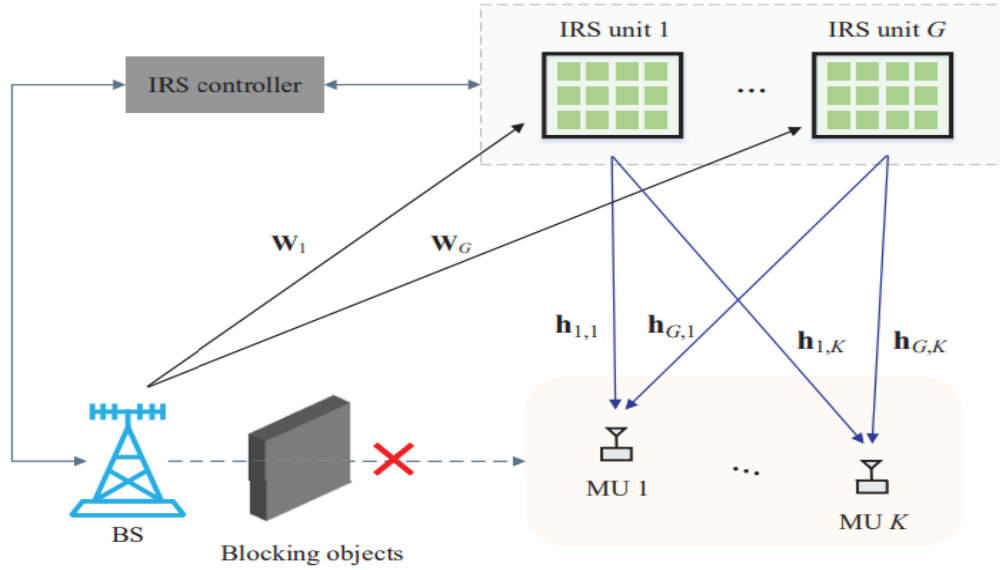


Figure 3.4 : Système MIMO massif en mm-Wave assisté par IRS [55].

3.2.2.3 Modèle de système

a) Système MIMO mm-Wave en liaison descendante assisté par IRS

La Fig. 1 illustre un système mmWave en liaison descendante assisté par IRS, où une station de base (BS) est équipée d'un réseau linéaire uniforme (ULA) composé de N éléments. Il existe G unités IRS servant K utilisateurs mobiles (MU) à antenne unique. Chaque unité IRS est supposée avoir M_{el} éléments horizontalement et M_{el} éléments verticalement. Soit $\mathbf{M} = M_{el} \times M_{el}$. Les liaisons directes BS-utilisateur sont supposées bloquées par des obstacles. La BS ne peut communiquer avec les MU que via la réflexion des IRS. Ces unités IRS sont contrôlées par un contrôleur intelligent, qui coordonne les modes de réflexion pour toutes les unités IRS. [55]

Le signal reçu au k -ième MU s'exprime comme :

$$y_k = \sum_{g=1}^G \mathbf{h}_{g,k}^H \Phi_g^H \mathbf{W}_g \mathbf{P}_k s_k + \sum_{g=1}^G \mathbf{h}_{g,k}^H \Phi_g^H \mathbf{W}_g \sum_{j=1, j \neq k}^k \mathbf{P}_j s_j + u_k \quad (3.4)$$

Où $\mathbf{W}_g \in \mathbb{C}^{M \times N}$ est le canal mmWave entre la BS et la g -ième unité IRS, et $\mathbf{h}_{g,k} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ est le canal entre la g -ième unité IRS et le k -ième MU ; la matrice de déphasage de la g -ième unité IRS est notée $\Phi_g = \sqrt{\eta} \text{diag}([\theta_{g,1}, \dots, \theta_{g,M}]^T)$, où η est le coefficient de réflexion et $\theta_{g,m} = e^{j\varphi_{g,m}}$ avec $\varphi_{g,m}$ comme le déphasage ; s_k est le signal émis par la BS

pour le k -ème MU, de moyenne nulle et puissance normalisée, et u_k est le bruit suivant la distribution gaussienne complexe circulaire symétrique $\mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_u^2)$; $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_K]$ est la matrice de précodage, où $\mathbf{P}_k \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ est utilisé par la BS pour transmettre s_k . La contrainte de puissance totale à la BS est $\text{tr}(\mathbf{P}\mathbf{P}^H) \leq P_{max}$.

b) Modèle de canal sans fil

Selon le modèle de canal 3D Saleh-Valenzuela largement utilisé, \mathbf{W}_g peut s'exprimer comme :

$$\mathbf{W}_g = \sum_{\ell=0}^{N_p} v^{(\ell)} \mathbf{a}_B(\varphi_B^{(\ell)}) \mathbf{a}_I^H(\varphi_B^{(\ell)}, \theta_I^{(\ell)}), \quad (3.5)$$

Où N_p désigne le nombre de trajets NLoS (non-LoS), $\ell = 0$ représente le trajet LoS, et $v^{(\ell)}$ est le gain complexe du ℓ -ième trajet. Les canaux mmWave comprennent généralement un petit nombre de composantes multipaths dominantes [55].

Dans (2), $\mathbf{a}_B(\phi) = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[e^{-j\frac{2\pi d}{\lambda} \phi_i} \right]_{i \in I(N)}$ et $\mathbf{a}_I(\phi, \theta) = \mathbf{a}_I^{az}(\phi) \otimes \mathbf{a}_I^{el}(\theta)$ sont les vecteurs

de directivité du réseau ULA et IRS. Les vecteurs de directivité $\mathbf{a}_I^{az}(\phi)$ et $\mathbf{a}_I^{el}(\theta)$ sont définis de la même manière que $\mathbf{a}_B(\phi)$, où λ est la longueur d'onde, d est l'espacement des antennes, et $I(N) = \{n - (N - 1)/2, n = 0, 1, \dots, N - 1\}$. L'espacement des éléments des ULA et IRS est supposé être $\lambda/2$.

Typiquement, l'IRS est densément distribué dans les espaces à fort trafic, ce qui donne une probabilité élevée de trajet LoS. En raison de l'affaiblissement de trajet sévère, la puissance transmise après 2 réflexions ou plus peut être ignorée, de sorte que seul le LoS est considéré [55]. Ainsi, le canal entre la g -ième unité IRS et le k -ième MU est donné par :

$$\mathbf{h}_{g,k} = \sqrt{M} v_k \mathbf{q}_r \mathbf{q}_t \mathbf{a}_t(\phi_k), \quad (3.6)$$

Où v_k est le gain du canal ; \mathbf{q}_r et \mathbf{q}_t sont les gains des éléments d'antenne en réception et émission, respectivement ; \mathbf{a}_t est le vecteur de directivité de l'IRS [55].

3.2.3 Scénario 3 : la sécurité physique des communications

3.2.3.1 Contexte et défis

Les réseaux sans fil modernes sont confrontés à une menace persistante : l'interception passive des données par des entités non autorisées, souvent invisibles, comme les intercepteurs (EVE). Cette vulnérabilité est particulièrement critique dans les systèmes émergents combinant

communication, détection et sémantique, où les signaux transportent des informations compressées à fort contenu informatif. Dans ces cas, même une fuite minime peut compromettre la confidentialité de l'ensemble du message.

Les approches de sécurité physique (Physical Layer Security – PLS) visent à limiter ces risques en exploitant les caractéristiques physiques du canal de propagation. Cependant, ces méthodes traditionnelles sont peignées à assurer une protection efficace lorsqu'il y a une topologie du réseau défavorable ou que l'intercepteur se trouve dans une zone à fort gain.

Ce constat soulève un enjeu fondamental dans les réseaux sans fil de prochaine génération : comment protéger les communications contre l'interception, tout en tenant compte des contraintes d'efficacité énergétique, de densité d'utilisateurs et d'intelligence intégrée au système ?

3.2.3.2 IRS comme solution

À cause la vulnérabilité du canal sans fil face à l'interception consiste à agir directement sur l'environnement de propagation, sans dépendre de méthodes lourdes comme le chiffrement ou le masquage actif. Dans ce cadre, les surfaces réfléchissantes intelligentes (IRS), capable de manipuler passivement le canal radio en ajustant les propriétés de réflexion des ondes.

Techniquement, une IRS est composée d'un grand nombre d'éléments passifs contrôlables individuellement, qui ajustent la phase des signaux réfléchis. Cela permet de renforcer le lien vers le récepteur légitime et de réduire significativement la puissance reçue par un intercepteur, via la création d'interférences destructives ou l'annulation du signal dans sa direction. Ce principe repose sur une optimisation conjointe du beamforming actif (station de base) et passif (IRS). Et sur le plan pratique, l'IRS peut fonctionner même avec des informations partielles ou incertaines sur la position de l'intercepteur.

En résumé, les IRS répondent de manière directe et concrète à la problématique posée, elles permettent de sécuriser physiquement les communications sans fil en remodelant le canal lui-même de manière passive et économique [56].

3.2.3.3 Modèle de système

Le scénario étudié implique un système de communication doté de plusieurs antennes, double-fonctionnelle sémantique BS équipé d'antennes de transmission M_t et d'antennes de réception M_r . Le BS sert des SCU à antenne unique tout en surveillant simultanément un MST, en présence d'une EVE à antenne unique, les deux MST et l'EVE essayant d'intercepter des

informations provenant des signaux des SCU. Nous supposons que les liens directs entre le BS et le MST sont obstrués. Pour atténuer ce phénomène, on utilise un IRS composé de N éléments reflétant des réseaux linéaires uniformes (ULA). L'IRS aide à détecter la cible en créant une liaison de ligne de mire virtuelle (LoS) et améliore le PLS en dirigeant des faisceaux puissants du BS vers plusieurs SCU légitimes. Le BS est également équipé d'un émetteur-récepteur SC, lui permettant d'extraire efficacement la sémantique sous-jacente des données transmises.

Le scénario considéré est illustré par la figure 3.5 présentée ci-dessous :

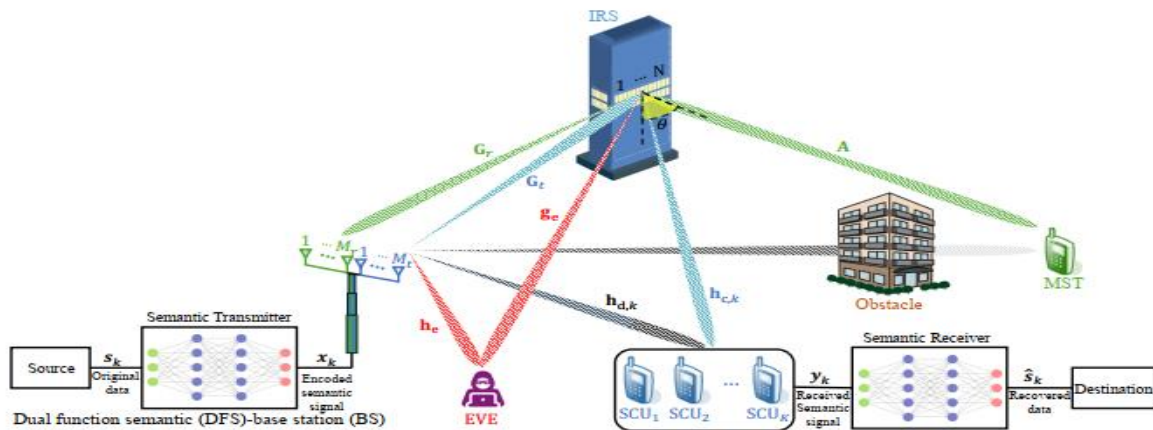


Figure 3.5 : Illustration d'un scénario de communication sécurisée assistée par IRS [56].

a) Modèle de signal transmis

Dans le système considéré, la station de base (BS) transmet simultanément trois types de signaux : le signal de communication destiné aux utilisateurs légitimes (SCUs), un signal dédié au sensing (DSS), et un bruit artificiel (AN) visant à perturber les intercepteurs potentiels. Le signal global transmis au cours de la l – ème période symbolique s'écrit comme suit :

$$x(l) = \sum_{k \in \mathcal{K}} w_{c,k} x_{c,k}(l) + w_s x_s(l) + w_n x_n(l) \quad (3.7)$$

Où :

- $w_{c,k} \in \mathbb{C}^{M_t \times 1}$ Est le vecteur de beamforming associé à ce signal de communication
- $x_{c,k}(l)$ Représente le (l) -ème symbole sémantique destiné à l'utilisateur k ,
- $x_s(l)$ Est le symbole du signal de détection DSS, pré-codé par le vecteur $w_s \in \mathbb{C}^{M_t \times 1}$

- $\mathbf{x}_n(l) \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{1})$ Désigne le bruit artificiel, codé par le vecteur $\mathbf{w}_n \in \mathbb{C}^{M_t \times 1}$
- $\mathcal{K} = \{1, 2, \dots, K\}$ Est l'ensemble des utilisateurs cibles.

L'ensemble des signaux $\mathbf{x}_{c,k}(l), \mathbf{x}_s(l), \mathbf{x}_n(l)$ ils sont supposés statistiquement indépendants. Cette structure permet à la station de base d'émettre simultanément des informations utiles vers les utilisateurs légitimes, un signal DSS destiné à assurer les fonctions de détection, ainsi qu'un bruit artificiel visant à réduire la capacité d'interception des eavesdroppers (EVE) et à atténuer les interférences non désirées. [56]

Afin d'évaluer la puissance totale du signal transmis, on définit la matrice de covariance du signal comme suit :

$$\begin{aligned} R_x(\mathbf{w}) &\triangleq \frac{1}{L} \sum_{l \in \mathcal{L}} \mathbf{x}(l) \mathbf{x}^\dagger(l) \approx \mathbb{E}\{\mathbf{x}(l) \mathbf{x}^\dagger(l)\} \\ &= \sum_{k \in \mathcal{K}} W_{c,k} + W_s + W_n \end{aligned} \quad (3.8)$$

Avec $\mathbf{W}_{c,k} = \mathbf{w}_{c,k} \mathbf{w}_{c,k}^\dagger$, $\mathbf{W}_s = \mathbf{w}_s \mathbf{w}_s^\dagger$, $\mathbf{W}_n = \mathbf{w}_n \mathbf{w}_n^\dagger$ il sont les matrices de covariance pour les signaux de communication, de détection et de bruit artificiel respectivement.

b) Modèle de communication

Dans le système étudié, la transmission du signal vers chaque utilisateur est affectée par deux trajets principaux :

- Un lien direct entre la station de base (BS) et l'utilisateur,
- Un lien réfléchi via la surface intelligente reconfigurable (IRS), permettant de contrôler dynamiquement la propagation du signal.

La matrice de phase de l'IRS est modélisée par :

$\mathbf{v} = [e^{j\phi_1}, \dots, e^{j\phi_N}]$ Et $\Phi(\mathbf{v}) = \mathbf{diag}(\mathbf{v})$ Où $\phi_N \in [0, 2\pi]$ Est le déphasage appliqué par le n - ème élément de l'IRS.

Le canal composite entre la station de base et l'utilisateur k est alors donné par :

$$\hat{\mathbf{h}}_{BC,k} \triangleq \mathbf{h}_{c,k}^\dagger \Phi \mathbf{G}_t + \mathbf{h}_{d,k}^\dagger \quad (3.9)$$

Où :

- $\mathbf{G}_t \in \mathbb{C}^{N \times M_t}$ Est le canal entre la BS et l'IRS,
- $\mathbf{h}_{d,k} \in \mathbb{C}^{1 \times M_t}$ Est le vecteur de canal direct BS–utilisateur k ,
- $\mathbf{h}_{c,k} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ Est le vecteur de canal IRS–utilisateur.

Le signal reçu par l'utilisateur k à l'instant l est exprimé comme suit :

$$y_k(l) = \hat{\mathbf{h}}_{BC,k} \mathbf{w}_{c,k} x_{c,k}(l) + \hat{\mathbf{h}}_{BC,k} \sum_{i \in \mathcal{K}, i \neq k} \mathbf{w}_{c,i} x_{c,i}(l) + \hat{\mathbf{h}}_{BC,k} \mathbf{w}_s x_s(l) + \hat{\mathbf{h}}_{BC,k} \mathbf{w}_n x_n(l) + n_{c,k}(l) \quad (3.10)$$

Où :

- $\hat{\mathbf{h}}_{BC,k} \mathbf{w}_{c,k} x_{c,k}(l)$ C'est le signal utile pour l'utilisateur k ,
- $\hat{\mathbf{h}}_{BC,k} \sum_{i \in \mathcal{K}, i \neq k} \mathbf{w}_{c,i} x_{c,i}(l)$ C'est l'interférence inter-utilisateurs,
- $\hat{\mathbf{h}}_{BC,k} \mathbf{w}_s x_s(l)$ C'est l'interférence de DSS
- $\hat{\mathbf{h}}_{BC,k} \mathbf{w}_n x_n(l)$ C'est l'interférence de bruit artificiel « AN »
- $n_{c,k}(l)$ Le bruit du récepteur

Et $n_{c,k}(l) \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_{c,k}^2)$ représente le bruit reçu par le récepteur SCU k durant l -ième période symbole.

Le rapport signal sur interférence et bruit « SINR » à l'utilisateur k s'écrit alors :

$$Y_k(w, v) = \frac{|\hat{\mathbf{h}}_{BC,k} \mathbf{w}_{c,k}|^2}{\sum_{i \in \mathcal{K}, i \neq k} |\hat{\mathbf{h}}_{BC,k} \mathbf{w}_{c,i}|^2 + |\hat{\mathbf{h}}_{BC,k} \mathbf{w}_s|^2 + |\hat{\mathbf{h}}_{BC,k} \mathbf{w}_n|^2 + \sigma_{c,k}^2} \quad (3.11)$$

$$= \frac{\hat{\mathbf{h}}_{BC,k} \mathbf{w}_{c,k} \hat{\mathbf{h}}_{BC,k}^\dagger}{\hat{\mathbf{h}}_{BC,k} (\mathbf{R}_x(w) - \mathbf{W}_{c,i}) \hat{\mathbf{h}}_{BC,k}^\dagger + \sigma_{c,k}^2}$$

c) Modèle de l'intercepteur

En plus des utilisateurs légitimes, le système est exposé à une menace potentielle représentée par un intercepteur non autorisé (EVE). Celui-ci tente d'extraire les informations contenues dans les signaux émis par la station de base vers les utilisateurs. Le modèle considère que l'EVE est équipé d'une antenne unique, placée à une position arbitraire dans la zone de couverture [56].

$$\hat{\mathbf{h}}_{Be} \triangleq \mathbf{g}_e^\dagger \Phi \mathbf{G}_t + \mathbf{h}_e^\dagger \quad (3.12)$$

Où :

- $\mathbf{h}_e^\dagger \in \mathbb{C}^{M_t \times 1}$ Représente le canal direct entre BS et EVE,
- $\mathbf{g}_e^\dagger \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ Représente le canal direct entre IRS et EVE.

Le signal intercepté par EVE au temps l est donc :

$$\mathbf{y}^{eve}(l) = \hat{\mathbf{h}}_{Be} \mathbf{x}(l) + \mathbf{n}_e(l) \quad (3.13)$$

Avec $\mathbf{x}(l)$ est le signal transmis par le BS et $\mathbf{n}_e(l) \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_{e,k}^2)$ c'est est le bruit au récepteur d'EVE.

Le SINR de l'intercepteur pour le flux destiné à l'utilisateur k est défini par :

$$\gamma_k^{eve} = \frac{\hat{\mathbf{h}}_{Be,k} \mathbf{w}_{c,k} \hat{\mathbf{h}}_{Be}^\dagger}{\hat{\mathbf{h}}_{Be}^\dagger (\mathbf{R}_x(\mathbf{w}) - \mathbf{W}_{c,k}) \hat{\mathbf{h}}_{Be}^\dagger + \sigma_e^2} \quad (3.14)$$

- $\mathbf{w}_{c,k}$ Le signal utile que EVE tente d'intercepter
- σ_e^2 Le bruit thermique

L'un des objectifs clés du système IRS-assisté est donc de minimiser ce SINR à l'intercepteur en adaptant dynamiquement les phases de réflexion de l'IRS et le beamforming côté station de base, afin de réduire le risque d'écoute illégitime [56].

3.3 L'optimisation d'utilisation d'IRS

3.3.1 Dans les communications mmWave et THz

Les bandes de fréquences térahertz (THz) et millimétriques (mmWave) sont au cœur des futurs systèmes 6G grâce à leur capacité à offrir des débits extrêmement élevés. Toutefois, ces bandes souffrent plusieurs défis majeurs, notamment une forte atténuation des signaux, une

absorption moléculaire importante et d'une forte sensibilité aux blocages physiques. Ces limitations réduisent considérablement la couverture et la fiabilité des communications dans des environnements complexes tels que les bureaux, les hôpitaux ou les zones urbaines denses.

L'intégration de surfaces intelligentes reconfigurables (IRS) est une solution efficace, car elles sont capables d'adapter dynamiquement la phase ainsi que l'amplitude des signaux réfléchis, et ce en configurant le milieu de propagation pour établir des liaisons en ligne de vue direct (LoS) et court-circuiter des obstacles pour un meilleur lien radio grâce à l'utilisation des communications THz et les ondes millimétriques (mmWave).

Sur le plan d'optimisation, les approches classiques ont été abordées. On a par exemple eu recours à des algorithmes par essaim pour optimiser les coefficients de phase des IRS pour améliorer la capacité ergodique du système en fonction du nombre d'éléments réfléchissants, ou en considérant la probabilité d'interruption ou le taux d'erreurs moyen selon la densité d'IRS qui, concluant que des gains en diversité sont possibles grâce à des déploiements stratégiques.

Par ailleurs, les méthodes reposant sur l'intelligence artificielle comme l'apprentissage par renforcement profond (Deep Reinforcement Learning DRL) sont aussi apparues pertinents pour l'optimisation du beamforming des architectures multi-hop, comme dans le cas du deep learning qui a permis d'augmenter de 50 % la portée des communications THz au moyen d'une configuration multi-utilisateurs à IRS multiples.

Malgré ces avancées, la recherche sur les stratégies de déploiement optimales des IRS dans les systèmes THz et mmWave reste encore limitée. Des paramètres essentiels comme les conditions de canal, le coût d'installation, le nombre d'IRS requis ou encore la topologie des bâtiments ce qui est pourtant essentiel pour garantir une adoption efficace de ces techniques pour les futurs systèmes 6G [57].

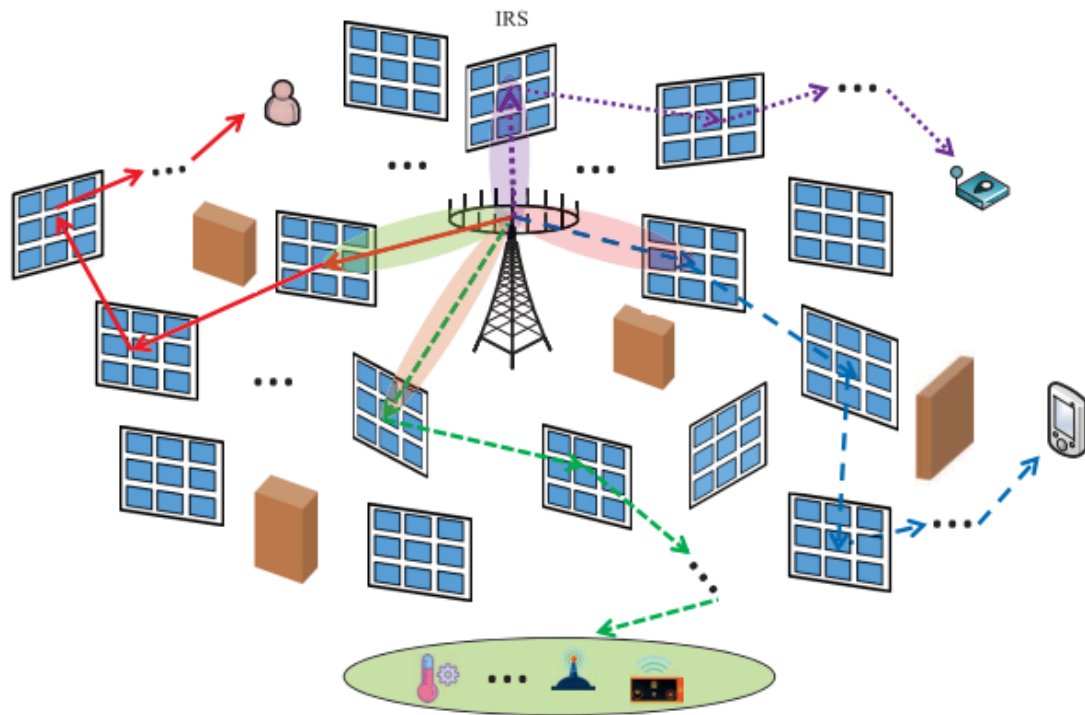


Figure 3.6 : Environnement radio intelligent et reconfigurable avec des IRS massifs et des réflexions de signal multi-hop « multi-sauts » [3].

3.3.2 Dans les systèmes satellitaires

L'utilisation des surfaces intelligentes reconfigurables au sein des systèmes satellitaires suscite un intérêt croissant, notamment dans les réseaux de satellites géostationnaires (GEO) et aussi en orbite basse (LEO), qui sont certainement appelés à jouer un rôle pivot dans la couverture globale des futurs réseaux 6G. Les IRS permettent d'améliorer la qualité du lien satellite-sol tout en réduisant la puissance de transmission requise, mais aussi en augmentant la flexibilité du faisceau. Plusieurs configurations ont été étudiées à cet égard. Dans le cas des architectures GEO, l'IRS peut être placé soit sur certains satellites, soit sur certaines stations terrestres, dont le déphasage est optimisé grâce à des algorithmes de recherche directe (Mesh Adaptive Direct Search, etc.) de manière à maximiser la capacité du canal associé. D'autres recherches ont porté sur les architectures hybrides IRS-LEO, dans lesquelles les IRS sont déployées aussi bien au sol que sur les satellites, avec optimisation conjointe du beamforming actif et passif pour maximiser les performances. En parallèle, certaines études se sont intéressées à l'impact du positionnement et de l'orientation des IRS, à l'augmentation du nombre d'éléments réfléchissants, ainsi qu'à la couverture offerte par des déploiements multi-IRS. Des approches par géométrie stochastique ont également permis de modéliser les

performances de réseaux satellitaires hétérogènes intégrant UAVs, stations terrestres et IRS, afin de calculer la probabilité d'interruption et d'identifier la densité d'IRS nécessaire pour garantir la connectivité.

Enfin, les communications inter-satellites à très haute fréquence (bande THz) ont également bénéficié de l'apport des IRS. Ces méthodes permettent de réduire les pertes dues à la propagation dans l'espace, et les résultats montrent une amélioration du taux d'erreur binaire. Toutefois, l'optimisation conjointe des ressources dans un contexte en mouvement rapide reste un défi ouvert notamment pour la synchronisation des faisceaux, et l'estimation du canal [57].

3.3.3 Dans les systèmes de sécurité

La sécurité des réseaux sans fil est d'une importance cruciale, car les réseaux sans fil sont de plus en plus utilisés pour une grande variété d'applications sensibles à la sécurité, y compris, mais sans s'y limiter, la banque, les réseaux sociaux et la surveillance environnementale.

Récemment, il y a eu un intérêt croissant pour le développement de la transmission de données sécurisée basée sur les propriétés physiques du canal sans fil (d'où le nom de sécurité de couche physique). L'utilisation des RIS offre un mécanisme radicalement nouveau dans lequel l'environnement de propagation autour des nœuds non sécurisés est manipulé pour prévenir les fuites potentielles d'informations et garantir la sécurité du réseau. Cela est réalisé en transformant intelligemment ou en recyclant les signaux existants en programmant les propagations du canal sans fil pour améliorer les signaux pour les utilisateurs légitimes et annuler les signaux pour les espions. Mathématiquement, l'intégration des RIS avec la sécurité de couche physique engendre de nouveaux modèles de communication, et donc de nouveaux problèmes d'optimisation. Ces problèmes sont généralement non convexes et difficiles à résoudre.

En tant que tel, il est urgent de développer de nouvelles techniques d'optimisation pour résoudre ces problèmes. De plus, étant donné que le retard et l'interférence dans le système peuvent entraîner une acquisition de canal en cascade obsolète, il devient crucial de caractériser la performance de la sécurité de la couche physique assistée par RIS sous des informations d'état de canal obsolètes [58].

3.4 Critères d'équité dans l'allocation des ressources

Dans les systèmes de communication assistés par IRS, il est crucial de ne pas seulement viser la maximisation des performances globales (débit, couverture, sécurité), mais aussi

d'assurer une répartition équitable des ressources entre les utilisateurs. Cette considération est particulièrement importante dans des contextes multi-utilisateurs où les conditions de canal sont hétérogènes. Pour quantifier et guider cette équité, deux outils analytiques sont fréquemment utilisés : l' **α -fairness** comme cadre d'allocation, et l'**indice de Jain** comme mesure d'évaluation.

Le concept d' **α -fairness** repose sur une fonction d'utilité paramétrée par α , permettant de réguler le niveau d'équité dans l'allocation :

$$U(x_i) = \begin{cases} \frac{x_i^{1-\alpha}}{1-\alpha}, & \text{si } \alpha \neq 1 \\ \ln(x_i), & \text{si } \alpha = 1 \end{cases} \quad (3.15)$$

Où x_i est la ressource (par exemple, le débit ou l'énergie) allouée au $i^{\text{ème}}$ utilisateurs. En fonction de la valeur de α , différentes politiques d'équité sont obtenues :

$\alpha = 0$: maximisation du débit total (efficacité sans équité),

$\alpha = 1$: proportional fairness, équilibre entre efficacité et équité,

$\alpha \rightarrow \infty$: max-min fairness, priorité aux utilisateurs les moins servis.

Ce cadre est particulièrement pertinent pour les IRS, où l'optimisation des coefficients de réflexion doit souvent s'adapter à des contraintes d'équité entre utilisateurs (en milieu urbain dense, en zone rurale ou dans des scénarios sécurisés).

Pour mesurer l'équité obtenue, l'**indice de Jain**, fournit une métrique normalisée indépendante des unités de mesure :

$$J(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (3.16)$$

Où n est le nombre total d'utilisateurs et x_i la ressource allouée à chacun. Cet indice varie entre $\frac{1}{n}$ (équité minimale) et 1 (équité parfaite). Il permet d'évaluer, a posteriori, l'impact réel d'une stratégie de configuration d'IRS sur l'équité entre utilisateurs.

Ainsi, ces outils jouent un rôle essentiel dans la conception de politiques de contrôle des IRS, en garantissant non seulement une performance élevée, mais aussi une répartition équitable des gains dans l'environnement réseau [59].

Tableau 3. 1 : Comparaison des métriques d'équité : Indice de Jain vs. Alpha-Fairness dans les réseaux IRS-assistés

Critère	Indice de Jain	Alpha-Fairness α
Objective	Mesurer l'équité a posteriori	Optimiser l'allocation a priori
Flexibilité	Applicable à tout métrique	Contrôlable via α
Complexité	Faible (calcul direct)	Élevée (optimisation conjointe IRS)
Scénario IRS idéal	Diagnostic rapide (ex. QoS hétérogène)	Conception de protocoles (ex. 6G)

3.5 Le scénario adopté dans la partie pratique

3.5.1 Définition d'un système sub-6GHz assistée par IRS

Les systèmes de communication sans fil opérant dans la bande **sub-6 GHz**, en particulier autour de 3,5 GHz, jouent un rôle central dans les déploiements 5G en raison de leur bon compromis entre portée, capacité et pénétration dans les environnements urbains. Toutefois, malgré ces avantages, ces systèmes restent sensibles aux obstructions, aux phénomènes de diffraction et aux zones d'ombre radio, notamment en l'absence de ligne de vue directe (LoS). Pour pallier ces limitations, l'intégration d'une surface intelligente reconfigurable (IRS) s'impose comme une solution efficace. En contrôlant dynamiquement la réflexion des ondes incidentes, l'IRS permet de façonner le canal de propagation en redirigeant les signaux vers des zones mal desservies, améliorant ainsi la couverture, la qualité de service et l'efficacité spectrale du système sub-6 GHz.

Dans notre travail pratique nous avons étudié l'implémentation d'IRS dans un système sub-6 GHz dans deux cas, le premier simple avec un seul utilisateur et pour le deuxième en ajoutant plusieurs utilisateurs pour un cas plus réaliste.

3.5.2 Cas Mono-Utilisateur :

La première simulation se concentre sur le cas le plus fondamental : une liaison point-à-point entre une station de base (BS) et un utilisateur unique (UE), dans un environnement Sub-6GHz.

Le travail consiste à simuler et analyser un système de communication sans fil en environnement single-user, où une station de base (BS) communique avec un utilisateur via deux chemins : un lien direct et un lien indirect passant par une surface intelligente réfléchissante (IRS). La simulation intègre la modélisation des canaux en espace libre pour la transmission BS→IRS et IRS→User, tandis que le lien direct est étudié sous des conditions idéales (LOS) et réelles (NLOS avec shadowing). Deux approches de gestion de l'IRS sont comparées : l'une utilisant des phases aléatoires et l'autre des phases optimisées pour compenser le déphasage, permettant ainsi d'améliorer le SNR et la capacité. En outre, le modèle évalue l'impact des paramètres géométriques, du nombre d'éléments IRS et des contraintes énergétiques sur la puissance requise et l'efficacité énergétique globale, montrant que l'optimisation du lien via IRS peut significativement compenser les dégradations du lien direct dans des environnements défavorables.

L'objectif de cette simulation est de caractériser les gains de performance fondamentaux apportés par une IRS. Nous cherchons à :

- **Comparer** la performance d'une liaison directe BS-UE, dans des conditions de bonne visibilité (LOS) et d'obstruction (NLOS avec shadowing), à celle d'une liaison indirecte assistée par une IRS.
- **Quantifier** l'impact du nombre d'éléments de l'IRS (N) sur la qualité du signal reçu.
- **Évaluer** l'importance capitale de l'optimisation des phases de l'IRS en comparant un contrôle intelligent à une configuration aléatoire.
- **Analyser** les gains en termes d'efficacité énergétique et de puissance de transmission requise.

Voici maintenant la présentation théorique du modèle de système avec les équations mathématiques utilisées dans la simulation

A) Modèle de canal et pertes de propagation

La puissance d'un signal reçu est inversement proportionnelle à la distance qu'il parcourt. Pour les liaisons en visibilité directe (BS-IRS et IRS-UE), nous utilisons le modèle de propagation en espace libre (Free-Space Path Loss, FSPL). La perte de puissance en dB est donnée par [62] :

$$PL_{FSPL}(dB) = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right) \quad (3.17)$$

Où d est la distance, f est la fréquence, et c est la vitesse de la lumière. On a utilisé une formule normalisée pratique pour les distances en km et les fréquences en GHz :

$$PL(dB) = 20 \log_{10}(d (km)) + 20 \log_{10}(f (GHz)) + 92.4 \quad (3.18)$$

Pour la liaison directe BS-UE obstruée (NLOS), un modèle de shadowing log-normal est ajouté pour représenter l'atténuation due à des obstacles. La perte de propagation devient :

$$PL_{NLOS}(dB) = PL_{LOS}(dB) + L_{obs} + X\sigma \quad (3.19)$$

Où L_{obs} est une perte fixe due à un obstacle majeur (ex : 40 dB dans le code) et $X\sigma$ est une variable aléatoire gaussienne de moyenne nulle et d'écart-type σ (8 dB dans le code), modélisant les variations aléatoires du signal.

B) Canal de communication assisté par IRS

La liaison via l'IRS est un canal en cascade. Le canal effectif de bout en bout, h_{eff} , est la somme des contributions de chaque élément de l'IRS. En supposant un fading de Rayleigh pour les canaux, le canal BS-IRS est un vecteur $h_{BI} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ et le canal IRS-UE est un vecteur $h_{IU} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$. Le canal effectif est alors :

$$h_{eff} = h_{IU}^T \Phi h_{BI} = \sum_{n=1}^N h_{IU,n} e^{j\theta_n} h_{BI,n} \quad (3.20)$$

Où $\Phi = \text{diag}(e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_N})$ est la matrice diagonale des déphasages appliqués par IRS. [46]

C) Optimisation des phases de l'IRS

Pour maximiser la puissance du signal reçu, il faut que toutes les contributions des éléments s'additionnent de manière cohérente (en phase). La condition optimale est d'aligner la phase de chaque chemin réfléchi. Le déphasage θ_n de l'élément n doit compenser la phase du canal combiné qu'il traverse. L'optimisation est donc [46]:

$$\theta_n^* = -\arg(h_{IU,n} h_{BI,n}) \quad (3.21)$$

Avec cette optimisation, le module du canal effectif devient la somme des modules, maximisant le gain : $|h_{eff}| = \sum_{n=1}^N |h_{IU,n} h_{BI,n}|$.

D) Métriques de performance

Les métriques clés évaluées sont :

- **Rapport Signal sur Bruit (SNR)** : $SNR = \frac{P_t \cdot G_{BF} \cdot |h_{eff}|^2 \cdot PL}{\sigma_{noise}^2}$, où P_t est la puissance de transmission, G_{BF} est le gain de beamforming à la BS, PL est la perte de propagation linéaire et σ_{noise}^2 est la puissance du bruit.
- **Capacité spectrale (Shannon)** : $C = BW \cdot \log_2(1 + SNR)$, donnant le débit binaire maximal théorique.
- **Capacité ergodique** : Elle est calculée en utilisant la formule de Shannon, moyennée sur un grand nombre de réalisations de canal (simulation de Monte Carlo) pour refléter la performance moyenne à long terme. $C_{ergodique} = \mathbb{E}[B \cdot \log_2(1 + SNR)]$
- **Efficacité énergétique (EE)** : $EE = \frac{C}{P_{total}}$, où $P_{total} = P_t + P_{BS} + N p_{IRS}$ inclut la puissance consommée par le BS et les éléments de l'IRS.

3.5.3 Cas Multi-Utilisateurs

Cette seconde simulation étend l'analyse à un scénario plus réaliste où une station de base (BS) et une surface intelligente reconfigurable (IRS) desservent simultanément plusieurs utilisateurs répartis dans l'espace.

Le système étudié met en œuvre un réseau multi-utilisateurs dans lequel la BS communique avec plusieurs utilisateurs en s'appuyant sur deux types de canaux : un lien direct BS-utilisateur, affecté par la distance, la perte de propagation et le shadowing, simulant ainsi des conditions réelles où des obstacles ou des interférences peuvent dégrader la qualité du signal et un lien indirect via une IRS placée stratégiquement dans l'environnement, qui réfléchit et optimise le signal émis par la BS.

Deux approches sont envisagées dans cette configuration : une optimisation individuelle de l'IRS, où chaque utilisateur bénéficie d'un réglage de phase spécifique pour maximiser le signal réfléchi, et une approche hybride combinant le signal direct et la contribution améliorée par l'IRS, à l'aide d'un vecteur de phase commun optimisé selon une métrique d'équité (alpha

fairness), afin d'améliorer à la fois les performances moyennes et l'équité entre utilisateurs. Le déroulement de la communication comprend l'émission du signal par la BS, équipée de plusieurs antennes et appliquant un beamforming avec une puissance et une bande passante définies, la propagation du signal à la fois directement vers les utilisateurs et vers l'IRS qui le réfléchit après ajustement de phase, et enfin la réception, où chaque utilisateur capte une combinaison du signal direct et réfléchi (dans le scénario hybride). Les performances sont évaluées en termes de SNR et de capacité pour mesurer la qualité du lien individuel ainsi que la performance globale du système, à travers des métriques telles que le débit total (sum-rate) et l'équité.

L'introduction de multiples utilisateurs modifie la nature du problème, puisqu'il ne s'agit plus seulement de maximiser la performance d'un seul lien, mais bien d'optimiser collectivement la performance du réseau. Les objectifs principaux consistent donc à modéliser un système multi-utilisateur combinant canal direct et canal assisté par IRS, à implémenter un algorithme d'optimisation des phases de l'IRS tenant compte de l'ensemble des utilisateurs, à évaluer les performances globales comme le sum-rate, et enfin à analyser l'équité pour s'assurer que l'IRS ne favorise pas certains utilisateurs au détriment des autres.

Voici maintenant les métriques qui sont ajoutées par rapport au modèle précédent :

A) Modèle de système multi-utilisateurs

Le signal reçu par l'utilisateur k est la superposition du signal provenant du chemin direct BS-UE et du chemin réfléchi BS-IRS-UE. En supposant une diffusion simple (broadcast) depuis la BS, le canal effectif pour l'utilisateur k est :

$$h_{k,total} = h_{k,direct} + h_{k,IU}^T \Phi h_{BI} \quad (3.22)$$

La principale difficulté réside dans le fait que la matrice de phase Φ est commune à tous les utilisateurs. Une configuration Φ qui est optimale pour un utilisateur k sera probablement sous-optimale pour un utilisateur j .

B) Problème d'optimisation conjointe

L'objectif est de trouver la matrice de phase Φ qui maximise une fonction d'utilité du système. Une fonction commune est le débit somme (sum-rate) :

$$\max_{\Phi} \sum_{k=1}^K R_k = \sum_{k=1}^K BW \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_t |h_{k,total}|^2}{\sigma_{noise}^2} \right) \quad (3.23)$$

Ce problème est non-convexe et difficile à résoudre de manière optimale (NP-hard). Par conséquent, on a recours à des algorithmes heuristiques ou itératifs pour trouver une bonne solution en un temps raisonnable.

C) Algorithme d'optimisation et équité

La 2^e partie implémente un algorithme de recherche locale (ou de descente par coordonnées) dans la fonction `optimize_IRS_phases_local`. L'idée est d'optimiser la phase de chaque élément de l'IRS, un par un, en gardant les autres fixes. Pour chaque élément n , l'algorithme teste toutes les phases possibles (selon la quantification) et choisit celle qui maximise la fonction d'utilité globale. Ce processus est répété pour tous les éléments, et plusieurs itérations globales sont effectuées jusqu'à convergence.

Pour gérer le compromis entre performance totale et équité, le concept d'**alpha-fairness** est utilisé.

La fonction d'utilité est :

$$(R) = \sum_k \frac{R_k^{1-\alpha}}{1-\alpha} \quad (3.24)$$

- Si $\alpha = 0$, on maximise le débit somme (potentiellement inéquitable).
- Si $\alpha = 1$, on tend vers une maximisation de l'équité (max-min fairness), où l'on cherche à améliorer le débit de l'utilisateur le plus défavorisé.
- Une valeur intermédiaire comme $\alpha = 0.5$ (utilisée dans le code) cherche un équilibre entre les deux.

L'équité est mesurée a posteriori par l'indice de Jain [59] :

$$J(R_1, \dots, R_K) = \frac{(\sum_{k=1}^K R_k)^2}{K \cdot \sum_{k=1}^K R_k^2} \quad (3.25)$$

Un indice de 1 signifie une équité parfaite (tous les utilisateurs ont le même débit), tandis qu'un indice proche de $1/K$ indique une forte inéquité.

D) Nouvelle métrique de performance

- **Sum-Rate** : La somme des débits de tous les utilisateurs, mesurant l'efficacité spectrale totale du système.

$$R_{sum} = \sum_{k=1}^K C_k \quad (3.26)$$

- **Indice de Fairness de Jain** : Une métrique pour quantifier l'équité de la distribution des débits.

$$J(R_1, \dots, R_k) = \frac{(\sum_{k=1}^K R_k)^2}{K \cdot \sum_{k=1}^K R_k^2} \quad (3.27)$$

Cet indice varie de $1/K$ (pire cas, un seul utilisateur a tout le débit) à 1 (fairness parfaite, tous les utilisateurs ont le même débit).

3.6 Perspective et amélioration future

3.6.1 Dans les réseaux future 6G

Les réseaux de sixième génération (6G) visent à atteindre les caractéristiques d'une connectivité omniprésente, ultra-fiable et à très faible latence, dans la limite d'une consommation énergétique minimale. D'une façon générale, les surfaces intelligentes reconfigurables (IRS) apparaissent comme un élément de choix pour les futures architectures réseau, capable de transformer l'environnement de propagation en un canal contrôlable et programmable. Contrairement aux architectures classiques, dans lesquelles les objets passifs agissent seulement comme des obstacles, les IRS permettent d'orienter les signaux radio de façon intelligente afin d'améliorer la couverture et d'atténuer les interférences et les pertes dues à la dépendance à des stations de base actives [37]. Grâce à cette capacité, les IRS sont une

solution innovante pour les scénarios de communication complexes typiques des réseaux 6G, tels que l'environnement ultra-dense, les communications pour l'Internet des objets (IoT) et le réseau de véhicules autonomes, Ou encore le réseau de véhicules autonomes. En adaptant dynamiquement les propriétés électromagnétiques de leur surface, les IRS permettent d'augmenter l'efficacité spectrale et énergétique du réseau, tout en maintenant une faible latence de communication.

De plus, leur déploiement à large échelle soulève des problèmes importants à traiter en termes de gestion de la mobilité, de coordination inter-cellulaire et d'allocation dynamique des ressources [60]. Ces défis nécessitent une refonte partielle des protocoles réseau pour permettre une orchestration intelligente et distribuée des IRS dans un environnement 6G hautement hétérogène.

3.6.2 Intégration de deep learning avec IRS

L'optimisation en temps réel des IRS (Intelligent Reflecting Surfaces) fonde sur une connaissance exacte du canal de communication sans fil (CSI) associée à un réglage adapté des coefficients de réflexion. Les techniques classiques d'estimation du canal rencontrent souvent des limitations en termes de complexité et de robustesse face à la dynamique du canal alors que les méthodes par deep learning apparaissent en revanche parfaitement adaptées en apprenant directement les relations non linéaires entre la configuration des IRS, le canal et la performance du système. Des architectures telles que CNN (Convolutional Neural Networks) ou DNN (Deep Neural Networks) ont pu être exploitées pour réaliser une estimation du CSI ou pour anticiper les réglages à réaliser pour optimiser l'IRS, avec une réduction des besoins en signalisation ainsi qu'un abaissement de la latence [61].

De plus, Le deep learning permet aussi d'envisager des schémas adaptatifs pour les cas complexes, par exemple la mobilité ou la variation rapide du canal, en exploitant des modèles entraînés hors ligne ou en ligne. Cependant, ces approches posent encore des défis liés à la quantité de données nécessaires, au surapprentissage et à l'interprétabilité des décisions prises.

3.7 Conclusion

Ce chapitre a permis d'analyser trois scénarios clés illustrant l'apport des surfaces intelligentes reconfigurables (IRS) dans l'optimisation des communications sans fil : la connectivité en zones rurales, l'amélioration de la couverture en milieu urbain dense, et le renforcement de la sécurité physique des transmissions. Pour chaque cas, des architectures adaptées et des modèles précis ont été proposés, montrant que les IRS permettent une reconfiguration passive du canal efficace et peu énergivore.

Les modélisations présentées ont permis de mettre en évidence les gains possibles en couverture, en fiabilité et en efficacité énergétique, tout en soulignant l'importance de l'optimisation des phases de réflexion et du beamforming passif. Les travaux de simulation, à la fois en contexte mono-utilisateur et multi-utilisateurs, ont illustré la pertinence de l'approche IRS, notamment pour équilibrer la performance globale et l'équité entre les utilisateurs.

On a aussi traité des perspectives d'intégration des IRS dans les systèmes 6G ont également été abordées, notamment via l'optimisation du beamforming et l'estimation du canal à travers les moyens du deep learning.

Enfin, ces travaux confirment que les IRS constituent une technologie centrale pour les réseaux du futur, mais posent encore des questions ouvertes de déploiement, de contrôle intelligent et à la coordination multi-utilisateurs.

CHAPITRE 4 : Résultats et simulations

4.1 Introduction de la partie pratique

Cette section constitue le cœur expérimental de notre mémoire. Elle propose de translater les concepts théoriques relatifs aux surfaces intelligentes reconfigurables (IRS) vers la quantification de performances par simulations. Le but étant principalement de démontrer et de quantifier ce que peut apporter les IRS dans un système de communication sans fil 5G, en démarrant par un scénario simple à utilisateur unique, avant d'évoluer vers un environnement multi-utilisateurs plus complexe et plus réaliste.

Les simulations sont des outils indissociables de l'ingénierie des télécommunications. Elles permettent de modéliser des phénomènes physiques et des systèmes complexes dans un environnement contrôlé, reproductible et peu onéreux. Pour les IRS dont le déploiement physique est encore en émergence, la simulation est le moyen adéquat pour évaluer l'impact de divers paramètres (nombre d'éléments, position, algorithme de contrôle) sur les performances globales du réseau avant un déploiement réel.

L'intégralité des modèles et simulations exposés dans ce chapitre a été réalisée et mise en œuvre dans l'environnement de calcul numérique **MATLAB R2021a**, outil largement répandu au sein de la communauté scientifique et industrielle, qui donne accès à des bibliothèques puissantes pour la simulation de chaînes de communication, le calcul matriciel, la visualisation de données, le tout adapté à notre étude.

Dans ce chapitre la simulation du système se divise en deux parties : d'abord un cas **mono-utilisateur**, puis un cas **multi-utilisateur**.

4.2 Scénario 1 : Mono-Utilisateur

Ce scénario étudie un système simplifié avec un seul utilisateur afin d'évaluer l'effet de l'IRS sur la qualité du lien sans interférence. Il permet d'analyser l'impact de l'optimisation des phases sur le gain de signal dans un contexte isolé.

4.2.1 Paramètres de simulation

Le tableau suivant résume les paramètres clés utilisés dans la 1^{er} partie, avec une justification pour chaque valeur.

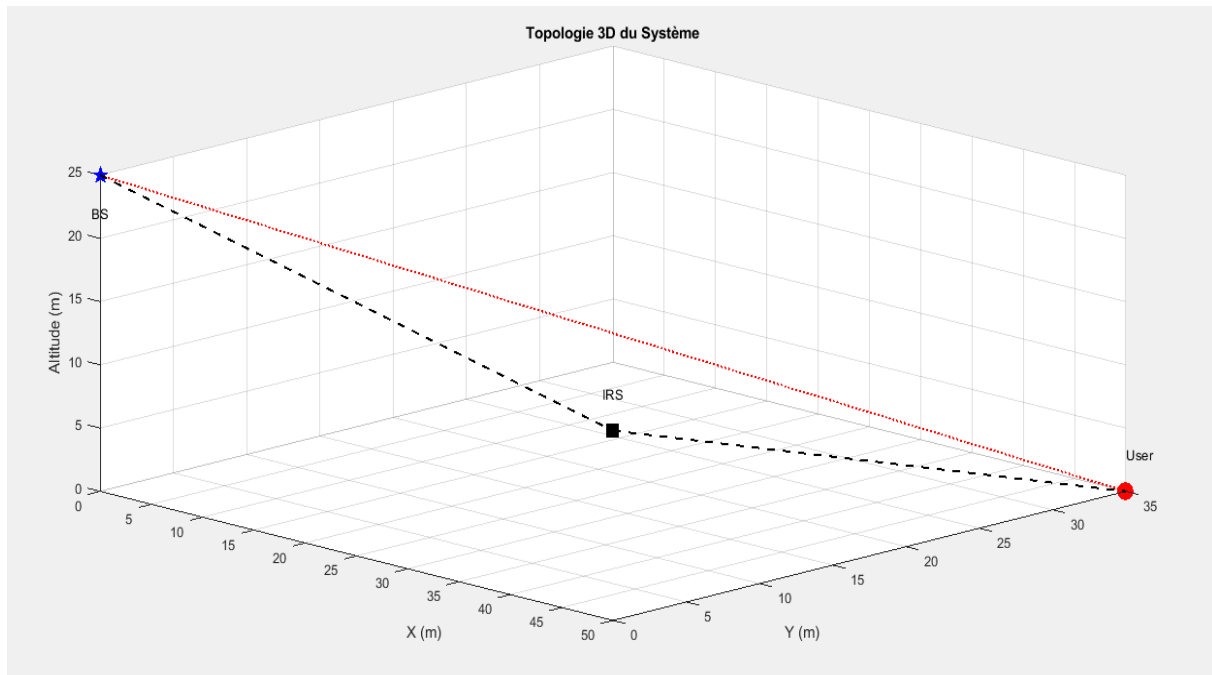
Tableau 4. 1 : les paramètres de simulation de partie I

Paramètres	Valeur	Justification
Antennes BS	8	Configuration MIMO typique pour une station de base 5G.
Éléments IRS	128	Un nombre significatif pour démontrer un gain notable.
Bande Passante	20 MHz	Largeur de canal standard en 4G/5G.
Fréquence porteuse	3.5 GHz	Bande de fréquence "pionnière" pour la 5G en Sub-6GHz.
Puissance d'émission	20 dBm (100 mW)	Puissance d'émission typique pour une petite cellule (small cell).
Distance BS-IRS	50 m	Placement stratégique d'une IRS sur la façade d'un bâtiment.
Distance IRS-User	35 m (réf.)	Position d'un utilisateur dans la zone de couverture de l'IRS.
Puissance du Bruit	-92 dBm	Calculée à partir de la densité spectrale de bruit thermique (-174 dBm/Hz) et du facteur de bruit (6 dB).
Consommation BS	3 W	Valeur hypothétique pour la consommation statique de l'électronique de la BS.
Consommation / élément IRS	10 mW	Reflète la nature quasi-passive des éléments (consommation due au contrôle).

4.2.2 Résultats et interprétations

L'exécution de la première partie génère une série de figures qui illustrent quantitativement les bénéfices d'une liaison assistée par IRS. L'analyse des résultats de script est la suivante :

a) Topologie 3D du système

**Figure 4.1** : Topologie 3D du système

Cette figure présente la configuration spatiale utilisée dans la simulation. On y voit la station de base (BS) placée à 25 mètres de hauteur, l'utilisateur situé au sol (0 m) et l'IRS positionné au milieu, à 15 mètres de hauteur, le long du trajet entre la BS et l'utilisateur. Cette configuration illustre un scénario urbain typique, où l'IRS est installé par exemple sur la façade d'un bâtiment pour aider à la transmission du signal à un utilisateur dans la rue. Les lignes pointillées indiquent les liaisons physiques entre la BS et l'IRS ainsi qu'entre l'IRS et l'utilisateur, tandis qu'une ligne rouge en pointillés représente le lien direct entre la BS et l'utilisateur, qui peut être partiellement obstrué. Cette visualisation permet de bien comprendre comment sont calculées les distances et les pertes de signal dans la simulation.

b) Performances du lien direct (Sans IRS)

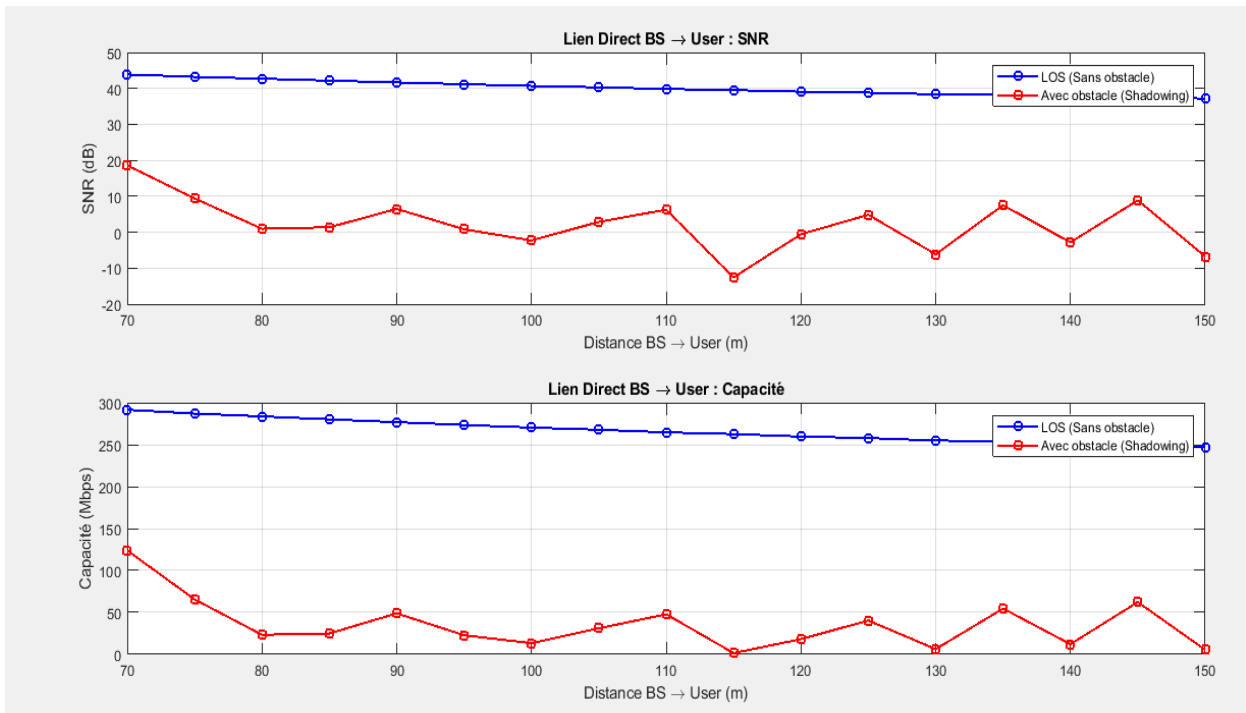


Figure 4.2 : comparaison des performances entre lien direct et avec obstacle

A) Pour la courbe « Lien Direct BS → User : SNR » : Cette figure montre comment le rapport signal sur bruit (SNR) change en fonction de la distance entre la station de base et l'utilisateur. On y voit deux scénarios distincts : dans le cas idéal, appelé LOS (Line Of Sight), le signal décroît régulièrement avec la distance simplement à cause de la perte naturelle du signal. En revanche, lorsqu'il y a des obstacles (shadowing), le SNR est plus faible pour une même distance, ce qui démontre que les obstacles dégradent la qualité de la liaison. La différence entre ces deux courbes permet de mesurer précisément l'impact des obstacles sur le signal et met en avant l'intérêt d'utiliser des dispositifs comme les IRS pour compenser ces pertes.

B) Pour la courbe « Lien Direct BS → User : Capacité » : Cette figure trace la capacité en Mbps de la liaison entre la station de base et l'utilisateur en fonction de la distance, en distinguant un scénario sans obstacle (LOS) d'un scénario avec obstacles (shadowing). On remarque que, dans un scénario idéal, la capacité est élevée lorsque l'utilisateur est proche, mais diminue progressivement avec la distance, car le SNR se dégrade. Quand il y a des obstacles, la capacité chute fortement, ce qui montre que ces obstacles réduisent considérablement le débit

de la liaison. Ce graphique souligne la nécessité d'installer des solutions comme l'IRS pour renforcer la transmission dans des environnements où le signal direct est affaibli.

c) Comparaison : lien direct obstrué vs lien assisté par IRS

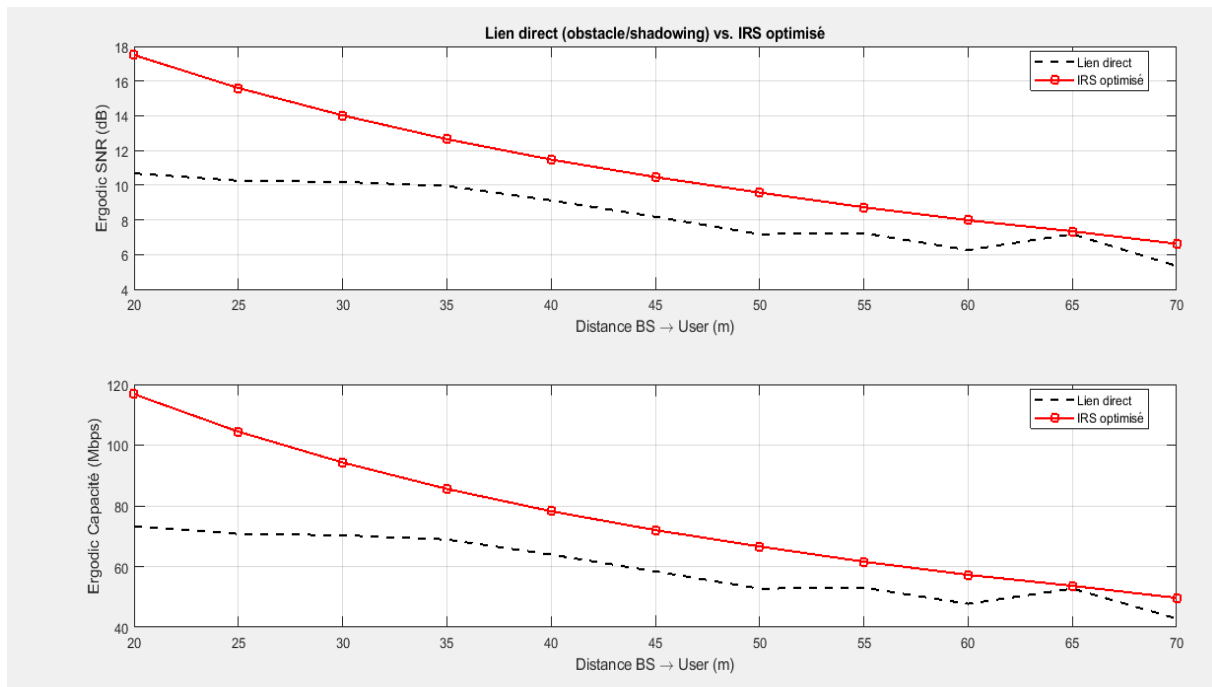


Figure 4.3 : comparaison de variation de SNR et Capacité en fonction de la distance entre BS et utilisateur pour LOS avec obstacle vs lien avec IRS

Cette figure compare le lien direct (avec obstacles, donc en shadowing) à une configuration où l'IRS est optimisé pour améliorer le signal. Elle est présentée en deux parties : une courbe montre le SNR ergodique en dB et l'autre indique la capacité ergodique en Mbps.

Les résultats montrent clairement que l'IRS optimisé offre un avantage considérable : pour le SNR, la courbe de l'IRS optimisé est bien plus élevée, surtout lorsque la distance augmente, prouvant que l'IRS compense efficacement les pertes dues aux obstacles. De la même manière, la capacité est meilleure avec l'IRS optimisé, atteignant des performances comparables à celles des liens directs en condition idéale.

En résumé, l'IRS permet d'obtenir une transmission plus robuste et uniforme sur diverses distances, ce qui promet pour améliorer la qualité des connexions dans des environnements difficiles.

d) Comparaison : IRS optimisée vs. IRS aléatoire

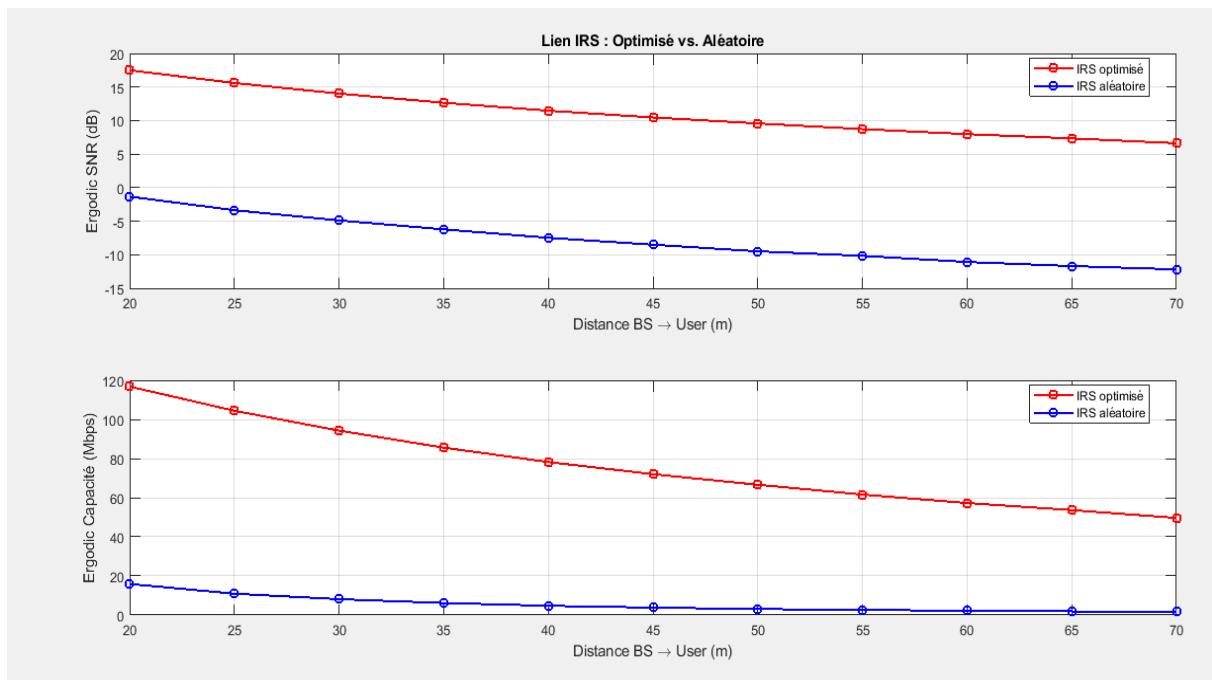


Figure 4.4 : comparaison de variation de SNR et Capacité en fonction de distance entre IRS et l'utilisateur pour IRS Aléatoire et Optimisé

Cette figure montre clairement que l'intérêt de l'IRS tient à son « intelligence ».

Le graphique compare la performance de deux configurations : dans l'une, les phases de l'IRS sont soigneusement optimisées pour maximiser le SNR, tandis que dans l'autre, les phases sont choisies de façon aléatoire, sans aucune optimisation. Les résultats indiquent que l'IRS optimisé obtient de meilleurs résultats, tant en termes de capacité ergodique qu'en SNR ergodique, que l'IRS aléatoire.

Autrement dit, pour exploiter pleinement le potentiel d'une IRS, il est essentiel d'ajuster ses phases de manière réfléchie et coordonnée. Cette observation plaide donc en faveur de l'utilisation d'algorithmes d'optimisation sophistiqués dans la conception des systèmes IRS.

e) Impact du nombre d'éléments (N) sur le SNR

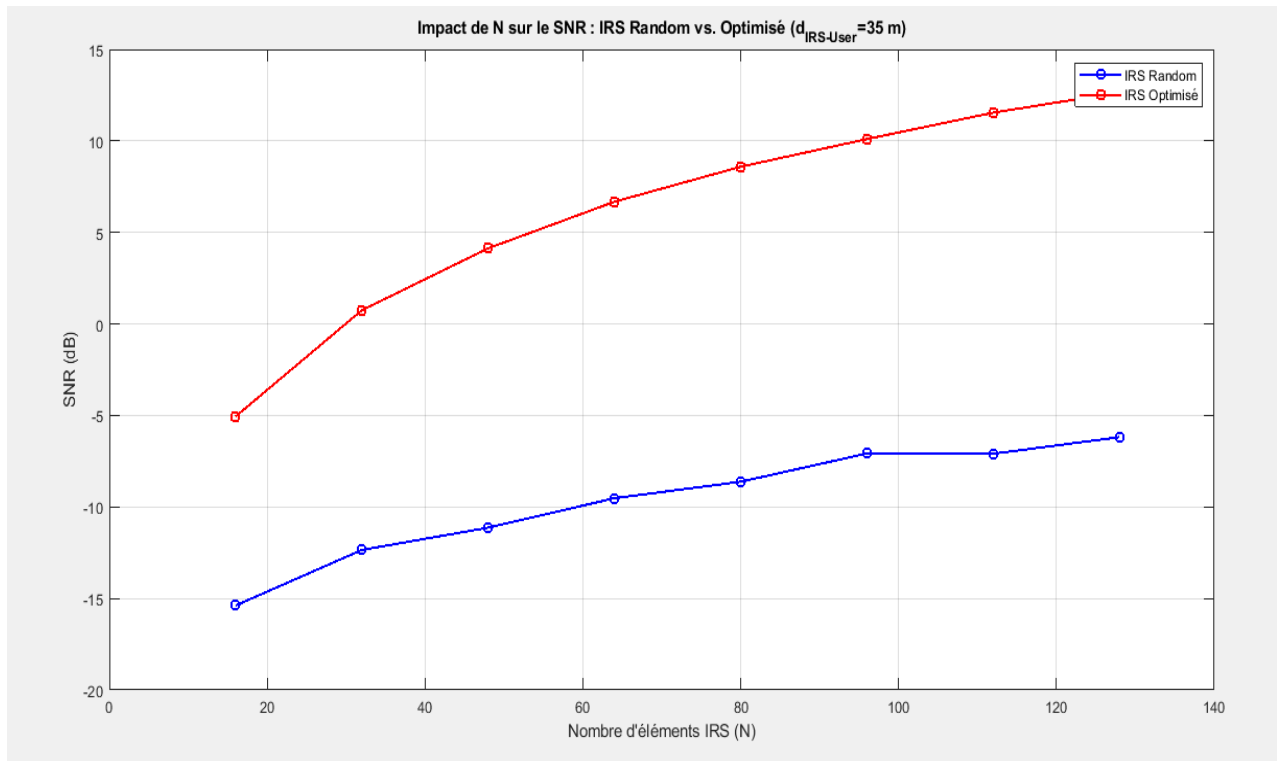


Figure 4.5 : comparaison ente IRS optimisé et IRS aléatoire du SNR en fonction de nombre d'éléments IRS

Cette figure étudie l'impact de la taille de l'IRS sur la performance du signal.

Concrètement, elle montre comment le SNR (exprimé en dB) évolue quand on augmente le nombre d'éléments de l'IRS, en comparant deux configurations : l'une où les phases sont optimisées pour focaliser le signal et l'autre où elles sont choisies de manière aléatoire.

On observe que, dans les deux cas, le SNR s'améliore avec un nombre croissant d'éléments, mais cette amélioration est nettement plus importante lorsqu'on utilise l'optimisation. Cela signifie qu'un grand nombre d'éléments peut aider à concentrer le signal de façon efficace seulement si les phases sont ajustées correctement.

En revanche, avec une configuration aléatoire, même si le nombre d'éléments augmente, le gain reste limité, ce qui souligne l'importance d'avoir une stratégie d'optimisation robuste pour obtenir des gains notables.

f) Analyse de l'efficacité énergétique (EE)

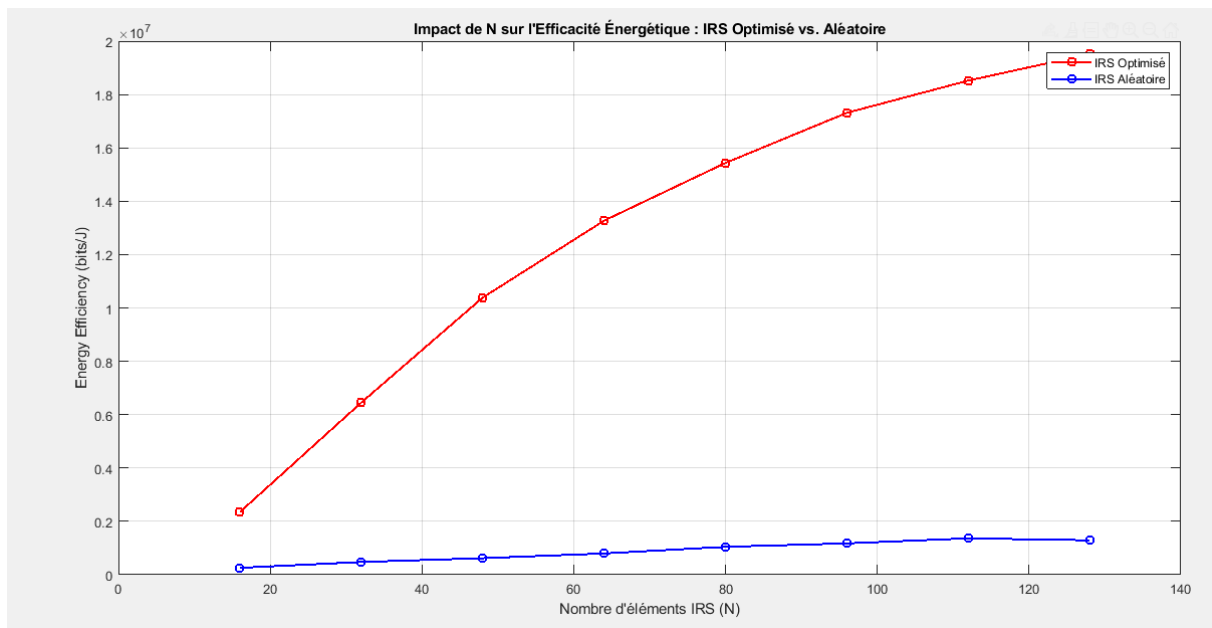


Figure 4.6 : Impact du Nombre d'Éléments IRS sur l'Efficacité Énergétique : IRS Optimisé vs. Aléatoire

Cette figure montre comment l'efficacité énergétique, mesurée en bits par Joule, évolue en fonction du nombre d'éléments de l'IRS.

On compare ici deux configurations : l'une où les phases des éléments sont optimisées et l'autre où elles sont choisies de manière aléatoire. Les résultats révèlent que l'optimisation permet d'obtenir une meilleure efficacité énergétique, et que cette efficacité s'améliore encore davantage en augmentant le nombre d'éléments. En d'autres termes, un IRS bien optimisé nécessite moins de puissance pour atteindre un débit donné.

Ce constat est particulièrement utile pour la conception de réseaux écoénergétiques, où il est crucial de maximiser les performances tout en réduisant la consommation d'énergie. Ainsi, le dimensionnement et l'optimisation des éléments IRS jouent un rôle déterminant dans l'amélioration globale de l'efficacité énergétique des systèmes de communication.

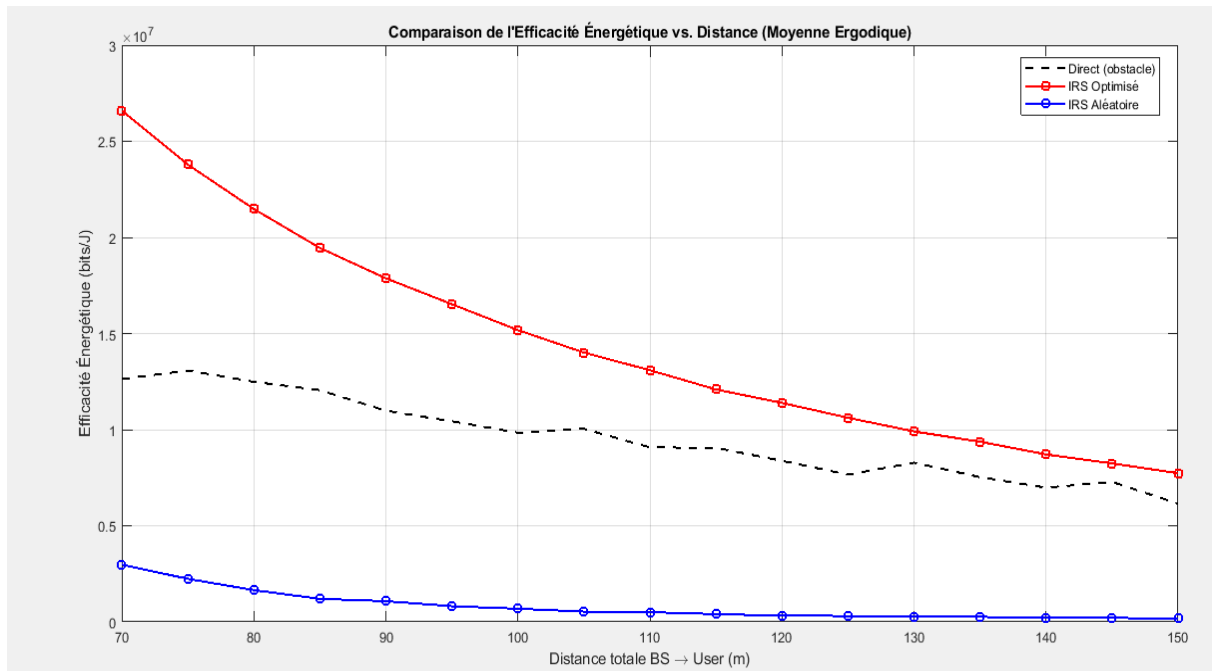


Figure 4.7 : Comparaison de l'efficacité énergétique vs distance « moyenne ergodique »

Cette figure présente l'efficacité énergétique (en bits par Joule) en fonction de la distance totale entre l'émetteur et l'utilisateur pour trois scénarios différents : un lien direct avec obstacle, un lien assisté par IRS optimisé et un lien assisté par IRS en mode aléatoire. On voit que pour le lien direct, la performance énergétique chute rapidement avec la distance, ce qui signifie qu'il faut consommer beaucoup plus d'énergie pour compenser la perte de signal due aux obstacles. En revanche, quand l'IRS est optimisé, l'efficacité énergétique reste plus stable et avantageuse sur de plus grandes distances, un résultat comparable à celui obtenu avec un IRS en mode aléatoire. Cela montre clairement que l'optimisation de l'IRS permet d'étendre la portée du système tout en gardant une consommation d'énergie raisonnable, un point crucial pour le design de réseaux modernes à haute densité et faibles consommations.

g) Analyse de la puissance de transmission requise

Ces figures illustrent l'un des avantages les plus concrets des IRS.

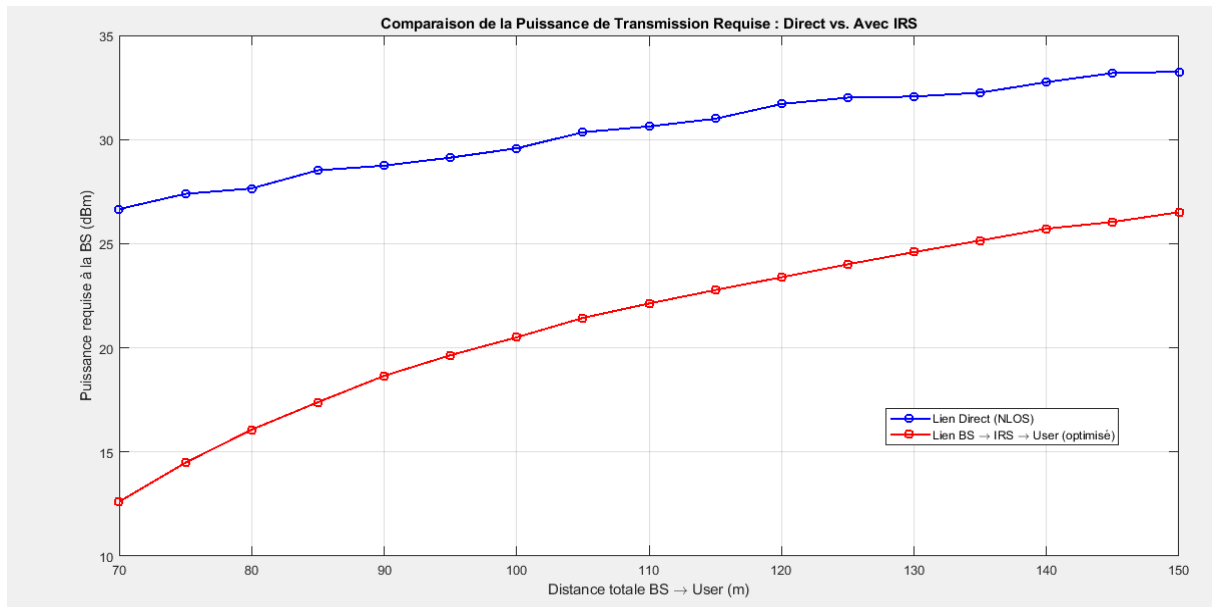


Figure 4.8 : Comparaison de la puissance de transmission requise : direct vs avec IRS

Le graphique compare la puissance d'émission requise par la station de base (BS), en dBm, en fonction de la distance totale entre la BS et l'utilisateur, pour deux scénarios : le lien direct en NLOS (utilisé en présence d'obstacles) et le lien passant par une IRS optimisée. Pour des distances égales, on constate que la puissance nécessaire pour atteindre une même performance (en termes de SNR ou de capacité) est sensiblement réduite lorsqu'on utilise l'IRS optimisé. Cela montre clairement que l'IRS peut réduire l'atténuation du signal provoquée par les obstacles et diminuer le besoin en amplification côté BS, menant à d'importantes économies en matière d'énergie et de coûts. En somme, cette optimisation via IRS permettrait aux opérateurs de réduire significativement la puissance de transmission tout en maintenant une qualité de lien optimale.

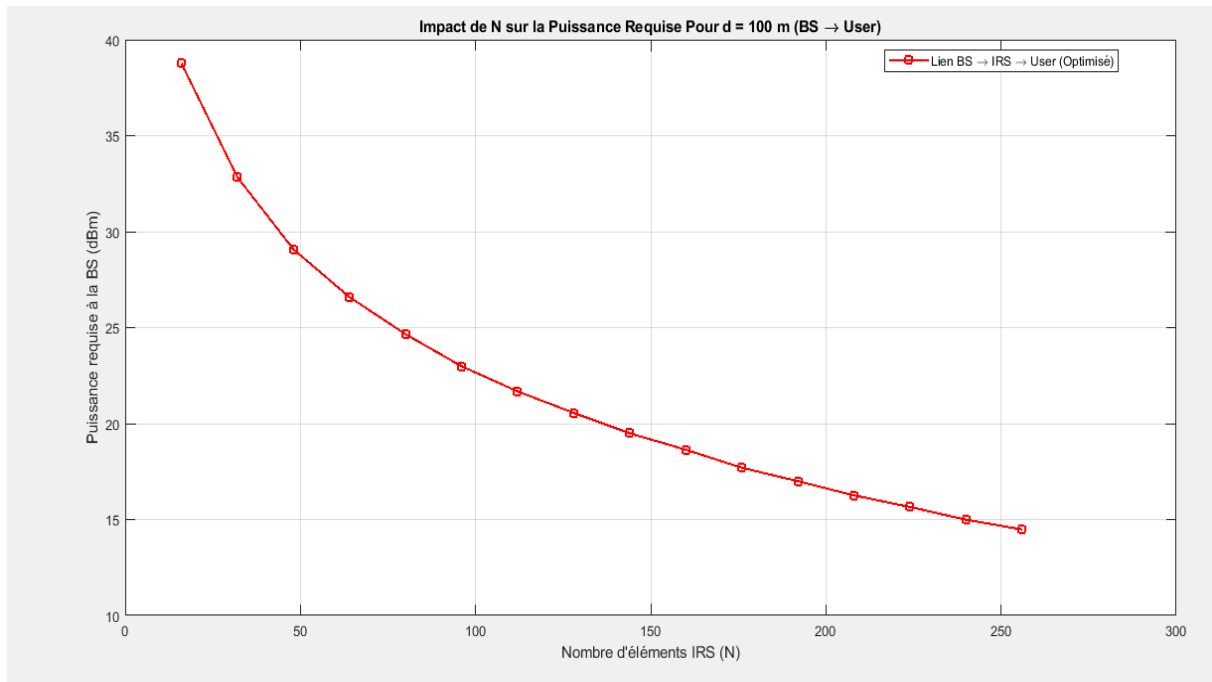


Figure 4.9 : Impact du Nombre d'éléments IRS sur la puissance requise pour $D = 100$ m (BS → User)

Ce diagramme se concentre sur l'influence du nombre d'éléments IRS (N) sur la puissance de transmission requise à la station de base, exprimée en dBm, pour une distance fixe de 100 m entre la BS et l'utilisateur. Il compare deux cas : le lien direct et le lien assisté par un IRS optimisé.

On remarque que, lorsque le nombre d'éléments augmente, la puissance nécessaire diminue nettement dans le cas de l'IRS optimisé. Cela signifie que, grâce à une optimisation soignée, l'IRS permet de réduire considérablement la charge en puissance sur la station de base. Par ailleurs, pour une distance de 100 m, l'utilisation d'un IRS optimisé offre des performances équivalentes, voire supérieures, avec une puissance bien inférieure comparée à une connexion directe dans un environnement NLOS. Ce constat est essentiel pour des applications pratiques où les contraintes de puissance sont fortes et où il est crucial de maintenir une bonne qualité de connexion sans consommer excessivement d'énergie.

En résumé, ce diagramme quantifie clairement l'impact positif de l'optimisation de l'IRS sur la réduction de la puissance de transmission, justifiant ainsi son déploiement dans les réseaux futurs.

Au-delà de ces interprétations, il convient d'observer que les études démontrent une cohérence avec les travaux récents relatifs aux IRS assistés en communication sans fil. Chaque graphique illustre comment une méthode optimisée peut non seulement améliorer le rapport signal-bruit et la capacité, mais également réduire la puissance requise tout en augmentant l'efficacité énergétique.

4.3 Scénario 2 : Multi-Utilisateurs

Ce scénario analyse un système avec plusieurs utilisateurs afin d'évaluer l'impact de l'IRS en présence d'interférences. Il met en évidence le rôle de l'optimisation conjointe pour améliorer le débit global et l'équité du service.

4.3.1 Paramètres de Simulation

Les paramètres RF sont similaires à la Partie 1 les ajouts clés pour la 2^e partie sont :

Tableau 4. 2 : les paramètres de simulation partie II

Paramètre	Valeur	Justification
Nombre d'utilisateurs	4	Un petit nombre pour une analyse claire des interactions.
Positions des UE	([8,3,0]; [45,-8,0]; [25, 15, 0] ; [65,20,0])	Positions variées pour créer un scénario hétérogène (un utilisateur proche du BS, un proche de l'IRS, un intermédiaire, un lointain).
Quantification Phase	2 bits (4 niveaux)	Modélise une contrainte matérielle réaliste où les déphaseurs ont une résolution finie.
Paramètre d'Équité	0.5	Recherche d'un compromis entre la somme des débits et l'équité.
Itérations d'Optimisation	50	Nombre d'itérations pour l'algorithme de recherche, assurant une convergence raisonnable.

4.3.2 Résultats et interprétation

a) Topologie 3D du système multi-utilisateurs

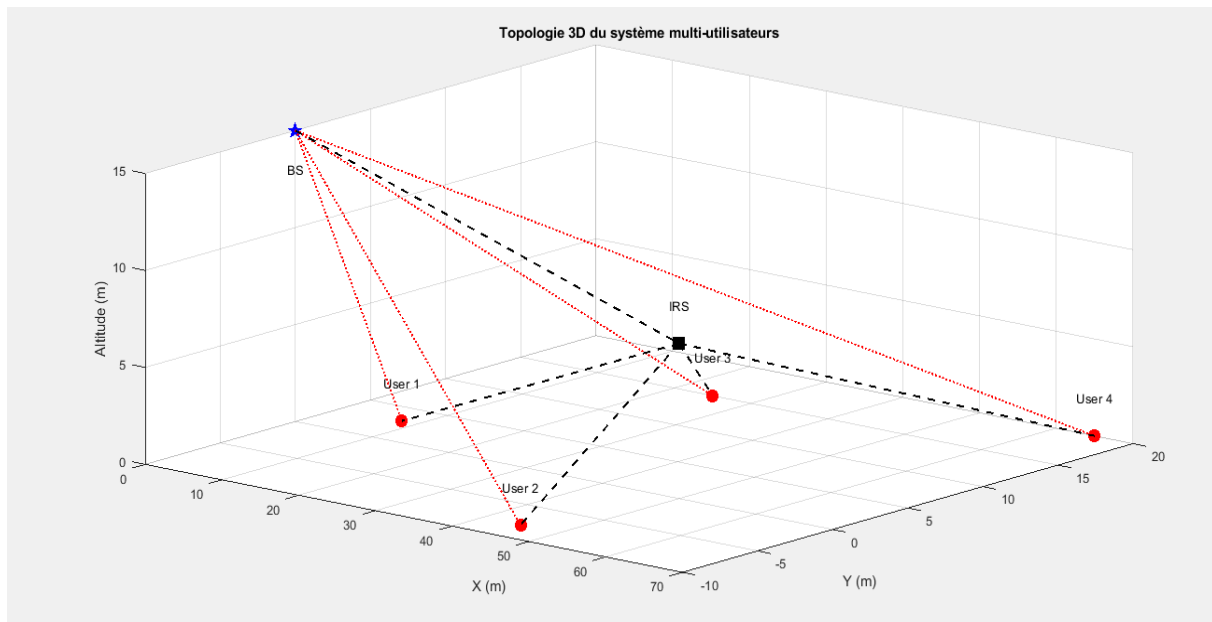


Figure 4.10 : Topologie du 2^{ème} partie

Cette illustration montre le nouveau scénario. Les éléments suivants sont positionnés de façon hétérogène : une BS, une IRS et quatre utilisateurs :

- **l'utilisateur 1**, relativement proche de la BS, devrait bénéficier d'un bon lien direct.
- **l'utilisateur 2**, plus éloigné de la BS, est cependant relativement proche de l'IRS et devrait pouvoir profiter de la réflexion.
- **l'utilisateur 3** est en position intermédiaire.
- **l'utilisateur 4**, le plus éloigné des deux entités, représentant le cas d'usage le plus difficile.

Cette répartition géographique servira à montrer les difficultés de l'allocation des ressources et la capacité de l'IRS à faire face à des conditions de canal différentielles, et sa capacité à contribuer à l'équité de l'ensemble du système.

b) Tableau de bord des performances multi-utilisateur.

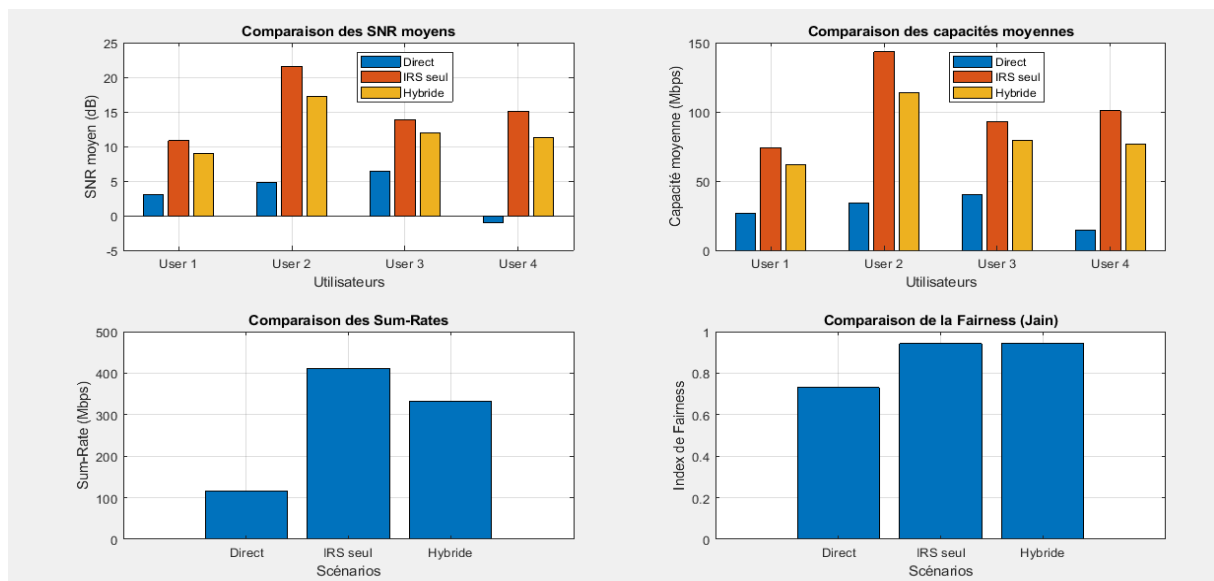


Figure 4.11 : Comparaison des performances des scénarios de communication Direct, IRS seul et Hybride

Cette figure composite fournit un ensemble d'enseignements riches pour le scénario étudié. Tout d'abord, le graphique compare la performance en termes de SNR moyen pour chaque utilisateur dans deux configurations. Dans le cas du lien direct, le SNR diminue avec la distance à cause de la perte de propagation et du shadowing, ce qui peut rendre le signal très faible dans des conditions défavorables. En revanche, dans la configuration hybride, l'ajout de la contribution de l'IRS, optimisée de manière collective, compense partiellement ces pertes, de sorte que pour la majorité des utilisateurs, le SNR moyen est supérieur, même si cet avantage dépend de la dégradation initiale du canal direct et de l'efficacité de l'algorithme d'optimisation.

Ensuite, la figure présente également une comparaison des capacités moyennes obtenues dans les mêmes configurations. On observe que, dans un lien direct, la capacité diminue rapidement avec l'augmentation de la distance et l'érosion du signal due aux obstacles, rendant parfois la connexion insuffisante pour certains utilisateurs. Par contre, en mode hybride, l'utilisation de l'IRS optimisé permet, grâce à une addition constructive, d'obtenir un niveau de capacité plus élevé. Cela montre que la combinaison du signal direct et de l'IRS permet de compenser les effets négatifs d'une propagation difficile et d'améliorer globalement le débit.

De plus, le graphique compare le débit global, le Sum Rate, entre un réseau utilisant uniquement le lien direct et un réseau qui intègre le lien hybride. La somme des débits est nettement meilleure dans le cas hybride, car la combinaison des deux voies de transmission

(directe et IRS) augmente la performance globale du réseau, même si des incohérences de phase peuvent parfois limiter l'amélioration individuelle.

Enfin, la comparaison de la répartition des débits à l'aide de l'indice de fairness (Jain) démontre que le mode hybride équilibre mieux les performances entre les utilisateurs. Alors que le lien direct montre une grande disparité — les utilisateurs proches de la BS obtenant de meilleures performances et ceux situés en périphérie en souffrant —, l'optimisation collective en mode hybride assure une distribution plus équitable des ressources, améliorant ainsi l'expérience globale du réseau.

En somme, cette figure composite illustre que l'approche hybride, qui combine le signal direct et une contribution IRS optimisée, permet non seulement d'augmenter le SNR et la capacité moyenne pour la majorité des utilisateurs, mais également d'améliorer le débit global et l'équité dans la répartition des ressources.

c) Impact de N sur le Sum-Rate

Cette dernière figure montre clairement que, dans un réseau multi-utilisateur, augmenter le nombre d'éléments de l'IRS a un effet positif très marqué sur la performance globale. En effet, le débit total (Sum-Rate) obtenu avec le lien direct reste constant car il n'est pas influencé par le nombre d'éléments, alors que le débit total des scénarios utilisant l'IRS (IRS seul ou hybride) augmente presque de manière linéaire avec N.

En d'autres termes, disposer de plus d'éléments permet d'accroître significativement la capacité globale d'une cellule multi-utilisateur, justifiant ainsi l'investissement dans des surfaces IRS plus grandes pour améliorer le rendement du système.

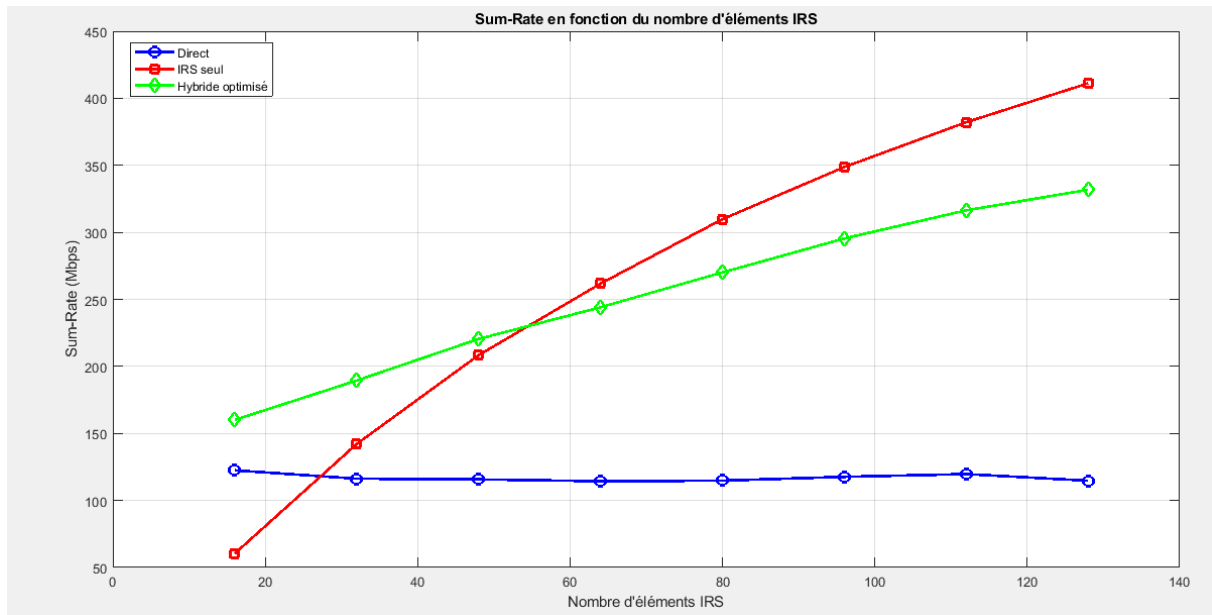


Figure 4.13 : Comparaison de l'impact de nombre d'éléments d'IRS sur le Sum-Rate pour les 3 cas (direct, IRS seul, hybride)

Résumé des résultats

Les résultats des simulations multi-utilisateurs confirment que l'intégration de l'IRS joue un rôle clé pour améliorer les performances du réseau. En effet, lorsque chaque lien est optimisé individuellement (cas IRS seul), on obtient la meilleure performance pour chaque connexion, tandis que l'approche hybride, qui combine le signal direct et celui de l'IRS, offre un compromis qui permet d'obtenir une meilleure équité globale, même si certains liens peuvent être légèrement moins performants.

De plus, l'étude montre que l'IRS aide à compenser la dégradation du signal due à la distance et aux effets de shadowing, et que l'augmentation du nombre d'éléments de l'IRS améliore fortement le débit total (Sum Rate) ainsi que la couverture du réseau.

En somme, ces résultats, cohérents avec ceux obtenus dans le scénario mono-utilisateur, soulignent que l'IRS est une solution innovante pour surmonter les limites des liaisons directes, tout en mettant en lumière les défis liés à l'optimisation multi-utilisateurs. Différentes stratégies d'optimisation, prenant en compte à la fois la performance de chaque lien et le compromis collectif, restent des pistes prometteuses pour améliorer encore les performances globales du système.

4.4 Comparaison et synthèse des simulations

La transition du scénario mono-utilisateur au scénario multi-utilisateurs est riche d'enseignements.

Tableau 4. 3: comparaison des résultats

Caractéristique	Partie 1 (Mono-Utilisateur)	Partie 2 (Multi-Utilisateurs)
Scénario	Point-à-Point (1 BS, 1 IRS, 1 UE)	Diffusion (1 BS, 1 IRS, 4 UE)
Objectif d'optimisation	Maximiser le SNR d'un seul utilisateur.	Maximiser une utilité système (débit somme pondéré par l'équité).
Complexité d'optimisation	Faible (solution analytique directe).	Élevée (problème NP-hard, résolution par algorithme itératif).
Nature du gain	Gain de SNR/débit très élevé pour l'utilisateur cible.	Gain sur le débit somme et l'équité. Le gain par utilisateur est un compromis.
Métrique clé démontrée	Capacité à contourner un obstacle et à réduire la puissance d'émission.	Capacité à augmenter le débit total du système et à améliorer l'équité de service.

La première simulation a démontré le potentiel brut d'une IRS dans des conditions idéalisées. Le gain de performance, régi par la loi en N^2 , y apparaît dans toute sa splendeur. La seconde simulation a confronté ce potentiel à la dure réalité d'un environnement partagé. Le gain par utilisateur y est forcément moindre que dans le cas mono-utilisateur, car l'IRS doit "diviser son attention".

Cependant, la simulation multi-utilisateur met en évidence deux bénéfices peut-être encore plus importants au niveau du système : l'augmentation de la capacité totale et l'amélioration de l'équité. Elle montre que l'IRS n'est pas seulement une solution de niche pour un utilisateur bloqué, mais un véritable outil d'ingénierie radio pour sculpter l'environnement de propagation au profit de l'ensemble du réseau. La contrepartie évidente est le saut massif en complexité de calcul pour le contrôle de l'IRS, qui passe d'une simple formule à un algorithme itératif coûteux.

4.5 Conclusion

Les résultats obtenus à travers les simulations MATLAB confirment l'apport significatif des surfaces reconfigurables intelligentes (IRS) dans les réseaux sans fil.

D'une part, dans les scénarios mono-utilisateur, les IRS améliorent la couverture en contournant les obstacles grâce à la création de liaisons virtuelles, tout en apportant des gains notables en SNR et en capacité, liés à la taille de la surface. Leur capacité à focaliser l'énergie permet également de réduire les puissances de transmission, contribuant ainsi à une meilleure efficacité énergétique.

D'autre part, dans les scénarios multi-utilisateurs, une optimisation conjointe des coefficients de réflexion permet d'augmenter le débit global tout en assurant une répartition équitable des ressources entre les utilisateurs. L'ensemble des résultats met en évidence que les IRS tiennent leurs promesses théoriques en instaurant un contrôle actif de l'environnement radio.

Toutefois, ces performances dépendent fortement de la qualité de l'information du canal et de la complexité des algorithmes d'optimisation. Ainsi, la faisabilité d'un déploiement à grande échelle reste conditionnée par ces deux aspects critiques. Cette étude pratique constitue donc une base solide pour envisager les IRS comme une technologie clé dans l'évolution des communications sans fil.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Ce mémoire a exploré en profondeur l'intégration des surfaces réfléchissantes intelligentes (IRS) dans les systèmes de communication sans fil, en s'inscrivant dans la dynamique de recherche visant à concevoir des réseaux plus performants, flexibles et économes en énergie. Après avoir rappelé les fondements des technologies de communication sans fil et leurs évolutions jusqu'à la 5G, nous avons mis en évidence les limites structurelles auxquelles ces réseaux sont confrontés, notamment en matière de couverture, d'interférences et d'efficacité énergétique.

Les IRS se sont ainsi révélées comme une solution innovante, capable de transformer l'environnement de propagation des signaux grâce à leur capacité à reconfigurer de manière passive les trajets de transmission. En analysant leurs principes de fonctionnement, leur architecture matérielle et leurs avantages concrets, nous avons pu démontrer leur potentiel disruptif pour divers scénarios de communication, allant des environnements mmWave et satellites aux applications de sécurité physique.

Sur le plan pratique, les simulations menées dans ce travail ont permis d'évaluer les performances des IRS en termes de gain en SNR, de réduction des interférences et d'optimisation de l'équité d'allocation des ressources, confirmant leur intérêt dans des configurations mono-utilisateur comme multi-utilisateur. De plus, l'intégration de techniques d'optimisation et d'intelligence artificielle, notamment à travers les perspectives offertes par le deep learning, ouvre des horizons prometteurs pour les réseaux 6G.

En somme, ce projet met en lumière l'apport considérable des IRS dans l'évolution des communications sans fil vers des réseaux intelligents, durables et adaptatifs. Toutefois, leur mise en œuvre à grande échelle soulève encore plusieurs défis pratiques et théoriques, notamment en matière d'estimation de canal, de gestion dynamique et de complexité de déploiement, constituant ainsi des pistes intéressantes pour des travaux futurs.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

Référence bibliographique

- [1]” Cités des télécoms. La télégraphie sans fil.2023
- [2]” A. A. Huurdeman, The Worldwide History of Telecommunications, Wiley interscience, 2003.
- [3]” Qingqing Wu, Shuowen Zhang, Beixiong Zheng, Changsheng You, Rui Zhang. Intelligent Reflecting Surface-Aided Wireless Communications : A Tutorial. IEEE transactions on communications 2021.
- [4]” Tek-Fiber. L'histoire des communications sans fil.2023
- [5]” Lakehal R, haddad Y. Mise en œuvre d’une chaîne de communication SM-OFDM (Modulation spatiale associé à l’OFDM). Mémoire de master 2020. Université de Bouira
- [6]” Susie S. Mobile Network Evolution from 1G to 5G. visermark.2023
- [7]” Žan Kelbič. Générations de réseaux mobiles : Évolution de la 1G à la 5G. tridenstechnology. Août 2024.
- [8]” Giga-Concept, "La technologie réseau 2G : fonctionnement et héritage
- [9]” Simbase, "Glossaire IoT : Définition de la 2G.
- [10]” Simbase, "Glossaire IoT : Définition de la 3G.** R. van der Meer, "Qu'est-ce que la 3G ?", Simbase – Dictionnaire IoT
- [11]” Simbase, "Glossaire IoT : Définition de la 4G.
- [12]” Johann Hoeffler Réseaux mobile 2G, 3G, 4G, 5G : les différentes technologies expliquées. Selctra.2025
- [13]” Simbase, "Glossaire IoT : Définition de la 5G.
- [14]” P.-L. Brault, Technologies de communication sans fil .2024
- [15]” Biblio Techno. Quelles sont les technologies de communication sans fil adaptées aux applications industrielles ? Actutem.
- [16]” La technologie Wi-Fi : fonctionnement et caractéristiques. Giga-concept
- [17]” Giga-concept. La technologie Bluetooth : principe et applications
- [18]” Digi International. Norme sans fil Zigbee : solutions IoT basse consommation.
- [19]” StudySmarter, "Communication par satellite : principes et applications.

Référence bibliographique

- [20]” Marc Lichtman. Evanouissement par Multi-Trajets.2025. Un guide sur SDR et DSP à l'aide de Python.
- [21]” S. Lin and D. J. Costello, Error Control Coding: Fundamentals and Applications, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall, 2004.
- [22]” BOULIFA R, KHEMIS N. Etude des techniques du multiplexage pour la transmission des systèmes de télécommunication. Mémoire de master. Université ouargla.
- [23]” Zhang, J., Liu, Yx., Özdemir, Ş. et al. Quantum internet using code division multiple access. Sci Rep 3, 2211 (2013).
- [24]” Amos. Multipath Fading in IoT: What It Is and How to Fix It. iotforall.
- [25]” A.Manel, K.kaouter. Performances des algorithmes d'estimation du canal pour un système MIMO massif. Mémoire de master. Université ouargla.
- [26]” Ali, E., Ismail, M., Nordin, R. et al. Beamforming techniques for massive MIMO systems in 5G: overview, classification, and trends for future research. Frontiers Inf Technol Electronic Eng 18, 753–772 (2017)
- [27]” L. Shevada, H. D. Raut, R. Malekar, et S. Kumar, "Comparative Study of Different Beamforming Techniques for 5G: A Review," in Inventive Communication and Computational Technologies, Springer, 2021
- [28]” Alan Shoe. L'intégration de l'IA dans la gestion des réseaux mobiles. Journal du net.2025
- [29]” Patrick Dany Bavoua Kenfack, Alphonse Binele Abana, Paul-Salomon Ngohe-Ekam, Emmanuel Tonye, Pamela Brenda Bitom. Integrating Intelligent Reflecting Surface (IRS) Into Mobile Networks to Bridge the Digital Divide in Rural Areas While Improving User Connectivity. Article in International Journal of Advanced Engineering and Management Research · January 2025
- [30]” Weidong Mei, Beixiong Zheng, Changsheng You and Rui Zhang. Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Networks: From Single-Reflection to Multi-Reflection Design and Optimization. Article proceedings of the IEEE.
- [31]” Jun Zhao, Yang Liu. A Survey of Intelligent Reflecting Surfaces (IRSs): Towards 6G Wireless Communication Networks.

Référence bibliographique

- [32]” G. Lavigne, K. Achouri, V. S. Asadchy, S. A. Tretyakov, and C. Caloz, Susceptibility derivation and experimental demonstration of refracting metasurfaces without spurious diffraction. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 3, pp. 1321– 1330, 2018.
- [33]” N. Yu, P. Genevet, M. A. Kats, F. Aieta, J.-P. Tetienne, F. Capasso, and Z. Gaburro. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction.
- [34]” Jiang LIU. *Wireless Communications Assisted by Reconfigurable Intelligent Surfaces. Networking and Internet Architecture [cs.NI]*. Université Paris-Saclay, 2021.
- [35]” Shihao Yan, Xiaobo Zhou, Derrick Wing Kwan Ng, Jinhong Yuan, Naofal Al-Dhahir. *Intelligent Reflecting Surface for Wireless Communication Security and Privacy*. Aug 2021.
- [36]” I. Delloum, N. Yahi. *Une étude sur les Surfaces Réfléchissantes Intelligentes (IRS)*. Mémoire de Master, Université de M’Sila, 2021.
- [37]” Q. Wu and R. Zhang. *Towards Smart and Reconfigurable Environment: Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Network*. *IEEE Communications Magazine*. Jan 2020.
- [38]” E. Basar. *Reconfigurable Intelligent Surface-Based Index Modulation: A New Beyond MIMO Paradigm for 6G*. *IEEE Transactions on Communications*.
- [39]” Rana T, Mohammad A, Md Habibur R, Md Abdul Aziz, Hyoung-Kyu S. *Intelligent Reflecting Surface-Assisted Wireless Communication Using RNNs: Comprehensive Insights*. *Mathematics* 2024.
- [40]” Okogbaa et al, *Design and Application of Intelligent Reflecting Surface (IRS) for Beyond 5G Wireless Networks: A Review*, *Sensors*, 2022.
- [41]” Wu et al., *Towards Smart and Reconfigurable Environment: IRS Design and Applications*, arXiv:1905.00152v5.
- [42]” C. Pan et al. “*Reconfigurable Intelligent Surfaces for 6G Systems: Principles, Applications, and Research Directions*”. *IEEE Communications Magazine*. Jun 2021.
- [43]” Qingqing Wu et al., *IRS Hardware Architecture and Practical Constraints*, *IEEE*, 2021.
- [44]” S. Zhang, Q. Wu, S. Xu and G. Y. Li. “*Capacity Characterization for Intelligent Reflecting Surface Aided MIMO Communication*.” *IEEE Transactions on Communications*. Jun 2021

Référence bibliographique

- [45]” Björnson, E., Wymeersch, H., Matthiesen, B. et al (2022). Reconfigurable Intelligent Surfaces: A signal processing perspective with wireless applications. *IEEE Signal Processing Magazine*.
- [46]” Q. Wu and R. Zhang, "Intelligent Reflecting Surface Enhanced Wireless Network via Joint Active and Passive Beamforming," *IEEE Transactions on Wireless Communications*.
- [47]” C. Pan et al., "Intelligent Reflecting Surface for MIMO Communications," *IEEE Wireless Communications*, vol. 28, no. 2, pp. 112–119, Apr. 2021.
- [48]” M. Di Renzo et al., "Reconfigurable Intelligent Surfaces vs. Relaying: Differences, Similarities, and Performance Comparison," *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2020.
- [49]” A. Zappone, M. Di Renzo, et al." On The Optimal Number of Reflecting Elements for Reconfigurable Intelligent Surfaces." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. Nov 2020.
- [50]” Een-Kee Hong, Inkyu Lee, Byonghyo Shim, Young-Chai Ko, Sang-Hyo Kim, Sangheon Park. 6G R&D Vision: Requirements and Candidate Technologies. in *Journal of Communications and Networks*. April 2022
- [51]” E. Björnson, Ö. Özdogan, and E. G. Larsson, "Intelligent Reflecting Surface Versus Decode-and-Forward: How Large Surfaces Are Needed to Beat Relaying?" *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 2, pp. 244–248, Feb. 2020.
- [52]” Y. Liu, X. Liu, and Y. Chen. “Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Communications: Performance Analysis and Optimization.” *IEEE Wireless Communications*. 2020.
- [53]” Elzanaty, A. Alouini, M.S & Yuen, C. “Reconfigurable Intelligent Surfaces for Wireless Communications: Principles, Challenges, and Opportunities. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*” 2021.
- [54]” B. Zheng, S. Lin, and R. Zhang, “Intelligent Reflecting Surface-Aided LEO Satellite Communication: Cooperative Passive Beamforming and Distributed Channel Estimation” Jan 2022.
- [55]” Y. Cao, T. Lv et W. Ni, “Intelligent Reflecting Surface Aided Multi-User mmWave Communications for Coverage Enhancement”. *IEEE Journal*, 2020.

Référence bibliographique

- [56]” H. Amiriara, M. Mirmohseni, A. Elzanaty, Y. Ma, and R. Tafazolli, “A Physical Layer Security Framework for IRS-Assisted Integrated Sensing and Semantic Communication Systems.” Jan 2025.
- [57]” F. Naeem, G. Kaddoum, S. Khan, K. S. Khan et N. Adam. “IRS-Empowered 6G Networks: Deployment Strategies Performance Optimization and Future Research Directions”. IEEE Access. 2022
- [58]” X. Yuan, Y.-J. A. Zhang, Y. Shi, W. Yan, and H. Liu, "Reconfigurable-Intelligent-Surface Empowered Wireless Communications: Challenges and Opportunities." Aug. 2020.
- [59]” R. Jain, D. M. Chiu, and W. R. Hawe, "A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems,"1 DEC Research Report2 TR-301, 1984.
- [60]” M. Di Renzo et al., "Smart Radio Environments Empowered by AI Reconfigurable Meta-Surfaces: An Idea Whose Time Has Come," EURASIP J. Wireless Commun. May 2019.
- [61]” C. Huang, R. Mo, and C. Yuen, "Reconfigurable Intelligent Surface Assisted Multiuser MISO Systems Exploiting Deep Reinforcement Learning." IEEE J. Sel. Areas Commun. Aug. 2020.
- [62]” T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall, 2002.