
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohammed Boudiaf à M'sila

Faculté de Technologie

Département d'Électronique



Mémoire de Master

Domaine : Télécommunications

Spécialité : Ingénierie des Télécommunications

Thème :

Analyse de la performance d'un système de
transmission SISO assisté par des surfaces
intelligentes 5G

Présenté par :

- AICHAOUI Redha
- BOUCHERIT Moussa

Sujet proposé et dirigé par :

- Dr. BENMAHMOUD Slimane

Devant le jury composé de :

.....
Dr. BENMAHMOUD Slimane
.....

Président
Encadreur
Examineur

Projet N : / 2021

Dédicaces

Remerciements

Table des matières

Introduction générale	1
1 Quelques concepts des réseaux cellulaires	6
1.1 Le sans fil arrive à l'âge	8
1.2 Aperçu des réseaux cellulaires	9
1.2.1 Organisation des réseaux cellulaires	10
1.2.2 Effets de propagation dans les communications radio mobile	10
1.2.3 Contrôle de puissance dans un réseau cellulaire	11
1.3 Le réseau cellulaire mondial	12
1.4 L'accès radio 5G	14
2 Les systèmes de communication assistées par des relais	16
2.1 Introduction	18
2.2 Fondamentaux des communications sans fil coopératives	19
2.3 Quelques scénarios d'application	23
2.3.1 Les réseaux cellulaires	24
2.3.2 Les réseaux locaux sans fil (WLANs)	25
2.3.3 Les communications de véhicule à véhicule (V2V)	25
2.3.4 Les réseaux de capteurs sans fil (WSN)	26
2.3.5 La localisation des réseaux	27

2.4	Les avantages et les inconvénients de la coopération	30
2.5	Les protocoles de relayage	33
2.5.1	Protocoles de relayage non-régénératifs	34
2.5.2	Protocoles de relayage régénératifs	36
3	Les communications assistées par des surfaces réfléchissantes intelligentes (IRSs)	38
3.1	Introduction	40
3.1.1	Les IRS avec décalages de phase continus	40
3.1.2	Les IRS avec déphasages discrets	41
3.2	Qu'est-ce qu'un RIS exactement?	42
3.3	Aperçu sur l'état de la recherche sur les surfaces intelligentes reconfigurables	44
3.3.1	Les métamatériaux et les métasurfaces	44
3.3.2	Les environnements radio intelligents	45
3.3.3	La modélisation analytique des IRSs	46
3.4	Architecture des IRSs	48
3.5	Les fonctions électromagnétiques d'une IRS	50
3.6	Un modèle pratique pour la IRS	51
3.7	Applications des IRSs	53
3.8	Les défis de l'application des IRSs	55
3.8.1	Estimation du canal	55
3.8.2	La reconfiguration de la IRS	57
3.8.3	L'optimisation du réseau	57
4	Simulations et Résultats	60
4.1	Modèle du système	61
4.1.1	Transmission assistée par une IRS	61
4.1.2	Transmission assistée par un relais DF	63
4.2	Résultats des simulations	64

Table des figures

2.1	Un schéma de communication assistée par relais.	19
2.2	Protocoles de relais semi-duplex dans un scénario à trois nœuds [1].	20
2.3	Stratégies d'allocation des ressources dans une communication assistée par relais.	22
2.4	Scénario cellulaire : le relais améliore les performances des utilisateurs en termes de capacité, de couverture ou d'interférence.	24
2.5	Une station WLAN installée à l'intérieur d'une maison permet d'accéder aux usagers dans la rue via des relais.	26
2.6	Scénario de communication V2V distribuée, où les véhicules coopèrent pour réduire les retards de communication.	27
2.7	Scénario WSN, où les capteurs coopèrent pour obtenir une meilleure couverture.	28
2.8	Une zone où il est plus probable de trouver un appareil mobile si la coopération n'est pas utilisée.	29
2.9	Une zone où il est plus probable de trouver l'appareil mobile si la coopération est utilisée.	29
2.10	Les compromis de système dans les réseaux coopératifs.	32
2.11	Classification des principaux protocoles de relayage.	34
3.1	L'architecture d'une IRS	48

TABLE DES FIGURES

3.2	Les fonctions électromagnétiques d'une SIR.	50
3.3	Circuit localisé équivalent pour une cellule unitaire dans une RIS pratique.	52
3.4	Applications des IRSs	59
4.1	Illustration des deux configurations considérées dans ce travail. . .	62
4.2	La configuration de simulation où d_1 est variable.	65
4.3	L'efficacité énergétique en fonction du taux \bar{R}	66

Introduction générale

L'utilisation de systèmes de communication sans fil fait désormais partie intégrante de notre vie quotidienne. Avec l'évolution rapide des technologies sans fil, il est désormais possible de transférer une quantité massive de données à travers le monde en quelques fractions de secondes, tout en prenant en charge simultanément un grand nombre d'utilisateurs sans fil. Les avancées récentes dans les technologies sans fil telles que les appareils électroménagers intelligents, les gadgets de surveillance de la santé sans fil, les services de gestion du contrôle du trafic sans fil et le multimédia de qualité ultra-haute définition ont ajouté un confort sans précédent pour l'être humain. De plus, grâce à l'Internet des objets (IoT), on s'attend à ce que les informations et le contrôle des objets environnants puissent être collectés à l'aide d'un seul dispositif de contrôle. Cependant, la mise en œuvre pratique de ces concepts nécessite des recherches de pointe pour développer de nouvelles techniques permettant le transfert de données sans fil entre un grand nombre d'appareils sans fil avec des débits de données très élevés. Ces dernières années, plusieurs technologies de pointe ont été proposées pour améliorer l'efficacité spectrale et énergétique des systèmes sans fil 5G et au-delà. Les concepts de dispositifs à antennes multiples, de multiplexage de domaine de puissance, de communication à très haute fréquence et de communication à haute mobilité de canal ont déclenché de nouvelles dimensions de re-

cherche dans les systèmes à entrées multiples et sorties multiples (multiple-input multiple-output (MIMO)), à accès multiple non orthogonal (non-orthogonal multiple access (NOMA)), les communications par ondes millimétriques (millimeter wave (mm-wave)) et les communications véhiculaires, respectivement.

D'ici 2022, on s'attend à ce que le trafic mondial de données mobiles atteigne 77 exaoctets par mois, ce qui correspond à une croissance multipliée par 7 par rapport à l'ans 2017. Ces demandes peuvent ne pas être satisfaites par les normes cellulaires actuelles qui n'utilisent que bandes de fréquences inférieures à 6 GHz. Une caractéristique clé des futurs réseaux sans fil est donc la migration potentielle vers des fréquences plus élevées, par exemple les bandes d'ondes millimétriques (30-100 GHz) et submillimétriques (au-dessus de 100 GHz). Des mesures approfondies ont été effectuées dans la bande des ondes millimétriques et, plus récemment, dans la bande des ondes submillimétriques. Ces mesures ont démontré que l'utilisation d'antennes orientables hautement directionnelles permet une communication mobile à des fréquences aussi élevées. Cependant, les bandes de fréquences des ondes millimétriques et submillimétriques sont très sensibles aux blocages provenant de structures de grande taille, par exemple des bâtiments, sur le trajet radio. De plus, leurs signaux peuvent être sévèrement atténués par la présence d'objets de petite taille, par exemple des corps humains et du feuillage. Le besoin de débits de données plus élevés dans les communications sans fil monte en flèche. Cela nécessite des technologies de communication innovantes et économiquement viables capables de répondre aux besoins croissants en capacité du réseau. La technologie MIMO massif (massive MIMO) peut répondre aux exigences de capacité du réseau pour les réseaux sans fil au-delà de la cinquième génération (5G) [2], [3], [4]. L'idée de base du MIMO massif est d'équiper les stations de base (BS) de dizaines (voire de centaines) d'éléments d'antenne afin de desservir simultanément plusieurs appareils mobiles utilisant les mêmes ressources temps/fréquence. Malgré les nombreux avantages du MIMO massif, son déploiement pratique à grande échelle est entravé par le coût élevé du matériel

et la consommation d'énergie associés[5], [6]. De plus, bien que la communication par ondes millimétriques (mmWave) bénéficie du MIMO massif en raison d'une convergence symbiotique des technologies, son utilisation pratique est encore limitée par la caractéristique de propagation moins pénétrante des signaux mmWave en présence de blocages entre la BS et l'appareil mobile [7].

Une technologie prometteuse qui a été introduite récemment est celle des surfaces réfléchissantes intelligentes (intelligent reflective surfaces (IRSs)), également appelées surfaces intelligentes reconfigurables (reconfigurable intelligent surfaces (RISs)) [8], [9]. L'IRS est composé d'une méta-surface plane composée d'un grand nombre d'éléments réfléchissants passifs. Cela permet à l'IRS de modifier passivement l'environnement de propagation sans fil en reconfigurant les phases de ses éléments réfléchissants via un contrôleur fixé à la surface [10]. Les principaux avantages des IRS sont énumérés ci-dessous [11] :

- Installation facile : les IRS sont des dispositifs presque passifs, composés de matériaux électromagnétiques (EM). Contrairement aux BS traditionnels qui ne peuvent être installés qu'à des endroits désignés et dans des tours de grande hauteur, les IRS peuvent être installés sur l'extérieur des bâtiments, les panneaux d'affichage, les véhicules aériens et routiers et même sur les vêtements compte tenu de son faible coût.
- Amélioration de l'efficacité spectrale : étant donné que les IRS sont capables de modifier l'environnement de propagation sans fil, ils peuvent atténuer la perte de puissance sur de grandes distances. Les IRS peuvent être utilisés pour effectuer une formation de faisceau passive. La formation de faisceau passive fait référence à la modification des phases IRS sans alimenter activement les éléments d'antenne IRS par opposition à la formation de faisceau active au niveau de la BS afin d'améliorer la puissance reçue tout en réduisant les interférences pour les utilisateurs non intentionnels, améliorant ainsi le débit global du réseau [12]. Les IRS sont particulièrement utiles dans

les scénarios où les liaisons en visibilité directe (Line of sight (LoS)) entre la BS et les utilisateurs mobiles sont bloquées par des obstacles, par exemple des bâtiments ou des murs intérieurs. L'IRS permet de former des liens LOS virtuels entre les BS et les utilisateurs mobiles en réfléchissant passivement les signaux radio incidents.

- Respect de l'environnement : IRS ne nécessite pas d'amplificateur de puissance pour la transmission, ce qui en fait une technologie économe en énergie. En pratique, le déploiement IRS nécessite un grand nombre de déphaseurs (phase shifters (PSs)) économiques sur une surface qui peut être facilement intégrée dans un réseau sans fil traditionnel [13].
- Compatibilité avec les réseaux existants : étant donné que les IRS ne réfléchissent que les signaux de radiofréquence (radio frequency (RF)), ils prennent en charge la transmission pleine bande en duplex intégral. De plus, les IRS peuvent être facilement intégrés dans les réseaux sans fil existants en suivant les normes matérielles actuelles.

Pour les raisons susmentionnées, la communication assistée par IRS a suscité un intérêt substantiel pour la recherche dans la communauté de la recherche sans fil au cours des dernières années.

Ce mémoire est organisé en cinq chapitres. On aborde dans **le premier chapitre** quelques concepts des réseaux cellulaires.

Dans **le deuxième chapitre**, on traite les communications coopératives ou à relais qui ont été présentées à l'origine comme un moyen de surmonter les limitations du déploiement de plusieurs antennes sur un même terminal de communication.

Dans **le troisième chapitre** (dont la première partie est commune avec le chapitre 3 du mémoire intitulé "*Une étude sur la transmission uplink-NOMA assistée par des surfaces intelligentes reconfigurables*" préparé par nos collègues : BOUCHAALA Hasna et ZID Amira avec eux, nous avons le même superviseur de mémoire.), on révèle en détails les secrets des systèmes de communications assistés par des IRS.

Dans **le dernier chapitre**, on étudie la performance d'un système de transmission assisté par une IRS où nous essayons de faire une comparaison équitable entre la transmission soutenue par des IRSs et celle soutenue par un relais DF, en terme d'efficacité énergétique (EE).

Finalement, la conclusion synthétise notre travail et présente des nouvelles perspectives de recherche dans le domaine.

Quelques concepts des réseaux cellulaires

De toutes les avancées considérables dans les communications de données et les télécommunications, la plus révolutionnaire est peut-être le développement des réseaux cellulaires. La technologie cellulaire est la base des communications sans fil mobiles et prend en charge les utilisateurs dans des endroits qui ne sont pas facilement desservis par des réseaux câblés. La technologie cellulaire est la technologie sous-jacente des téléphones mobiles, des smartphones, des tablettes, de l'Internet sans fil et des applications sans fil, et bien plus encore.

Contenu du chapitre

1.1	Le sans fil arrive à l'âge	8
1.2	Aperçu des réseaux cellulaires	9
1.2.1	Organisation des réseaux cellulaires	10
1.2.2	Effets de propagation dans les communications radio mo- bile	10
1.2.3	Contrôle de puissance dans un réseau cellulaire	11
1.3	Le réseau cellulaire mondial	12
1.4	L'accès radio 5G	14

1.1 Le sans fil arrive à l'âge

Guglielmo Marconi a inventé le télégraphe sans fil en 1896¹. En 1901, il a envoyé des signaux télégraphiques à travers l'océan Atlantique de Cornwall à St. John's Terre-Neuve, une distance d'environ 3200 km. Son invention a permis à deux parties de communiquer en s'envoyant des caractères alphanumériques codés dans un signal analogique. Au cours du siècle dernier, les progrès des technologies sans fil ont conduit à la radio, à la télévision, aux satellites de communication, au téléphone mobile et aux données mobiles. Tous les types d'informations peuvent maintenant être envoyés à presque tous les coins du monde. Récemment, une grande attention a été accordée aux réseaux sans fil, à la technologie cellulaire, aux applications mobiles et à l'Internet des objets (Internet of Things (IoTs)).

Les satellites de communication ont été lancés pour la première fois dans les années 1960; aujourd'hui, les satellites transportent environ un tiers du trafic vocal et tous les signaux de télévision entre les pays. La mise en réseau sans fil permet aux entreprises de développer des WAN, des MAN et des LAN sans installation de câbles. La norme IEEE 802.11 pour les réseaux locaux sans fil (également appelée Wi-Fi) est devenue omniprésente. Des consortiums industriels ont également fourni des technologies de réseau sans fil à courte portée transparentes telles que ZigBee, Bluetooth et des étiquettes d'identification par radiofréquence (Radio Frequency Identification tags (RFIDs)).

Le téléphone cellulaire ou mobile a commencé avec l'objectif d'être l'équivalent moderne du télégraphe sans fil de Marconi, offrant une communication bidirectionnelle à deux. Les téléphones sans fil de la première génération offraient des services vocaux et de données limités via des appareils volumineux qui sont progressivement devenus plus portables. Les appareils de troisième et quatrième génération sont destinés à la voix, aux SMS, aux réseaux sociaux, aux applications

1. L'invention réelle des communications radio devrait plutôt être attribuée à Nikola Tesla, qui a fait une démonstration publique en 1893. Les brevets de Marconi ont été annulés en faveur de Tesla en 1943 [14]

mobiles, à l'interaction Web mobile et au streaming vidéo. Ces appareils comprennent également des caméras et une myriade de capteurs pour prendre en charge les applications de l'appareil. Les zones de couverture des nouvelles technologies sont continuellement élargies et axées sur les populations d'utilisateurs clés.

L'impact des communications sans fil a été et continuera d'être profond. Très peu d'inventions ont été capables de « rétrécir » le monde d'une telle manière, et elles n'ont pas non plus été capables de changer la façon dont les gens communiquent de manière aussi significative que la façon dont la technologie sans fil a permis de nouvelles formes de réseautage social. Les normes qui définissent la façon dont les appareils de communication sans fil interagissent convergent rapidement, fournissant un réseau sans fil mondial qui offre une grande variété de services.

1.2 Aperçu des réseaux cellulaires

La radio cellulaire est une technique qui a été développée pour augmenter la capacité disponible pour le service de radiotéléphonie mobile. Avant l'introduction de la communication cellulaire, le service de radiotéléphonie mobile n'était fourni que par un émetteur/récepteur de grande puissance. Un système typique prendrait en charge environ 25 canaux avec un rayon effectif d'environ 80 km. La manière d'augmenter la capacité du système est d'utiliser des systèmes de faible puissance avec un rayon plus court et d'utiliser de nombreux émetteurs/-récepteurs. Nous commençons cette section par un aperçu de l'organisation des systèmes cellulaires, puis examinons certains des détails de leur mise en œuvre.

1.2.1 Organisation des réseaux cellulaires

L'essence d'un réseau cellulaire est l'utilisation de plusieurs émetteurs de faible puissance, de l'ordre de 100 W ou moins, voire beaucoup moins. Comme la portée d'un tel émetteur est faible, une zone peut être divisée en cellules, chacune desservie par sa propre antenne. Chaque cellule se voit attribuer une bande de fréquences et est desservie par une station de base, composée d'un émetteur, d'un récepteur et d'une unité de contrôle. Les cellules adjacentes se voient attribuer des fréquences différentes pour éviter les interférences ou la diaphonie. Cependant, des cellules suffisamment éloignées les unes des autres peuvent utiliser la même bande de fréquence.

1.2.2 Effets de propagation dans les communications radio mobile

La communication radio mobile introduit des complexités que l'on ne trouve pas dans la communication filaire ou dans la communication fixe sans fil. Deux domaines généraux de préoccupation sont la force du signal et les effets de propagation du signal :

- Force du signal : la force du signal entre la station de base et l'unité mobile doit être suffisamment forte pour maintenir la qualité du signal au niveau du récepteur, mais pas au point de créer trop d'interférences dans le même canal avec les canaux d'une autre cellule utilisant la même bande de fréquence. . Plusieurs facteurs de complication existent. Le bruit d'origine humaine varie considérablement, ce qui entraîne un niveau de bruit variable. Par exemple, le bruit d'allumage d'une automobile dans la gamme de fréquences cellulaires est plus important en ville qu'en banlieue. Les autres

sources de signaux varient d'un endroit à l'autre. L'intensité du signal varie en fonction de la distance entre la BS et un point à l'intérieur de sa cellule. De plus, l'intensité du signal varie dynamiquement lorsque l'unité mobile se déplace en raison de l'occultation des obstacles et de la géographie.

- L'évanouissement (the fading) : même si la force du signal se situe dans une plage efficace, les effets de propagation du signal peuvent perturber le signal et provoquer des erreurs.

1.2.3 Contrôle de puissance dans un réseau cellulaire

Un certain nombre de problèmes de conception font qu'il est souhaitable d'inclure un contrôle de puissance dynamique capacité dans un système cellulaire :

- La puissance reçue doit être suffisamment supérieure au bruit de fond pour une communication efficace, ce qui dicte la puissance transmise requise. Lorsque l'unité mobile s'éloigne de l'émetteur, la puissance reçue diminue en raison de l'atténuation normale. De plus, les effets de la réflexion, de la diffraction et de la diffusion peuvent entraîner des changements rapides des niveaux de puissance reçue sur de petites distances. En effet, le niveau de puissance est la somme des signaux provenant d'un certain nombre de chemins différents et les phases de ces chemins sont aléatoires, s'additionnant parfois et se soustrayant parfois. Au fur et à mesure que l'unité mobile se déplace, les contributions le long de divers trajets changent.
- Dans le même temps, il est souhaitable de minimiser la puissance du signal transmis par l'unité mobile, de réduire les interférences dans le même canal (interférences avec des canaux sur la même fréquence dans des cellules distantes), d'atténuer les problèmes de santé et d'économiser l'énergie de la batterie.

- Dans les systèmes à spectre étalé (spread spectrum (SS)) utilisant un accès multiple par répartition en code (code division multiple access (CDMA)), il est souhaitable d'égaliser le niveau de puissance reçu au niveau de la BS de toutes les unités mobiles lorsque les signaux arrivent. Ceci est crucial pour les performances du système car tous les utilisateurs ont la même attribution de fréquence.

1.3 Le réseau cellulaire mondial

La révolution cellulaire se manifeste dans la seule croissance du marché de la téléphonie mobile. En 1990, le nombre d'utilisateurs était d'environ 11 millions [15]. Plusieurs raisons expliquent la prédominance des appareils mobiles. Les appareils mobiles sont pratiques ; ils se déplacent avec les gens. De plus, de par leur nature, ils sont conscients de l'emplacement. Les dispositifs cellulaires mobiles communiquent avec des stations de base régionales qui se trouvent à des emplacements fixes. Dans de nombreuses zones géographiques, les téléphones mobiles sont le seul moyen économique de fournir un service téléphonique à la population. Les opérateurs peuvent ériger des stations de base rapidement et à moindre coût par rapport à creuser le sol pour poser des câbles sur des terrains difficiles.

Aujourd'hui, il n'y a pas de réseau cellulaire unique. Les appareils prennent en charge plusieurs technologies et ne fonctionnent généralement que dans les limites du réseau d'un seul opérateur. Pour aller au-delà de ce modèle, des travaux sont en cours pour définir et mettre en œuvre des normes.

Le réseau sans fil dominant de première génération en Amérique du Nord était le Advanced Mobile Phone System (AMPS). Les principaux systèmes sans fil de deuxième génération sont le système mondial de communications mobiles (Global System for Mobile Communications (GSM)), le service de communications personnelles (Personal Communications Service (PCS)) IS-136 et le PCS IS-95. La norme PCS IS-136 utilise l'accès multiple par répartition dans le temps (time

division multiple access (TDMA)); GSM utilise une combinaison de TDMA et l'accès multiple par répartition en fréquence (frequency division multiple access (FDMA)) et l'IS-95 utilise l'accès multiple par répartition en code (code division multiple access (CDMA)). Les systèmes 2G fournissent principalement des services vocaux, mais fournissent également des services de données à débit modéré.

Les deux principaux systèmes de troisième génération sont CDMA2000 et Universal Mobile Telephone Service (UMTS). Les deux utilisent CDMA et sont destinés à fournir des services de données par paquets. CDMA2000 a publié 1xRTT (1 fois la technologie de transmission radio) puis 1xEV-DO (1 fois Evolution-Data Only) via la version 0, la révision A et la révision B. L'UMTS concurrent utilise le CDMA à large bande. Il est développé par le Third Generation Partnership Project (3GPP); sa première version a été étiquetée Release 99 en 1999, mais les versions suivantes ont été étiquetées Releases 4 et suivantes.

Le passage à la quatrième génération impliquait principalement la concurrence entre IEEE 802.16 WiMAX et Long Term Evolution (LTE). Les deux utilisent une approche différente de CDMA pour une efficacité spectrale élevée dans un canal sans fil appelé multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)). Les exigences relatives à la 4G découlent des directives de l'Union internationale des télécommunications (International Telecommunication Union (ITU)), selon lesquelles les réseaux 4G doivent fournir des services tout IP à des débits de données de pointe allant jusqu'à environ 100 Mbps pour un accès mobile à haute mobilité et jusqu'à environ 1 Gbps pour accès à faible mobilité. LTE, également développé par 3GPP, est devenu la technologie prédominante pour la 4G, et 3GPP Release 8 était sa première version. Bien que la version 8 de LTE ne réponde pas aux exigences de l'UIT (même si les spécialistes du marketing l'ont appelée "4G LTE"), la dernière version 10 atteint les objectifs et s'appelle LTE-Advanced.

1.4 L'accès radio 5G

La communication mobile de cinquième génération (5G) devrait considérablement étendre les capacités des réseaux mobiles. De nouvelles technologies et fonctionnalités sont introduites pour les systèmes 5G dans divers domaines : accès sans fil, transport, cloud, applications et systèmes de gestion [16]. Ces avancées ciblent les utilisateurs traditionnels du haut débit mobile ainsi que les utilisateurs émergents de type machine, afin que de nouveaux services supérieurs puissent être activés pour les consommateurs et les industries en général, libérant le potentiel de l'Internet des objets (IoT) et virtuel et augmenté. réalité. Selon une récente enquête réalisée dans 10 industries différentes [17], les revenus mondiaux générés par les technologies 5G atteindront 1 300 milliards de dollars d'ici 2026. On estime que d'ici 2023, il y aura environ 3,5 milliards de connexions IoT cellulaires [18].

L'épine dorsale de tout système de communication mobile est sa technologie d'accès sans fil, qui connecte les appareils aux stations de base radio. Comme presque toutes les sociétés et industries attendent avec impatience la révolution 5G avec son ensemble d'exigences spécifiques, la conception de l'accès sans fil 5G est un défi. Une technologie d'accès sans fil 5G devrait fournir des débits de données extrêmes, une couverture omniprésente, une ultra-fiabilité, une latence très faible, une efficacité énergétique élevée et un nombre massif de connexions hétérogènes. Les applications émergentes centrées sur l'humain sont la réalité augmentée, la réalité virtuelle et les jeux en ligne, qui exigent un débit extrême et une faible latence. Pour la communication de type machine, il existe deux segments principaux : l'IoT massif et l'IoT critique. L'IoT massif se caractérise par un nombre élevé de connexions d'appareils à faible coût, prenant en charge de petits volumes de données par appareil avec une longue durée de vie de la batterie et une couverture étendue (par exemple, pour les zones souterraines et éloignées). Les applications concernent les bâtiments intelligents, les services publics, la logistique

des transports, l'agriculture et la gestion de flotte. L'IoT critique se caractérise par une connectivité ultra-fiable et à très faible latence, par exemple pour prendre en charge les véhicules autonomes, les réseaux électriques intelligents, la chirurgie robotique, la sécurité routière et le contrôle industriel.

2

Les systèmes de communication assistées par des relais

Dans ce chapitre, on traite les systèmes de communication assistés par des relais. On parle d'abord, des fondements de communications coopératives. Ensuite, on explore quelques scénarios d'application des ces systèmes. En présente leurs avantage et leurs inconvénients. A la fin du chapitre, on parle des différents protocoles de relayage.

Contenu du chapitre

2.1	Introduction	18
2.2	Fondamentaux des communications sans fil coopératives	19
2.3	Quelques scénarios d'application	23
2.3.1	Les réseaux cellulaires	24
2.3.2	Les réseaux locaux sans fil (WLANs)	25
2.3.3	Les communications de véhicule à véhicule (V2V)	25
2.3.4	Les réseaux de capteurs sans fil (WSN)	26
2.3.5	La localisation des réseaux	27
2.4	Les avantages et les inconvénients de la coopération	30
2.5	Les protocoles de relayage	33
2.5.1	Protocoles de relayage non-régénératifs	34
2.5.2	Protocoles de relayage régénératifs	36

2.1 Introduction

Une approche possible pour contourner le manque de fiabilité des canaux haute fréquence consiste à détecter l'environnement et à identifier, en temps réel, des voies de propagation alternatives par lesquelles le même signal porteur d'informations peut être reçu. Pour cela, une méthode établie est le déploiement de relais capitalisant sur le concept de diversité coopérative (distribuée) [19]. L'utilisation de relais peut transformer efficacement une seule liaison sans visibilité directe (non-line-of-sight (NLOS)) en plusieurs liaisons en visibilité directe (line-of-sight (LOS)). Cette approche nécessite que chaque relais soit équipé d'une source d'alimentation dédiée et des circuits frontaux nécessaires pour la réception, le traitement et la retransmission. Pour ces raisons, l'utilisation de relais peut entraîner une augmentation de la consommation d'énergie du réseau et peut nécessiter un investissement plus important pour le déploiement.

De plus, l'efficacité spectrale du réseau offerte par les systèmes assistés par relais dépend du protocole de duplexage utilisé pour la transmission. Si un protocole de relais semi-duplex (HD) est utilisé, les émetteurs et les relais ne sont pas autorisés à transmettre simultanément sur la même ressource physique. Ce problème peut être résolu en utilisant un protocole de relais en duplex intégral (FD), mais au prix de : (i) l'introduction d'une auto-interférence de bouclage élevée au niveau du relais en raison de la transmission et de la réception simultanées de signaux; (ii) générer des interférences dans le même canal à la destination, car les relais et les émetteurs émettent des informations différentes sur la même ressource physique; et (iii) augmenter la complexité du traitement du signal et la consommation électrique des relais. Les relais sont donc utilisés de manière adaptative, en fonction du canal et des conditions d'interférence, pour améliorer les performances du réseau [19].

2.2 Fondamentaux des communications sans fil coopératives

Ce type de communication diffère des communications point à point basées sur la collaboration entre leurs points de communication dans l'utilisation d'un nouvel élément, appelé relais. Le schéma de base de la communication assistée par relais implique trois nœuds, comme illustré à la Fig. 2.1. Le nœud source S souhaite transmettre des informations au nœud destinataire D et le nœud relais R assiste la communication.

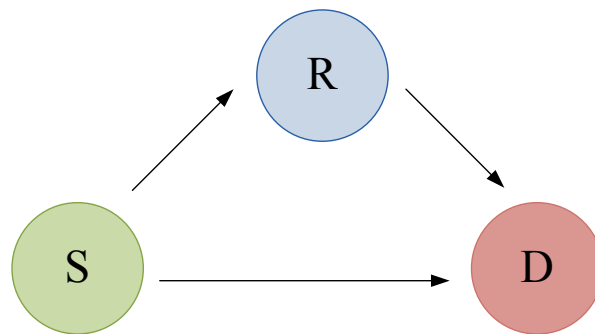


FIGURE 2.1 – Un schéma de communication assistée par relais.

En général, la communication entre les appareils peut être en duplex intégral ou en semi-duplex. Dans une communication en duplex intégral, un nœud peut recevoir et transmettre des données en même temps ou dans la même bande ; dans une communication semi-duplex, un nœud ne peut pas émettre et recevoir en même temps ou dans la même bande. Contrairement aux systèmes MIMO, des ressources de canal supplémentaires sont nécessaires dans les communications assistées par relais en raison des limites de la technologie radio. Par conséquent, le relais est forcé de fonctionner en mode semi-duplex et la communication est divisée en deux phases de duplexage orthogonal, à savoir la phase du relais récepteur et la phase du relais émetteur. La séparation de phase peut être effectuée par accès multiple par répartition dans le temps (Time division multiple access (TDMA)) ou accès multiple par répartition en fréquence (Frequency division multiple ac-

cess (FDMA)). En mode TDMA, les informations reçues et transmises au niveau du relais sont divisées en différents créneaux temporels et partagent le même canal de fréquence; cette séparation est utilisée par les protocoles de relais régénératifs. Dans le FDMA, les informations reçues et transmises au niveau du relais sont séparées en différentes bandes de fréquences et partagent les mêmes créneaux horaires; cette division est utilisée par les protocoles de relais régénératifs et non régénératifs.

Les combinaisons de transmission possibles conduisent à quatre protocoles de relais semi-duplex entre trois nœuds, comme illustré sur la Fig. 2.2 où les lignes pleines font référence à la phase de réception du relais et les lignes en pointillés correspondent à la phase de transmission du relais. Ces quatre protocoles peuvent être classés comme suit :

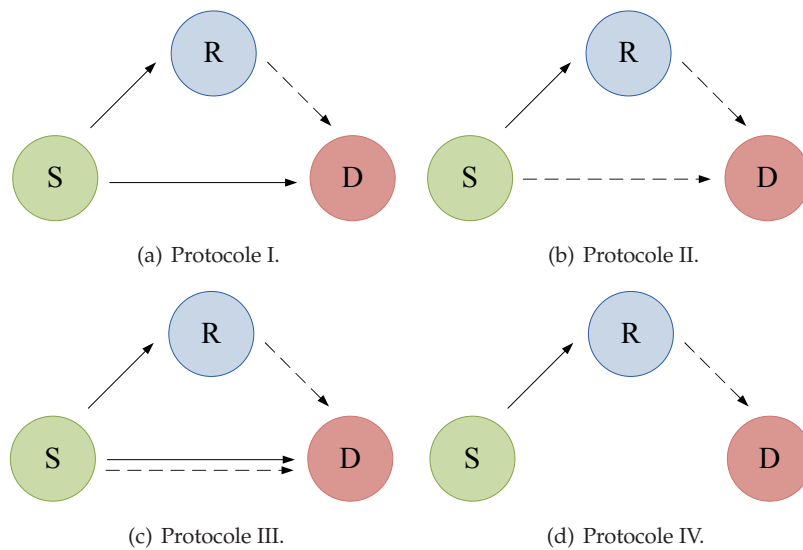


FIGURE 2.2 – Protocoles de relais semi-duplex dans un scénario à trois nœuds [1].

- Protocole I. Dans la phase de relais récepteur, la source diffuse les informations vers la destination et le relais; dans la phase de relais émetteur, le relais communique avec la destination, comme indiqué sur la Fig. 2.2(a).

- Protocole II. Dans la phase relais récepteur, la source transmet uniquement son message au relais et la destination est incapable de recevoir l'information; dans la phase de relais émetteur, la source et le relais communiquent simultanément avec la destination, comme présenté sur la Fig. 2.2(b). Ce protocole correspond à une solution de canal d'accès multiple (MAC).
- Protocole III. Dans la phase de relais récepteur, la source diffuse les informations vers la destination et le relais; dans la phase relais émetteur, la source et le relais communiquent simultanément avec la destination. Ce protocole combine le protocole I et le protocole II, comme illustré sur la Fig. 2.2(c).
- Protocole IV, également connu sous le nom de protocole de transfert. Dans la phase relais récepteur, la source transmet uniquement son message au relais; dans la phase de relais émetteur, le relais ne communique qu'avec la destination, comme le montre la Fig. 2.2(d).

Contrairement aux protocoles de transfert traditionnels, les trois premiers protocoles utilisent également le lien source-destination. Cependant, si la qualité du lien source-destination descend en dessous d'un certain seuil, les performances obtenues à partir des trois premiers protocoles convergent vers celles des protocoles d'acheminement.

Selon le type de système assisté par relais considéré et les informations d'état du canal (Channel state information (CSI)) à la source, la durée de la phase de relais récepteur et de relais émetteur peut être préalablement affectée ou non [1]. Le relais d'allocation de ressources statique est supposé lorsque la transmission est effectuée dans deux tranches de temps avec une durée fixe. Des exemples possibles d'application sont un scénario cellulaire centralisé basé sur TDMA ou un système où le modèle de canal est caractérisé par des informations statistiques.

Au contraire, le relais d'allocation dynamique des ressources nécessite que la source connaisse toutes les qualités des liens. Avec cette connaissance, l'allocation adaptative des ressources sur chaque phase maximise l'efficacité spectrale d'une communication assistée par relais.

Le relais d'allocation de ressources statiques peut évaluer les connaissances sur le succès de la transmission à la destination ou au relais et implique plusieurs schémas de retransmission au niveau du relais pour augmenter l'efficacité spectrale. Les différents types de stratégies d'allocation de ressources statiques, illustrés sur la Fig. 2.3, peuvent être résumés comme suit :

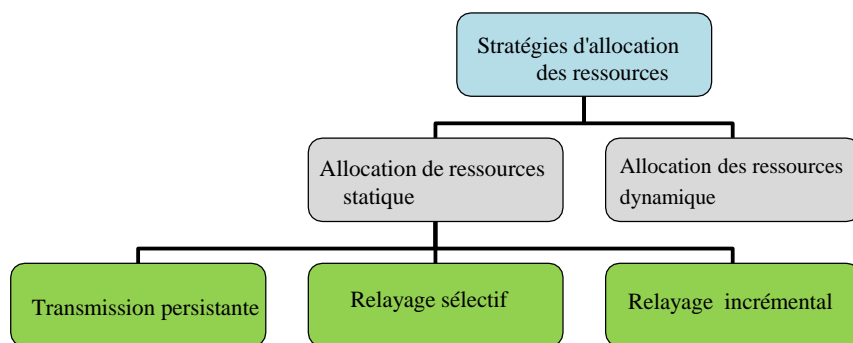


FIGURE 2.3 – Stratégies d'allocation des ressources dans une communication assistée par relais.

- Transmission persistante. Dans ce schéma de retransmission, le terminal relais peut toujours émettre.
- Relais sélectif. Ce schéma de retransmission est appliqué au Stratégie de décodage et de transfert (DF), car elle considère le succès ou l'échec de la liaison source-relais. Si le relais ne reçoit pas correctement le signal ou si l'état du canal de la liaison source-relais est inférieur à un seuil, la source retransmet le message tandis que le relais reste silencieux. Sinon si le relais reçoit correctement le signal provenant de la source, le relais retransmet le message vers la destination.

TABLE 2.1 – Schémas de retransmission au niveau du relais pour différents protocoles de relais semi-duplex.

Relais d'allocation de ressources statiques	Protocoles de relais semi-duplex			
	Protocole I	Protocole II	Protocole III	Protocole IV
Transmission persistante	✓	✓	✓	✓
Relayage sélectif	✓	✓	✓	×
Relayage incrémental	✓	×	✓	×

- Relais incrémental. Ce schéma de retransmission considère le succès ou l'échec de la liaison source-destination pendant la phase de relais récepteur. Le relais transmet l'information lorsque le message à la destination est reçu par erreur.

Les différents schémas de retransmission au niveau du relais pour les protocoles semi-duplex (HD) disponibles sont présentés dans le Tableau 2.1.

2.3 Quelques scénarios d'application

Les communications coopératives jouent un rôle essentiel dans de nombreux scénarios d'application et permettent de surmonter les problèmes liés à la communication par liaison directe [20]. La coopération entre les nœuds est bénéfique dans plusieurs applications pratiques, allant des réseaux cellulaires aux réseaux de capteurs sans fil, comme le montrent les Fig. 2.4- 2.9. En effet, l'utilisation de relais peut apporter une solution aux problèmes d'un réseau qui sont causés par une utilisation limitée des ressources en termes de bande passante et de puissance transmise :

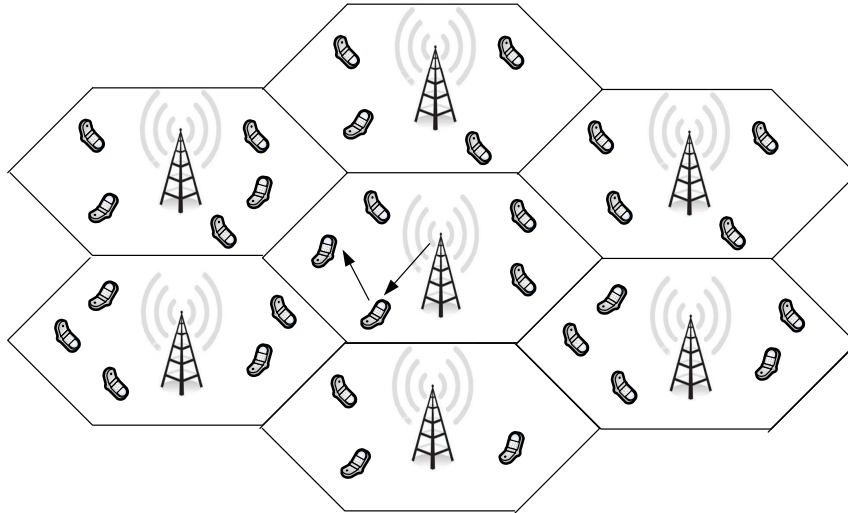


FIGURE 2.4 – Scénario cellulaire : le relais améliore les performances des utilisateurs en termes de capacité, de couverture ou d’interférence.

2.3.1 Les réseaux cellulaires

Les réseaux cellulaires sont un scénario typique, qui sont limités dans les ressources par cellule. En augmentant le nombre d’utilisateurs par cellule, les ressources ne sont pas en mesure de satisfaire la demande des utilisateurs ; par conséquent, la capacité cellulaire offerte devient insuffisante et la limite de puissance transmise se répercute sur la couverture. De plus, les interférences inter- et intra-cellulaires sont des facteurs de performance préjudiciables. Les problèmes de capacité, de couverture et d’interférence peuvent être réduits à l’aide de communications assistées par relais, où la transmission coopérative aide la liaison directe afin de garantir de meilleures performances.

La figure 2.4 montre un exemple de réseaux cellulaires coopératifs, où la couverture du réseau est améliorée, en particulier à la périphérie de la cellule. En effet dans cette partie de la cellule, le signal reçu de la station de base est caractérisé par un SNR15 faible. En utilisant la communication assistée par relais, la zone de

couverture totale de la cellule augmente grâce au signal fort que la station mobile reçoit de la station relais. De plus, l'amélioration de la qualité du signal pour l'utilisateur situé à la périphérie de la cellule entraîne une diminution des ressources requises de la station de base.

2.3.2 Les réseaux locaux sans fil (WLANs)

Les réseaux locaux sans fil (Wireless Local Area Networks (WLANs)) prennent en charge la communication réseau sur de courtes distances dans un scénario urbain, où les interférences peuvent affecter considérablement les performances. Le faible coût et la bande passante élevée de ces réseaux ont permis une augmentation de leur utilisation. Les exigences de débit de données continu pour les applications Web en temps réel et non en temps réel nécessitent de nouvelles stratégies pour améliorer les performances des technologies WLAN. Une méthode pour améliorer la capacité du réseau est basée sur l'utilisation de nœuds de relais intermédiaires pour augmenter la puissance du signal sans fil. Comme pour les réseaux cellulaires, la communication coopérative est capable d'atténuer également les problèmes en termes de couverture et d'interférences dans le WLAN.

La figure 2.4 montre un exemple de WLAN avec des points d'accès WLAN domestiques et des utilisateurs situés dans la rue et dans la maison. En particulier, le point d'accès domestique peut communiquer avec un usager dans la rue à l'aide d'un autre usager qui assure une communication assistée par relais.

2.3.3 Les communications de véhicule à véhicule (V2V)

Cependant, les systèmes de communication de véhicule à véhicule (Vehicle-to-Vehicle (V2V)) sont un type de réseaux où les véhicules communiquent entre eux pour échanger des informations, comme le montre la Fig. 2.6. Dans un scénario urbain et suburbain, ce type de communication coopérative peut apporter des avantages très significatifs pour la réduction du trafic, la sécurité, les pro-

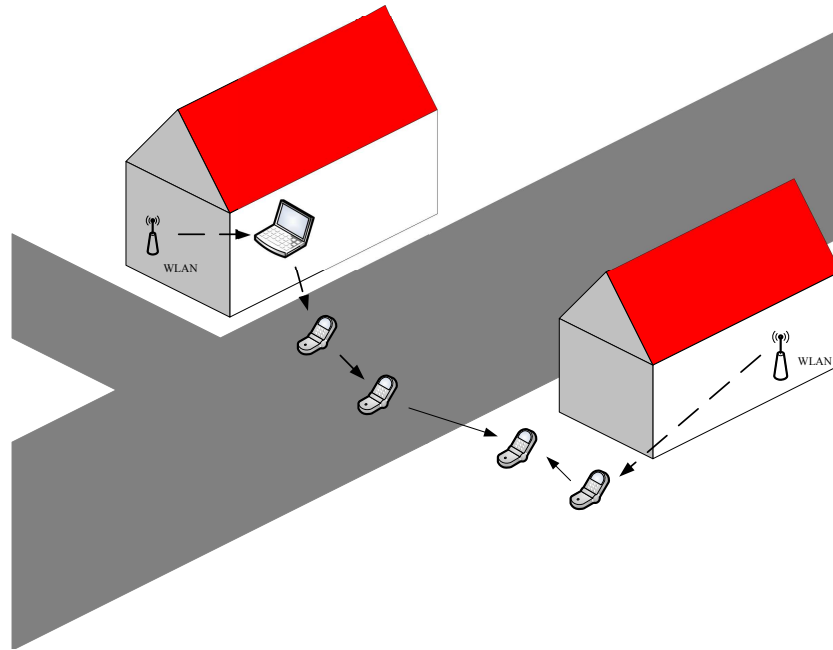


FIGURE 2.5 – Une station WLAN installée à l’intérieur d’une maison permet d’accéder aux usagers dans la rue via des relais.

blèmes de stationnement. Les données issues des véhicules, des infrastructures et de leurs interactions améliorent la gestion de la mobilité et influencent à la fois le développement économique et social du pays. Cette approche coopérative offre une stabilité de liaison élevée et peut être plus efficace pour éviter les accidents et les embouteillages.

2.3.4 Les réseaux de capteurs sans fil (WSN)

Les réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Networks (WSN)) doivent être correctement conçus pour maximiser la durée de vie du réseau, garantissant des communications efficaces entre les nœuds de capteurs. En fait, le principal problème de ces réseaux est la puissance limitée de la batterie des nœuds capteurs. Dans ce scénario également, les communications assistées par relais sont bénéfiques pour maintenir l’intégrité du réseau, en évitant la dégradation des performances. La figure 2.7 montre un exemple de WSN coopératif, où les nœuds capteurs sont limités en couverture.

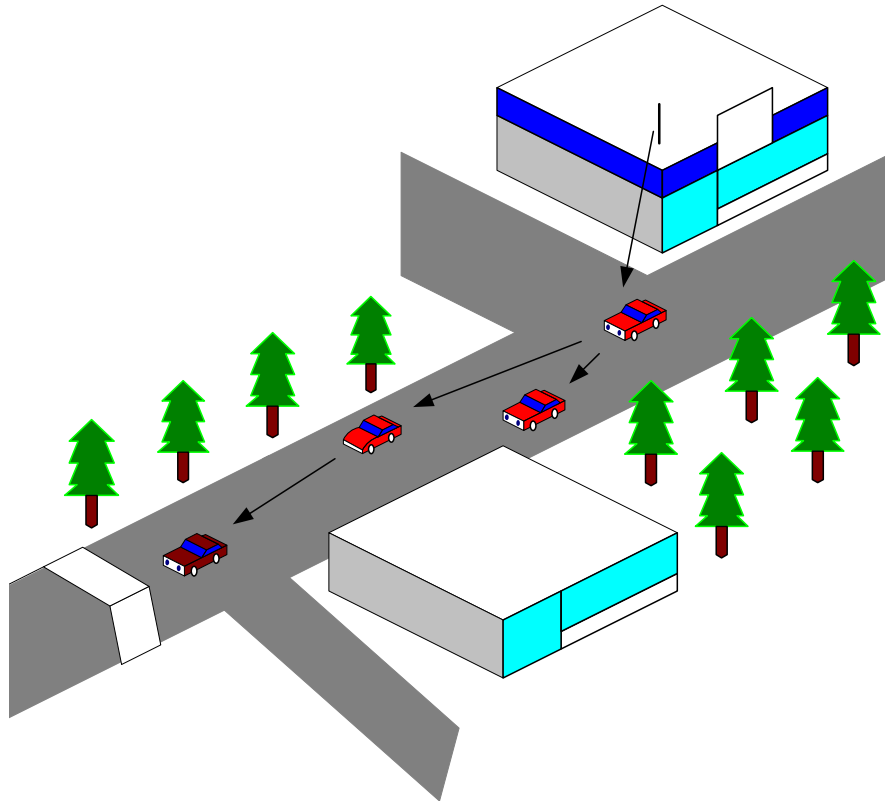


FIGURE 2.6 – Scénario de communication V2V distribuée, où les véhicules coopèrent pour réduire les retards de communication.

2.3.5 La localisation des réseaux

De nombreuses applications nécessitent la connaissance de la position du nœud afin de savoir où les données sont collectées pour effectuer des analyses de données ou pour déterminer les actions à entreprendre. Les méthodes traditionnelles de localisation des nœuds comprennent la fixation d'un récepteur GPS (Global Positioning System (GPS)) dans chaque nœud ou la configuration manuelle de la position de chaque nœud. En augmentant l'échelle des réseaux, ces méthodes deviennent irréalisables en raison de leur coût élevé et de leurs inconvénients. Les algorithmes de localisation utilisent des nœuds spéciaux, appelés nœuds d'ancrage, qui connaissent leurs positions pour faciliter la détermination des positions des autres nœuds (appelés nœuds communs). Un paradigme émergent est

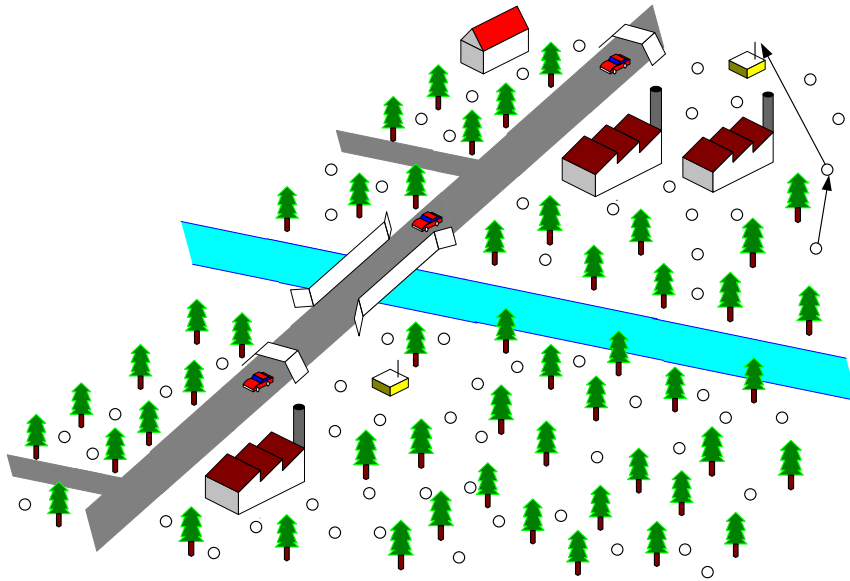


FIGURE 2.7 – Scénario WSN, où les capteurs coopèrent pour obtenir une meilleure couverture.

la localisation coopérative, dans laquelle les noeuds s'entraident pour déterminer leurs emplacements. La localisation coopérative a suscité un vif intérêt de la part des communautés de la robotique, de l'optimisation et des communications sans fil [20], [21], [22], [23].

Les figures. 2.8 et 2.9 montrent un exemple simple pour comparer la localisation conventionnelle et coopérative. Un dispositif non coopératif peut récupérer des informations à partir d'une seule station de base. Ces informations pourraient être utilisées pour déterminer une zone où le mobile peut se trouver. Cela signifie que, compte tenu de la puissance du signal reçu. On suppose que le mobile se trouve dans une certaine zone définie par un certain niveau, comme le montre la Fig. 2.8. Dans les réseaux cellulaires, un environnement de structure typique est le tri-secteur, également connu sous le nom de trèfle, qui est composé de trois secteurs, chacun étant desservi par une antenne distincte. Chaque secteur a une direction de poursuite distincte de 120° par rapport aux secteurs adjacents. Il est donc possible de définir une zone de localisation plus précise. Dans un scénario coopératif, deux téléphones portables peuvent envoyer leurs informations en utilisant une technologie de communication à courte portée. En exploitant les in-

formations reçues, l'aire de localisation est maintenant donnée par l'intersection des zones individuées par chaque information échangée en coopérant, comme le montre la Fig. 2.9. En général, la localisation coopérative peut augmenter considérablement les performances de localisation en termes de précision et de couverture

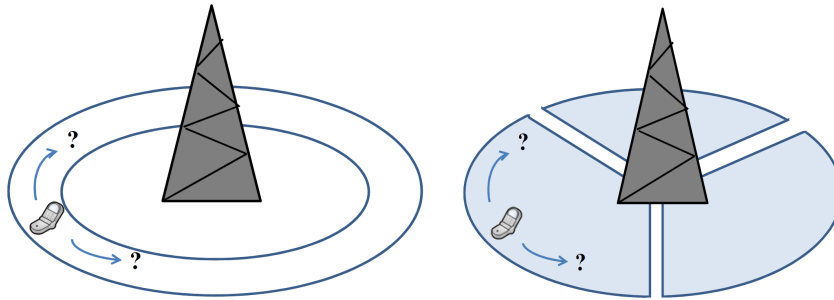


FIGURE 2.8 – Une zone où il est plus probable de trouver un appareil mobile si la coopération n'est pas utilisée.

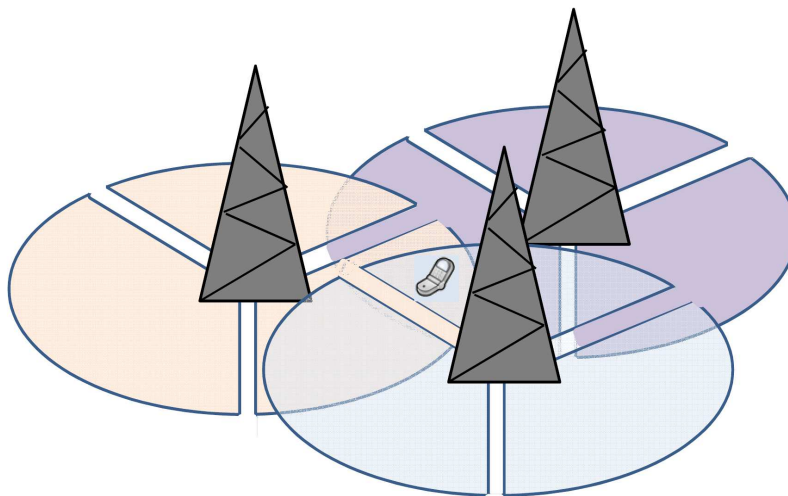


FIGURE 2.9 – Une zone où il est plus probable de trouver l'appareil mobile si la coopération est utilisée.

2.4 Les avantages et les inconvénients de la coopération

Les communications coopératives offrent plusieurs avantages en termes de fiabilité de la liaison, de consommation d'énergie, de couverture et de capacité dans les systèmes sans fil, ce qui suscite un large intérêt dans les milieux universitaires et industriels [24]. Afin de réaliser des systèmes pratiques, le choix des paramètres de conception du système doit prendre en compte les avantages et les inconvénients les plus importants des systèmes coopératifs.

Dans le large éventail de scénarios, les aspects les plus favorables de la coopération sont :

- Atténuation du signal réduite. Le canal sans fil est affecté par les effets de perte de chemin, d'ombrage et d'évanouissement. Cela implique une décroissance exponentielle de la force du signal avec la distance entre la source et la destination. L'augmentation de la distance entraîne une plus grande atténuation du signal, ce qui entraîne un manque de communication entre la source et la destination. Au contraire, dans une communication assistée par relais, la distance entre la source et le relais et la distance entre le relais et la destination sont raccourcies. En conséquence, la force du signal s'améliore et la source peut utiliser des alphabets de symboles de modulation plus élevés pour transmettre plus de données dans chaque canal. Cette circonstance augmente le débit de données transmis à l'utilisateur, ce qui entraîne une augmentation des performances du système.
- Réduction des effets d'ombrage. Les grandes villes sont caractérisées par de nombreux obstacles, tels que des collines ou de grands bâtiments, qui obscurcissent le chemin principal entre la source et la destination et affectent la propagation du signal. La communication assistée par relais crée un itinéraire alternatif pour éviter les obstacles.

- Effets de fondu réduits. En exploitant les phases indépendamment orthogonales, les communications en diversité coopérative combattent également les fluctuations du signal causées par les effets d'évanouissement.
- Qualité de service (QoS). Les communications assistées par relais équilibrent les problèmes de capacité et de couverture et fournissent une qualité de service égale pour tous les utilisateurs.
- Faible coût. La communication coopérative est une solution moins chère que le scénario cellulaire, où le coût de construction des stations de base est très élevé.
- Déploiement sans infrastructure. L'utilisation de relais fournit le manque d'infrastructure. Dans les zones sinistrées, la coopération peut être utilisée pour communiquer de manière simple.

Malgré tous ces avantages, les communications assistées par relais présentent également certains inconvénients, résumés ci-dessous :

- Augmentation des frais généraux. Chaque liaison introduit des frais généraux, tels que la synchronisation et l'estimation de canal. Dans certains scénarios, CSI est requis à chaque nœud, ce qui entraîne une consommation importante de ressources.
- Consommation de ressources. Les communications assistées par relais établissent des liens supplémentaires entre les nœuds, qui consomment des ressources supplémentaires, telles que la batterie, la fréquence ou le temps
- Augmentation des interférences et du trafic. Les données transmises à partir de chaque nœud peuvent provoquer des interférences et peuvent augmenter le trafic pour l'ensemble du système.
- Perte d'efficacité spectrale. La communication assistée par relais est basée sur un protocole semi-duplex, ce qui entraîne une perte d'efficacité spectrale par rapport à la transmission directe.

Les avantages et les inconvénients des réseaux coopératifs conduisent à choisir convenablement les paramètres de conception du système, car l'augmentation d'un paramètre implique une diminution d'un autre paramètre. Par conséquent, une bonne décision peut être obtenue avec une solution de compromis, qui trouve les bons compromis entre les différents aspects impliqués. La figure 2.10 montre ces compromis et fournit en un coup d'œil les paramètres de conception du système à optimiser. En particulier, un bon choix tient compte des aspects suivants :

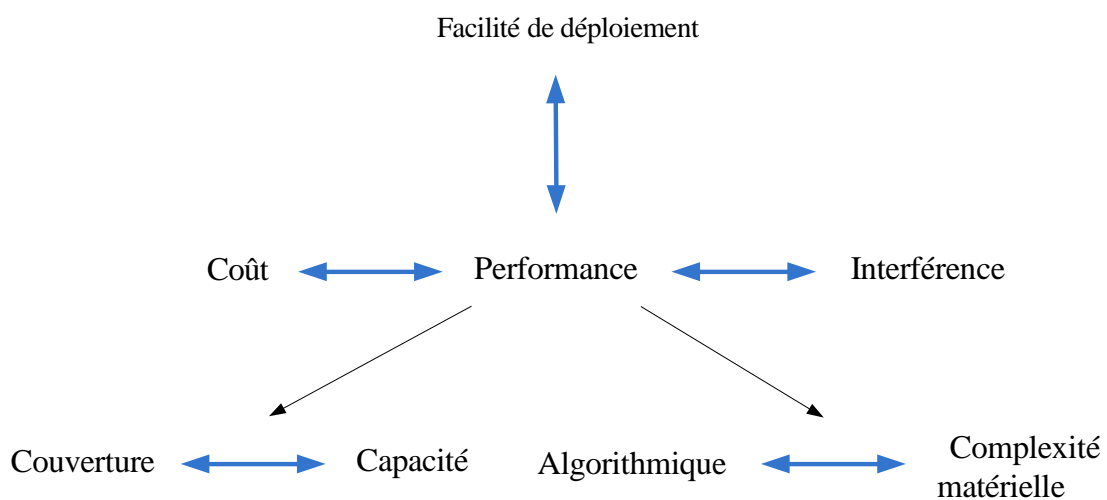


FIGURE 2.10 – Les compromis de système dans les réseaux coopératifs.

- Couverture versus capacité. Le concepteur doit choisir d'augmenter le rayon de la cellule pour fournir une plus grande couverture ou d'augmenter la capacité du système.
- Complexité algorithmique contre complexité matérielle. Le relais a une complexité matérielle relativement faible par rapport aux stations de base. La faible complexité matérielle implique une augmentation de la complexité algorithmique en raison de l'ordonnancement, de la synchronisation et du transfert.

- Interférence contre performance. Les communications assistées par relais assurent la réduction de la puissance de transmission et l'amélioration des performances en termes de couverture et de capacité. D'autre part, le relais provoque un trafic supplémentaire, ce qui produit des interférences supplémentaires.
- Facilité de déploiement par rapport aux performances. Les concepteurs de réseau peuvent déployer des relais de manière planifiée et non planifiée. Dans le premier cas, le placement et le paramétrage du nœud de relais statique sont optimisés, fournissant une tâche complexe avec des performances supérieures. Dans ce dernier cas, les coûts sont considérablement simplifiés, mais les performances sont moins bonnes.
- Coût versus Performance. Le coût impacte profondément les performances des communications coopératives.

2.5 Les protocoles de relayage

Dans les communications assistées par relais, le relais joue un rôle essentiel pour atteindre les performances souhaitées. Les protocoles de relais peuvent être classés en deux catégories, à savoir les protocoles de relais non régénératifs et régénératifs. La classification dépend des opérations effectuées par le relais, qui peuvent modifier ou non les informations. Les performances de certains de ces protocoles sont examinées pour des hypothèses plus réalistes dans [25]. La figure 2.11 montre les principaux protocoles et fournit en un coup d'œil la classification décrite dans les sections suivantes.

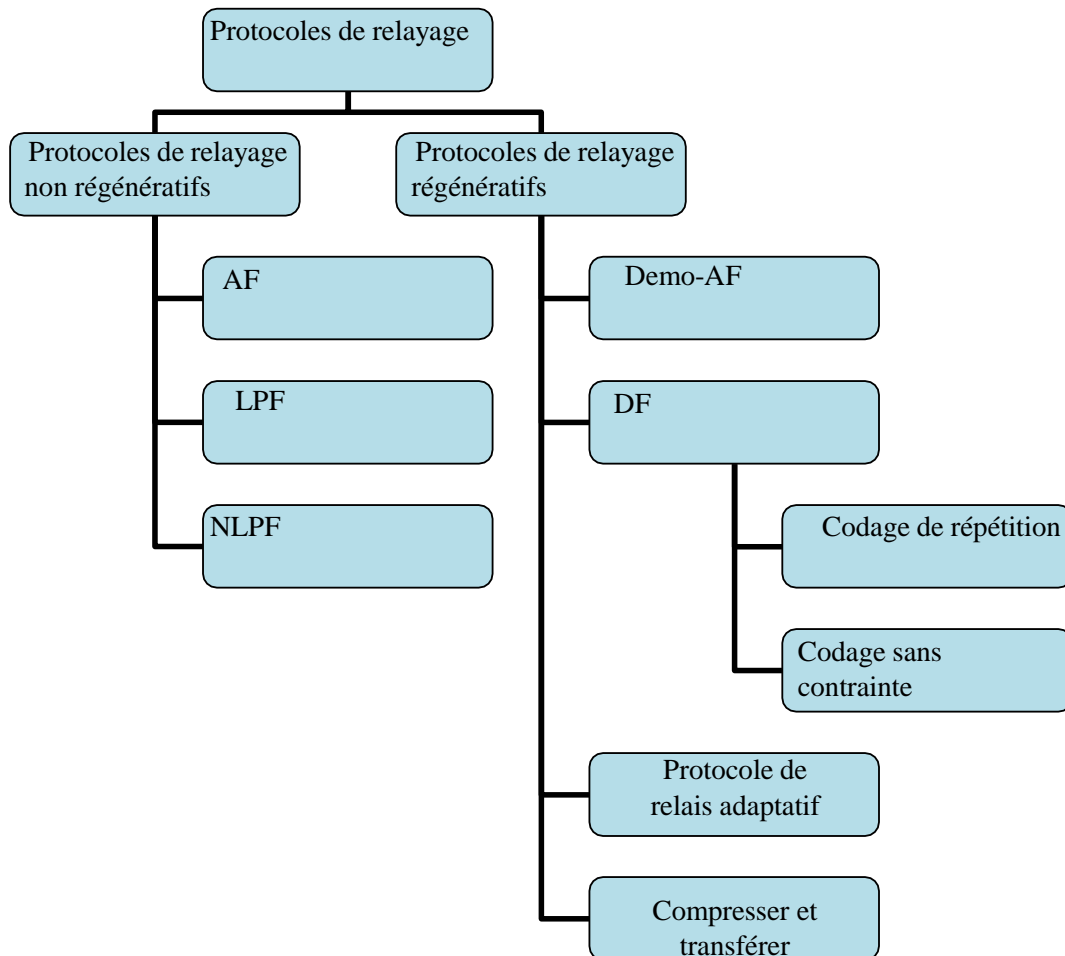


FIGURE 2.11 – Classification des principaux protocoles de relayage.

2.5.1 Protocoles de relayage non-régénératifs

Dans les protocoles de relais non régénératifs, le relais effectue des opérations simples, comme l'amplification ou la rotation de phase, sans modifier le signal provenant de la source. Voici des exemples de protocoles de relais non régénératifs :

- Amplify and forward (AF) protocol [26], [27] est le protocole de communication de relais le plus simple et le plus populaire, dans lequel le relais amplifie le signal reçu provenant de la source avant de le retransmettre à la destination. En d'autres termes, le relais transmet une version mise à l'échelle du signal reçu de la source, où le facteur d'échelle est le gain d'amplification. La décision finale est prise par la destination, où les deux copies

du signal reçu sont correctement combinées. Évidemment, l'inconvénient de ce protocole simple est l'amplification du bruit au niveau du relais. Dans AF, la qualité des estimations de canal influence les performances globales des communications assistées par relais et peut devenir un facteur limitant les performances [28], [29]. Les performances du protocole AF se dégradent avec l'augmentation de la taille du réseau. Pour cette raison, il est important de trouver le compromis entre la taille du réseau, le débit et la diversité [30]. L'AF peut minimiser la probabilité de panne en utilisant une planification intelligente basée sur la sélection et la transmission optimales d'un seul relais parmi un ensemble de multiples AF [31].

- Le protocole Linear-process and forward (LF) effectue quelques opérations linéaires simples dans le domaine analogique après amplification. Un exemple est fourni par le déphasage. Notez que le choix du traitement linéaire au niveau du relais influence les performances du système global. Le protocole NLF (Non-linear-process and forward) fournit certaines opérations non linéaires dans le domaine analogique avant la retransmission. Un exemple est fourni par l'amplification non linéaire du signal reçu [32]. Dans le protocole de relais non régénératif, le choix du facteur d'amplification est un problème de conception très important au niveau du relais. Différentes solutions peuvent être réalisées, à savoir
 - Puissance de sortie constante. Le relais transmet avec une puissance de sortie constante définie lors de la fabrication du nœud ou de la configuration préalable. C'est la manière la plus simple de réaliser un protocole non régénératif.
 - Amplification à gain fixe. Dans une fenêtre temporelle donnée, le facteur d'amplification prend une valeur constante en fonction des statistiques de canal à long terme. Le facteur d'amplification est généralement inversement proportionnel au gain moyen du canal entre la

source et le relais. Lorsque les conditions du canal sont très mauvaises, le gain moyen du canal entre la source et le relais est faible et par conséquent le facteur d'amplification est élevé; dans cette situation, la puissance d'émission maximale délimite le signal de retransmission, entraînant des effets d'écrêtage.

- Amplification à gain variable. Dans une fenêtre temporelle donnée, le facteur d'amplification n'est pas constant et prend une valeur qui dépend des changements de canal instantanés. De plus, dans ce cas, le facteur d'amplification est généralement inversement proportionnel au gain instantané du canal entre la source et le relais. Lorsque les conditions du canal ne sont pas bonnes, le facteur d'amplification est élevé pour compenser la faible valeur du gain moyen du canal entre la source et le relais; dans cette situation, la puissance d'émission maximale délimite le signal de retransmission introduisant des effets d'écrêtage.

2.5.2 Protocoles de relayage régénératifs

Dans le protocole de relais régénératif, le relais modifie les informations provenant de la source, en utilisant un matériel plus complexe et en obtenant de meilleures performances. Voici des exemples de protocoles de relais régénératifs :

- Le protocole de démodulation et de transfert (Demodulation and forward (DemAF)) [33] surmonte l'inconvénient de l'AF en éliminant l'effet des amplifications de bruit. Le relais démodule le signal reçu de la source, forme l'estimation des signaux émis, et retransmet cette estimation [34].
- Le protocole décoder et transmettre (decode-and-forward (DF)) [27], [35] considère un relais qui décode le signal reçu de la source et réencode l'information avant de la retransmettre à la destination. Le relais peut utiliser deux types de codage différents : le codage de répétition (Repetition coding (RC)

) ou le codage sans contrainte (Unconstrained coding (UC)) [36]. En codage RC, le relais retransmet les symboles en utilisant le même mot de code que la source; dans UC, le relais utilise un livre de codes différent de la source. DF est plus complexe que les protocoles AF et DemAF, mais il surpasse les performances par rapport à AF et DemAF. Lorsque la liaison source-relais souffre d'un évanouissement profond, le relais peut réencoder les bits incorrects, ce qui entraîne une propagation des erreurs. Cela implique une dégradation sévère des performances. Au contraire, lorsque la qualité du canal source-relais est meilleure que celle du canal source destination, DF atteint la capacité.

- Le protocole de relais adaptatif (Adaptive relay protocol (ARP)) [37] exploite les avantages de l'AF et du DF en minimisant leurs inconvénients en termes d'amplification du bruit et de propagation des erreurs. Le relais choisit de manière adaptative quel protocole est la meilleure option à utiliser dans certaines situations, en fonction du décodage correct. En d'autres termes, si le relais décode avec succès le signal reçu de la source, le protocole DF est utilisé; si le relais ne parvient pas à décoder, le protocole AF est utilisé.
- Le protocole Compress and Forward (Compress and forward (CF)) considère un relais qui comprime le signal reçu de la source, en utilisant le codage Wyner-Ziv pour une compression optimale. Après la compression, le relais transmet le signal à la destination. En considérant les mêmes situations, le protocole CF surpasse le protocole DF [38].

Les communications assistées par des surfaces réfléchissantes intelligentes (IRSs)

Dans ce chapitre, on discute les communications assistées par des surfaces réfléchissantes intelligentes (IRS). Tout d'abord, on parle des IRSs à Déphasages continus et des IRSs à Déphasages discrets. Ensuite, on explique c'est quoi exactement des IRSs et de leurs applications. On présente à la fin du chapitre une perspective historique sur l'état de la recherche sur les IRSs en ce qui concerne les métamatériaux et les métasurfaces, les environnements radio intelligents, et la modélisation théorique des IRSs.

Contenu du chapitre

3.1	Introduction	40
3.1.1	Les IRS avec décalages de phase continus	40
3.1.2	Les IRS avec déphasages discrets	41
3.2	Qu'est-ce qu'un RIS exactement?	42
3.3	Aperçu sur l'état de la recherche sur les surfaces intelligentes reconfigurables	44
3.3.1	Les métamatériaux et les métasurfaces	44
3.3.2	Les environnements radio intelligents	45
3.3.3	La modélisation analytique des IRSs	46
3.4	Architecture des IRSs	48
3.5	Les fonctions électromagnétiques d'une IRS	50
3.6	Un modèle pratique pour la IRS	51
3.7	Applications des IRSs	53
3.8	Les défis de l'application des IRSs	55
3.8.1	Estimation du canal	55
3.8.2	La reconfiguration de la IRS	57
3.8.3	L'optimisation du réseau	57

3.1 Introduction

Les IRSs sont envisagés pour fournir des environnements sans fil reconfigurables pour les futurs réseaux de communication, également appelés surfaces intelligentes reconfigurables (reconfigurable intelligent surfaces (RISs)) [39] et grandes surfaces intelligentes (large intelligent surfaces (LISs)) [9]. Plus précisément, un IRS est constitué d'un grand nombre d'éléments passifs reconfigurables, et chaque élément peut induire un changement d'amplitude et de phase pour le signal incident [13]. En ajustant de manière appropriée les coefficients de réflexion et les coefficients de déphasage, il peut améliorer la qualité de la liaison et améliorer considérablement la couverture [40]. Par rapport aux techniques d'aide à la communication conventionnelles, telles que les relais, les IRS consomment moins d'énergie en raison de la réflexion passive et peuvent fonctionner en mode FD (Full-duplex mode) sans auto-interférence (self-interference) [41]. Par conséquent, les IRS ont été proposés comme une solution rentable pour améliorer l'efficacité spectrale et énergétique des futurs réseaux de communication sans fil [42].

3.1.1 Les IRS avec décalages de phase continus

Les IRS ont suscité un intérêt de recherche intensif dans les universités et l'industrie [43]. Une estimation précise du canal est cruciale pour l'application des IRS. Pour les réseaux MISO multi-utilisateurs assistés par des IRS, un protocole d'estimation de canal a été conçu dans [44]. Étant donné que le surcoût de formation est proportionnel à la taille de l'IRS, il est nécessaire de concevoir une méthode d'estimation de canal avec un surcoût de formation abordable. Pour raccourcir les séquences de formation, un cadre d'estimation de canal a été proposé pour les réseaux MIMO assistés par IRS en liaison descendante dans [45]. Un algorithme basé sur le passage de messages a été conçu pour les réseaux MIMO assistés par IRS en liaison montante dans [46]. Dans [47], un schéma d'estimation de canal basé sur pilote en trois phases (a three-phase pilot-based channel esti-

mation scheme) a été proposé pour les réseaux MISO assistés par des IRS afin de réduire le temps d'estimation de canal en utilisant la redondance dans les canaux réfléchis UD(user device)-IRS-BS de différents UD. Dans [48], la supériorité d'un IRS a été indiquée par rapport à un relais DF semi-duplex (HD). Dans [49], les performances d'un système assisté par plusieurs IRS ont été évaluées et il a été révélé que le système assisté par IRS surpasse le système assisté par des relais FD-DF (FDR) lorsque le nombre d'IRS dépasse une certaine valeur. La conception de la formation de faisceaux passifs pour les IRS est essentielle aux performances du système. Dans [50], un IRS a été déployé dans un système MISO, où la transmission à rapport maximal fixe a été adoptée au niveau de la BS et les déphasages de l'IRS ont été optimisés en minimisant la probabilité de panne. Dans [51], la formation de faisceaux active et passive a été optimisée conjointement pour les systèmes MISO assistés par IRS avec des objectifs différents.

3.1.2 Les IRS avec déphasages discrets

Les travaux susmentionnés supposent que les IRS ont des déphasages continus. D'autre part, les déphasages discrets ont attiré une attention considérable en raison de leur faible complexité. Dans [52], les performances d'un système SISO assisté par IRS ont été évaluées du point de vue du débit de données. Dans [53], un système assisté par MISO IRS avec des déphasages discrets a été envisagé, et la formation de faisceau active à la BS et la formation de faisceau passive à l'IRS ont été optimisées conjointement pour maximiser le taux de somme pondérée. Dans [54], la transmission en liaison montante pour un système assisté par IRS a été étudiée. Plus précisément, les problèmes d'estimation de canal et de formation de faisceaux passifs pour l'IRS avec des déphasages discrets ont été étudiés. Dans [55], la relation entre l'amplitude de réflexion et le déphasage a été caractérisée, et la puissance d'émission a été minimisée en concevant une formation de

faisceau active et passive. Dans [56], la puissance d'émission a été minimisée en concevant la formation de faisceaux d'émission continue à la BS et la formation de faisceaux passive discrète à l'IRS. Dans [57], le taux d'erreur de symbole a été minimisé en optimisant le précodage à la BS et les déphasages à l'IRS.

3.2 Qu'est-ce qu'un RIS exactement ?

Les RIS sont une technologie de transmission émergente pour une application aux communications sans fil [58] qui est considérée comme un catalyseur clé vers le SRE (environnement radio intelligent). En termes simples, un RIS peut être considéré comme l'équivalent bidimensionnel d'un métamatériau reconfigurable et est composé d'éléments élémentaires appelés particules diffusantes ou méta-atomes. En configurant le déphasage de chaque cellule unitaire, un RIS est théoriquement capable de contrôler le comportement de l'onde radio qui le frappe. Dans la littérature récente, les quatre principales utilisations suivantes ont été envisagées.

- La réflexion/transmission anormale [59] : la RIS est configuré pour réfléchir ou réfracter les ondes radio incidentes vers des directions spécifiées qui ne respectent pas nécessairement les lois de réflexion et de réfraction. L'avantage de cette application est que le fonctionnement du RIS est indépendant des canaux d'évanouissement et des emplacements des récepteurs. La limitation est que, en général, le rapport signal/bruit n'est pas maximisé et la capacité du système n'est pas atteinte.
- Le beamforming/la focalisation [60] : la RIS est configuré de manière à concentrer les ondes radio incidentes vers des emplacements spécifiés. L'avantage de cette application est que le rapport signal sur bruit est maximisé aux emplacements d'intérêt. Le défi est que, en général, l'optimisation du RIS dépend des canaux d'évanouissement et de l'emplacement des récepteurs. En outre, la capacité du système n'est généralement pas atteinte.

- Codage émetteur/SIR conjoint [61] : la SIR est configuré de manière à optimiser la capacité du système. L'avantage de cette application est que le statut spécifique des méta-atomes est exploité pour moduler des données supplémentaires. Le défi est que, en général, l'émetteur et la SIR doivent être optimisés conjointement. De plus, la configuration du RIS dépend des canaux d'évanouissement et de l'emplacement des récepteurs.
- Conception d'émetteur multi-flux RF unique [62] : cette opération est similaire à la précédente, à la différence que l'émetteur est un simple chargeur RF situé à proximité immédiate du RIS. Le chargeur émet une porteuse non modulée vers la RIS, qui reflète plusieurs signaux modulés en données. Cette approche est adaptée pour réaliser des émetteurs multi-flux en utilisant un nombre limité de chaînes RF (même une seule).

Outre sa capacité à manipuler l'onde RF incidente, la RIS peut être pratiquement mis en œuvre car il est relativement peu coûteux, économe en énergie et très facile à déployer, en particulier dans le mur des bâtiments en raison de sa forme 2D. Par rapport, par exemple, aux réseaux phasés, aux émetteurs multi-antennes et aux relais, les RIS nécessitent le plus grand nombre d'éléments de diffusion, mais chacun d'eux doit être soutenu par les composants les moins nombreux et les moins coûteux. De plus, étant donné que les RIS sont de nature presque passive, aucune capacité de traitement du signal n'est attendue et ils ne nécessitent donc pas d'amplificateurs de puissance ou de composants à forte consommation d'énergie tels que la chaîne RF dans MIMO. Grâce à ces propriétés, RIS reçoit une attention majeure de la part de la communauté sans fil, ce qui est indiqué par le nombre explosif d'articles de recherche dans la littérature au cours des dernières années, et est considéré comme le principal catalyseur du concept émergent d'environnements radio intelligents.

3.3 Aperçu sur l'état de la recherche sur les surfaces intelligentes reconfigurables

Malgré le récent pic d'intérêt pour les RIS parmi les chercheurs de la communauté des communications sans fil, la recherche sur la métasurface ainsi que leur application pour la communication sans fil a son histoire de plusieurs décennies, allant de l'investigation théorique aux expériences et aux mesures sur le terrain. Dans cette section, nous mentionnons brièvement quelques travaux qui deviennent les jalons qui conduisent à l'état actuel de l'art de la recherche sur les RISs. Pour faciliter la lecture, nous les classons en plusieurs aspects qui représentent certaines des facettes les plus importantes de la recherche sur les RISs.

3.3.1 Les métamatériaux et les métasurfaces

Les métamatériaux électromagnétiques sont généralement définis comme des structures électromagnétiques artificielles constituées d'un réseau sous-longueur d'onde de particules de diffusion - ou métaparticules - qui sont conçues pour fournir des propriétés électromagnétiques qui ne sont pas trouvées par d'autres matériaux dans la nature [63]. L'histoire des métamatériaux commence par un article sémi-nal [64] en 1967 dans lequel les auteurs envisagent l'existence d'un matériau qui a des valeurs négatives de permittivité ϵ et de perméabilité μ . Ces matériaux sont appelés les substances "gauchères" (LH) dans [64], du fait qu'ils permettraient la propagation d'ondes électromagnétiques avec le champ électrique, le champ magnétique et les vecteurs de constante de phase construisant un triade gaucher, par rapport aux matériaux conventionnels où ce triade est connu pour être droitier [61]. Ce type de matériau, comme l'a prédit l'auteur de [64], déclenchera des phénomènes sans précédent tels que l'effet Doppler inversé et la loi de Snell inversée.

Ce n'est que plus de 30 ans après [64] que le premier matériau LH a été proposé et démontré expérimentalement par les auteurs de [65] à l'Université de Californie, San Diego (UCSD), en 2000, qui s'inspire de un travail séminal dans la même année [66] dont le but ambitieux est de créer une lentille dite parfaite. Ces travaux ont ensuite déclenché un vaste corpus de recherches et, en l'espace de 20 ans, de nouveaux matériaux ont été proposés avec des effets supplémentaires tels que le camouflage [67], le magnétisme sans aimant [68], et méta-surfaces [69], qui, dans sa première introduction, a été présenté comme un métamatériau bidimensionnel avec de nouvelles capacités de transformation de phase, d'amplitude et de polarisation. Dernièrement, grâce aux progrès récents dans des domaines tels que la nanotechnologie et la bio/chimie-technologie, la notion de métasurface a été étendue aux métasurfaces dynamiques/reconfigurables, qui consistent en des matériaux reconfigurables qui peuvent subir un changement spatio-temporel des propriétés électromagnétiques à travers le excitation électrique par une source d'énergie externe.

3.3.2 Les environnements radio intelligents

La propriété de reconfigurabilité des métasurfaces dynamiques leur a permis de trouver leur utilisation dans les communications sans fil pour rendre un processus de communication - qui est normalement fortement altéré par le caractère aléatoire spatio-temporel des canaux de communication (par exemple, sous des formes d'évanouissement, d'ombrage et de bruit) - plus fiable en transformant l'environnement sans fil (qui était classiquement aléatoire) en quelque chose qui peut être contrôlé. De plus, les métasurfaces reconfigurables peuvent également être conçues pour moduler, transmettre et recevoir leurs propres informations (au lieu d'agir comme des réflecteurs passifs), ce qui les rend adaptées aux applications d'antenne. Ces avancées dans les technologies sans fil s'accumulent

et prennent forme dans une grande vision de l'environnement radio intelligent (SRE) qui, comme nous l'avons discuté précédemment, est un concept technologique qui envisage un environnement sans fil qui peut être contrôlé pour améliorer les gains de performance de la communication en cours. processus.

En dépit d'être un domaine de recherche récemment brûlant, le terme d'environnement intelligent a en fait été envisagé dès 2003. En particulier, en 2003 et 2005 respectivement, les auteurs de [70] et [71] ont introduit le terme "surface contrôlable intelligente" pour désigner une surface de diffuseurs électriquement petits, qui peuvent être contrôlés en contrôlant les densités de polarisation des diffuseurs ou par l'inclusion d'un champ de polarisation, par exemple, afin de commuter électroniquement entre les états de réflexion et de transmission. Entre 2010 et 2012, les auteurs de [72],[73] proposent des méthodes de contrôle des environnements de propagation radio en utilisant des murs intelligents, qui sont définis comme des murs conventionnels situés à l'intérieur d'un bâtiment, mais équipés de surfaces actives sélectives en fréquence et capteurs. Ces surfaces sont constituées de matériaux spéciaux tels que des films ferroélectriques, des cristaux liquides et même de nouveaux matériaux tels que le graphène, et leurs caractéristiques de transmission et de réflexion peuvent être ajustées en fonction de la demande de trafic ou pour éviter les interférences entre les émetteurs.

3.3.3 La modélisation analytique des IRSS

Dans la poursuite de la compréhension du plein potentiel du RIS, l'une des plus grandes questions à se poser est : "comment modéliser analytiquement la RIS?". La modélisation théorique est importante pour prédire les performances d'un RIS, l'optimiser en fonction des objectifs spécifiques à atteindre (par exemple, une couverture plus large, un débit de données plus élevé et une latence plus faible) et évaluer les avantages et les limites des réseaux sans fil équipés de RIS. En termes de modélisation théorique notamment, un enjeu majeur de recherche

ouvert est le développement de modèles simples mais suffisamment précis de la puissance reçue à un endroit donné de l'espace lorsqu'un émetteur émet des ondes radio qui illuminent un RIS. Pour répondre à cette question, de manière générale, il existe plusieurs approches que l'on peut employer :

- La campagne de mesure : il s'agit de la manière la plus simple et la plus traditionnelle d'évaluer les performances d'une technologie donnée avant les applications dans le monde réel. L'avantage de cette approche est que l'on peut obtenir une évaluation réaliste des performances, en fonction des paramètres de mesure. Un exemple est le travail séminal dans [74].
- La simulation : L'avantage de cette approche, en particulier par rapport à la mesure, est qu'elle a un coût de fonctionnement inférieur et peut être utilisée pour prédire les performances de la technologie d'intérêt dans de nombreux scénarios différents. L'inconvénient de cette approche est, d'autre part, qu'elle ne fournit pas une formulation de forme fermée et, par conséquent, on ne peut pas prédire la tendance ou la loi d'échelle des performances en fonction des paramètres typiques du système sans fil, tels que la taille et les inter-distances entre les appareils. Un exemple récent de cette approche est [75], dans lequel les auteurs combinent la théorie de l'antenne et la technique de simulation pour calculer le champ électrique dans le champ proche et le champ lointain d'un RIS de taille finie, et prouvent qu'un la RIS est capable d'agir comme un miroir anormal dans le champ proche du réseau.
- La modélisation basée sur la physique : dans cette approche, l'évaluation des performances d'un RIS part de la racine de la théorie électromagnétique, à savoir les équations de Maxwell, et, à l'aide des outils nécessaires tels que l'optique géométrique et les approximations numériques, se développe en une formulation mathématique précise. L'avantage de cette approche est que la formulation mathématique obtenue par cette approche peut dévoiler

l'impact de certains paramètres du système sur les performances, permettant ainsi d'optimiser la RIS et les performances globales du système. La formulation peut aussi parfois être obtenue sous une forme fermée, auquel cas les performances d'un RIS peuvent être efficacement calculées. Dans [76], la puissance mesurée à partir de réflecteurs passifs dans la bande de fréquence des ondes millimétriques est comparée à des simulations de lancer de rayons. En optimisant la surface de la surface éclairée, on montre qu'un réflecteur passif de taille finie peut agir comme un miroir anormal.

3.4 Architecture des IRSs

L'architecture d'un RIS est illustrée sur la Fig.3.1, où une fine surface plane de plusieurs cellules unitaires est connectée à un contrôleur intelligent. Les cellules unitaires sont le principal composant de construction du RIS, tandis que le rôle du contrôleur intelligent est d'adapter l'interaction des cellules unitaires aux ondes incidentes. En général, le concept de métamatériau est le catalyseur clé pour la construction du RIS. Le domaine de recherche des métamatériaux s'intéresse aux matériaux de construction aux propriétés EM reconfigurables qui n'existent pas dans les matériaux naturels [77]. C'est pourquoi la RIS est largement connu sous

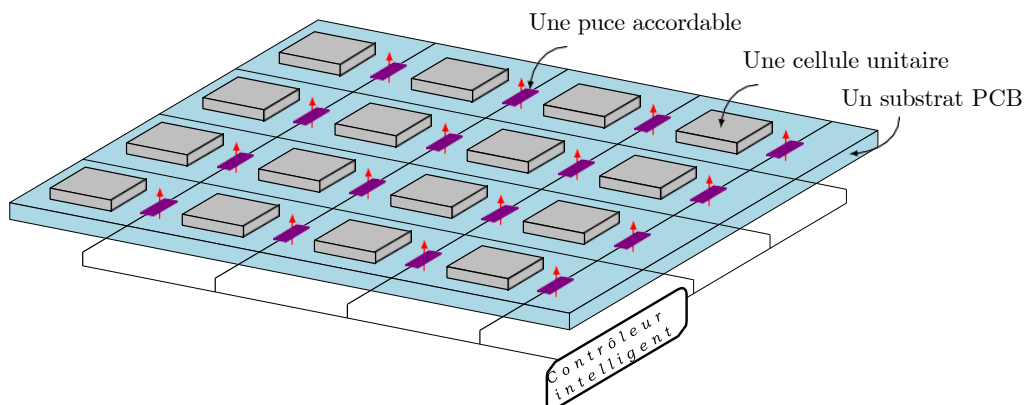


FIGURE 3.1 – L'architecture d'une IRS

le nom de méta-surface, en plus d'autres noms tels que surface réfléchissante intelligente, grande surface intelligente, diffuseurs contrôlables numériquement et

surface contrôlable par logiciel. D'autre part, la cellule unitaire est connue sous le nom de méta-atome, d'élément réfléchissant et d'élément diffusant. La cellule unitaire peut être conceptuellement réalisée comme une particule de diffusion métallique ou diélectrique de sous-longueur d'onde telle qu'une petite antenne qui est connectée à des circuits électroniques accordables comme des diodes positives intrinsèques négatives (positive intrinsic negative (PIN)), des varactors ou un système micro-électromécanique (micro-electro-mechanical system) commutateurs [58]. Les circuits électroniques accordables sont responsables de la configuration de la réponse de la cellule unitaire aux ondes électromagnétiques incidentes. La capacité de manipulation des ondes EM du RIS réside principalement dans le contrôle du coefficient de réflexion de chaque cellule unitaire sur les ondes incidentes.

Le coefficient de réflexion de la cellule unitaire est généralement alterné en contrôlant l'impédance de charge connectée à l'élément réfléchissant [78] Par exemple, dans le cas d'une diode PIN comme puce accordable pour chaque élément. Ensuite, la diode PIN peut être commutée entre les états allumé et éteint en contrôlant sa tension de polarisation, ce qui fera varier l'impédance de charge connectée à l'élément entre court-circuit et circuit ouvert. Ainsi, générant une différence de déphasage π pour le coefficient de réflexion entre le marche et l'arrêt. De plus, pour des raisons de contrôle de déphasage complet, plusieurs diodes PIN ou un varactor peuvent être connectés à chaque cellule unitaire, ce qui permettra des choix multiples ou une configuration continue pour l'impédance de charge connectée. De plus, l'amplitude du coefficient de réflexion peut être configurée en attachant une charge de résistance variable à chaque cellule unitaire qui contrôlera la partie dissipée d'énergie de l'onde incidente dans la cellule unitaire [79].

De plus, l'un des principaux avantages du RIS est qu'il s'agit d'une unité très économe en énergie car elle ne possède aucun amplificateur de puissance, aucune chaîne de radiofréquence (RF) ni aucune capacité de traitement de signal complexe. C'est pourquoi la RIS est largement connu sous le nom de RIS presque

passif car il ne consomme pas d'énergie pour la transmission et l'énergie principale est utilisée dans le processus de contrôle des circuits accordables pour alterner l'onde incidente. Cependant, des RIS actifs qui peuvent en outre amplifier les ondes radio incidentes sont possibles en intégrant des amplificateurs aux cellules unitaires [80].

3.5 Les fonctions électromagnétiques d'une IRS

La RIS peut être configuré pour prendre en charge plusieurs fonctions pour les ondes électromagnétiques incidentes. Dans la Fig. 3.2, nous présentons quelques fonctions possibles du RIS :

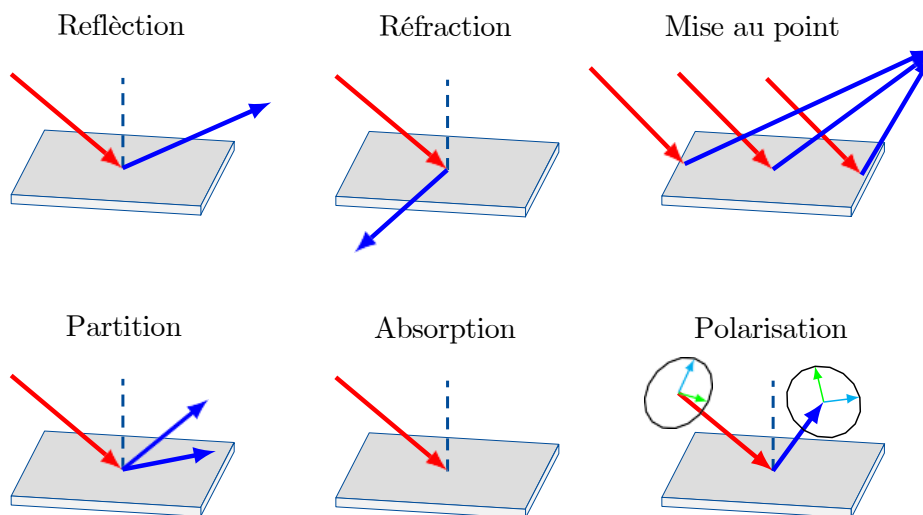


FIGURE 3.2 – Les fonctions électromagnétiques d'une SIR.

- **Réflexion** : la RIS est configurée de telle sorte que l'onde électromagnétique incidente soit réfléchiée vers une direction spécifiée où l'angle de réflexion n'est pas nécessairement égal à l'angle d'incidence selon la loi de Snell généralisée [59].
- **Réfraction** : La RIS réfracte les ondes incidentes vers une direction spécifiée. Cependant, dans ce scénario, la RIS est généralement fabriqué à partir d'un matériau non obstrué vers les ondes EM, tel qu'un substrat en verre [81].

- Mise au point : La RIS concentre toutes les ondes diffusées des cellules unitaires à un certain endroit pour maximiser la force du signal reçu à cet endroit. Cette fonction peut être réalisée en ajustant les déphasages induits à partir de toutes les cellules unitaires dans la RIS de sorte que les trajets diffusés soient ajoutés de manière constructive à un certain emplacement.
- Fractionnement : la RIS crée plusieurs ondes réfléchies et réfractées pour une seule onde incidente. Cette fonction peut être satisfaite en divisant la RIS en plusieurs sous-surfaces et en les configurant indépendamment pour diviser l'onde incidente.
- Absorption : la RIS garantit une puissance de réflexion et de réfraction minimale des ondes incidentes, ce qui peut être possible en contrôlant les coefficients de réflexion d'amplitude des cellules unitaires [82].
- Polarisation : la RIS est utilisé pour modifier l'état de polarisation entre les ondes incidentes et réfléchies/réfractées [83]. Cette fonction repose généralement sur des cellules unitaires à double polarisation, qui pourraient exciter deux états de polarisation orthogonaux et induire des déphasages indépendants pour chaque état de polarisation chaque fois qu'une onde les frappe.

3.6 Un modèle pratique pour la IRS

La plupart des études actuelles sur les applications de communications sans fil assistées par RIS supposent un modèle de réflexion idéal pour les cellules unitaires, où l'amplitude et la phase du coefficient de réflexion sont modélisées comme deux variables indépendantes. Ainsi, dans la littérature, un coefficient de réflexion d'amplitude unitaire quel que soit le déphasage est communément admis pour les cellules unitaires. Cependant, cette hypothèse est pratiquement difficile à réaliser en raison de la limitation matérielle car le coefficient de réflexion réel dé-

pend fortement de la résonance la fréquence, la résistance aux pertes et le facteur de qualité de la cellule unitaire ainsi que la fréquence de l'onde incidente. Ainsi, il a été montré dans [84] et [85] que pour une RIS pratique, il existe une relation fondamentale entre l'amplitude et la phase du coefficient de réflexion.

Une RIS est généralement fabriqué de la même manière qu'une carte de circuit imprimé (PCB), comme illustré sur la Fig. 3.1. La cellule unitaire est généralement composée d'un patch métallique sur la couche supérieure du substrat diélectrique PCB et d'une feuille métallique sur la couche inférieure du substrat [41]. De plus, chaque cellule unitaire est connectée à un circuit électronique accordable pour contrôler son coefficient de réflexion. Étant donné que la longueur physique de la cellule unitaire est généralement inférieure à la longueur d'onde de l'onde incidente, la réponse de la cellule unitaire peut être décrite par un modèle de circuit localisé équivalent [86] où les parties métalliques de la cellule unitaire sont modélisées comme inducteurs. Ainsi, les caractéristiques électriques de la cellule unitaire deviennent équivalentes à un circuit résonant parallèle comme le montre la Fig. 3.3 [55].

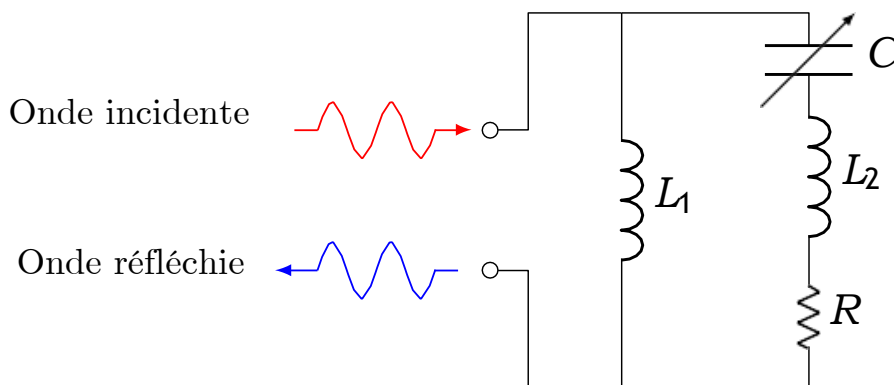


FIGURE 3.3 – Circuit localisé équivalent pour une cellule unitaire dans une RIS pratique.

3.7 Applications des IRSs

Dans cette section, nous décrivons brièvement quelques applications possibles, qui résolvent principalement les limitations fondamentales des communications sans fil classiques et font émerger de nouvelles technologies en façonnant l'environnement radio. Classiquement, dans ces cas d'utilisation, la RIS est réglée pour résoudre un certain problème d'optimisation en fonction de la métrique de performance d'intérêt dans chaque cas d'utilisation. Ainsi, ces applications n'exploitent pas seulement les fonctions EM de la RIS.

- Amélioration de la couverture : une RIS peut être déployée pour créer des liens artificiels entre la station de base (BS) et les utilisateurs qui souffrent d'une faible puissance du signal reçu ou d'un blocage [13], [87] comme illustré sur la Fig. 3.4.(a). Cette application pourrait offrir une solution prometteuse pour l'extension de la couverture, en particulier pour les communications en ondes millimétriques (mmwave) et térahertz, qui sont vulnérables au blocage par des obstacles.
- Le transfert simultané d'informations et de la puissance sans fil (Simultaneous transfer of information and wireless power (SWIPT)) : Une RIS exploite ses capacités de focalisation de faisceau élevé pour diriger les ondes incidentes vers des appareils gourmands en énergie dans le but de fournir à la fois des informations et un transfert de puissance [88], [89]. Cette application pourrait être une solution prometteuse pour plusieurs domaines tels que l'Internet des objets (IoT) et les réseaux de capteurs.
- Sécurité de la couche physique : une RIS est déployée pour détériorer intentionnellement le signal détecté par les oreilles indiscretes. Ceci peut être réalisé en réglant la RIS de manière à ce que les liens réfléchis à travers celui-ci soient ajoutés de manière destructive au signal de l'utilisateur légitime au niveau du récepteur de l'écoute clandestine, ce qui peut réduire la fuite d'informations [90], [91], comme indiqué dans Fig.3.4.(b).

- Positionnement : dans ce cas d'utilisation, les faisceaux en forme de crayon qui peuvent être formés dans un espace tridimensionnel à l'aide de grandes RISs sont utilisés pour estimer avec précision la position des terminaux [9], [92]. Cela pourrait être une application prometteuse, en particulier pour la localisation intérieure où les systèmes de positionnement global conventionnels échouent généralement en raison de la sensibilité élevée des signaux satellites au blocage.
- Amélioration du rang : dans les environnements LoS, la matrice de canaux MIMO s'avère déficiente en rang, de sorte que le multiplexage spatial devient inaccessible. Ainsi, le déploiement de RIS distribués pour agir comme des diffuseurs artificiels et synthétiser une sorte de propagation par trajets multiples de telle sorte que des degrés de liberté supplémentaires sont créés peut résoudre cette limitation fondamentale [93], [94], [95], comme illustré sur la Fig.3.4.(c).
- Utilisateurs de bord de cellule assistés par une RIS : une RIS peut être déployée sur les bords de cellule pour desservir les utilisateurs qui souffrent classiquement à la fois d'une atténuation élevée du signal de leur BS de desserte et d'interférences élevées des BS voisines. Dans ce scénario, le signal réfléchi par la RIS est ajouté de manière constructive aux utilisateurs prévus, pour créer un point chaud du signal, et de manière destructive aux utilisateurs non intentionnels pour former une région sans interférence [10], comme illustré sur la Fig.3.4.(d).

- Communications massives d'appareil à appareil (massive device to device (D2D) communications) assistées par RIS : dans ce scénario, la RIS est déployé pour agir comme un hub de réflexion pour servir les communications entre un grand nombre d'appareils à faible puissance où les signaux réfléchis sont ajoutés de manière constructive à l'utilisateur souhaité et de manière destructive chez les utilisateurs indésirables [96], [97], comme illustré sur la Fig.3.4.(e).
- Modulation assistée par une RIS : Une application prometteuse pour la RIS est de servir de point d'accès pour la transmission d'informations. Dans ce cas, la RIS exploite une source RF ambiante ou dédiée pour le codage des informations où la RIS alterne une certaine caractéristique dans le signal réfléchi pour coder les données d'information telles que son amplitude, sa phase ou sa polarisation [98], [99], [100], [39], comme illustré sur la Fig.3.4.(f).

3.8 Les défis de l'application des IRSs

Dans cette section, nous décrivons brièvement certains des principaux défis auxquels peuvent être confrontés les gains potentiels des SRI dans les applications de communications sans fil.

3.8.1 Estimation du canal

L'estimation de canal représente un goulot d'étranglement fondamental pour obtenir des gains de performances dans les communications sans fil assistées par des SRI. Le processus de réglage des coefficients de réflexion des cellules unitaires dans la SRI repose principalement sur un processus d'estimation de canal précis. Dans les applications des SRI, le problème d'estimation de canal est assez différent et beaucoup plus compliqué que celui des communications traditionnelles. Parce que dans ce scénario, deux estimations de canal supplémentaires sont nécessaires, à savoir le canal entre la SIR et la BS et le canal entre la SIR et

l'utilisateur, en plus du canal direct entre la BS et l'utilisateur. De plus, la SIR n'inclut aucune capacité de traitement de signal puissante, ce qui augmente la difficulté du processus d'estimation de canal. Le canal direct entre la BS et l'utilisateur peut être réalisé en réglant la SIR en mode d'absorption, puis en utilisant les techniques d'estimation de canal traditionnelles. Cependant, des techniques avancées et efficaces qui maintiennent la consommation d'énergie et la complexité du RIS aussi faibles que possible sont nécessaires pour mener le processus d'estimation pour les canaux RIS/BS et RIS/utilisateur.

Dans cette littérature, selon les capacités matérielles de la RIS, différentes techniques peuvent être utilisées pour l'estimation des canaux RIS/BS et RIS/utilisateur. Dans le cas d'une RIS presque passive qui n'inclut aucune chaîne RF ni capacité de traitement du signal, il devient impossible pour la RIS d'effectuer le processus d'estimation en transmettant, recevant et traitant les signaux d'apprentissage. Dans [45], les auteurs proposent une technique d'estimation de canal en cascade où un seul élément est activé à chaque fois, tandis que tous les autres éléments sont désactivés. Ensuite, en transmettant un signal pilote de l'utilisateur, le produit des canaux de cet élément particulier vers la BS et l'utilisateur est estimé au niveau de la BS. Cependant, cette méthode impose un long délai d'estimation car le RIS est typiquement constitué d'un nombre massif d'éléments. De plus, étant donné qu'un seul élément est tourné à chaque instant, cela peut dégrader la précision de l'estimation du canal. De plus, les auteurs dans [101] introduisent une autre approche, au lieu d'estimer explicitement les canaux RIS/BS et RIS/utilisateur, une technique d'estimation d'entraînement de faisceau est utilisée où le RIS balaie rapidement les coefficients de réflexion de ses éléments sur un ensemble de codes prédéfini. Ensuite, sur la base du retour de l'intensité du signal reçu par l'utilisateur, le meilleur faisceau est sélectionné pour la configuration de la RIS. De plus, une approche alternative est introduite dans [102] où la RIS possède des éléments actifs qui sont connectés pour recevoir des chaînes RF et des unités de traitement en bande de base. Ainsi, dans ce scénario, l'estimation des

canaux au niveau du RIS devient réalisable en utilisant les signaux d'apprentissage provenant de la BS et des utilisateurs. Cependant, cela peut augmenter la complexité et la consommation d'énergie de la RIS. Cependant, étant donné la corrélation élevée des canaux entre les éléments adjacents dans la RIS en raison de leurs distances d'espacement inférieures à la longueur d'onde, des résultats d'estimation précis avec un nombre limité d'éléments actifs peuvent être obtenus..

3.8.2 La reconfiguration de la IRS

Dans la communication sans fil classique, la reconfiguration de l'émetteur et du récepteur étant donné le canal sans fil a été largement étudiée. Cependant, dans la communication sans fil assistée par des RISs, l'environnement de propagation lui-même devient un paramètre d'optimisation et la RIS est généralement composée d'un nombre massif d'éléments. Par conséquent, la reconfiguration de la RIS dans les applications sans fil devient hautement non triviale. Le problème de reconfiguration de la RIS vient généralement avec plusieurs contraintes non convexes, ce qui augmente la complexité du problème. Dans la littérature, les problèmes de reconfiguration des RISs sont généralement résolus par une optimisation alternée, qui peut être prohibitive en termes de calcul. Par conséquent, des algorithmes légers pour la reconfiguration des RIS sont nécessaires, capables de reconfigurer l'environnement de propagation en temps réel.

3.8.3 L'optimisation du réseau

Lorsque le réseau contient plusieurs BS et qu'il est assisté par de nombreux RISs distribués pour desservir un grand nombre d'utilisateurs, la configuration en temps réel de l'ensemble du réseau sera une tâche difficile. Dans ce scénario, le réseau se compose de plusieurs composants séparés. Par conséquent, pour atteindre un optimum global sur l'ensemble du réseau, il faudra une énorme

CHAPITRE 3. LES COMMUNICATIONS ASSISTÉES PAR DES SURFACES RÉFLÉCHISSANTES INTELLIGENTES (IRSS)

quantité de signaux de contrôle pour l'allocation des ressources, l'allocation de puissance, la planification des utilisateurs et la configuration des RISs. Ainsi, il devient crucial de développer de nouveaux schémas d'optimisation du réseau qui ont une surcharge de calcul et une consommation d'énergie raisonnables.

CHAPITRE 3. LES COMMUNICATIONS ASSISTÉES PAR DES SURFACES RÉFLÉCHISSANTES INTELLIGENTES (IRSS)

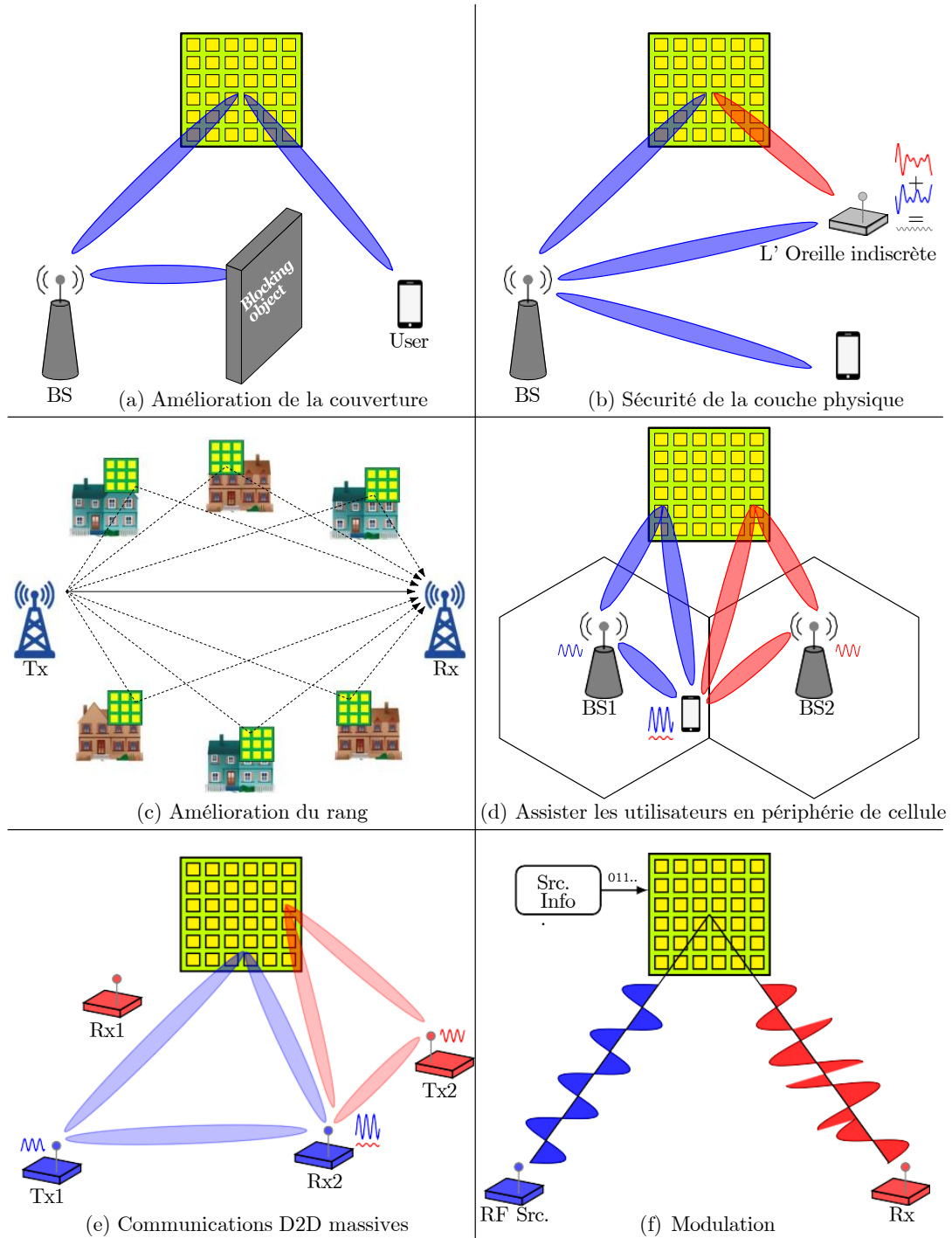


FIGURE 3.4 – Applications des IRSS

Simulations et Résultats

Le débit et l'efficacité énergétique des canaux sans fil peuvent être améliorés en déployant des métasurfaces contrôlées par logiciel (IRS) pour refléter les signaux de la source à la destination, en particulier lorsque le chemin direct est faible.

Dans ce chapitre, nous essayons de faire une comparaison équitable entre la transmission soutenue par IRS et le relais DF n terme d'efficacité énergétique.

4.1 Modèle du système

Nous considérons la communication d'une source qui possède une seule antenne vers une destination qui possède une seule antenne aussi. Le canal à évanouissement est plat et déterministe et est désigné par $h_{sd} \in \mathbb{C}$. Le signal reçu à la destination est

$$y = h_{sd}\sqrt{p}s + n, \quad (4.1)$$

où p est la puissance d'émission, s est le signal d'information de puissance unitaire et $n \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(0, \sigma^2)$ est le bruit du récepteur. Pour plus de commodité de notation, les gains d'antenne sont inclus dans les canaux. La capacité de ce canal SISO (single-input single-output) est

$$R_{\text{SISO}} = \log_2 \left(1 + \frac{p |h_{sd}|^2}{\sigma^2} \right) \quad (4.2)$$

La capacité peut potentiellement être augmentée en impliquant des équipements supplémentaires dans la communication. Dans ce travail, nous considérons deux configurations de ce type : un IRS configuré pour «refléter» le signal vers la destination ou un relais qui fonctionne en mode DF. Les taux réalisables respectifs (également connus sous le nom d'efficacité spectrale) sont donnés ci-dessous. Cependant, nous soulignons que le choix du modèle de système est biaisé en faveur de l'IRS; en particulier, l'hypothèse de canaux déterministes à évanouissement plat est idéale pour un IRS car il est moins capable de gérer l'estimation de canal et l'évanouissement sélectif en fréquence que les relais.

4.1.1 Transmission assistée par une IRS

Dans cette configuration, on considère une IRS avec N éléments discrets, comme illustré sur la Fig.4.1(a). Le canal déterministe de la source vers l'IRS est désigné par $\mathbf{h}_{sd} \in \mathbb{C}^N$, où $[\mathbf{h}_{sd}]_n$ désigne le n ème composant. Le canal entre l'IRS et la destination est indiqué par $\mathbf{h}_{rd} \in \mathbb{C}^N$. Chaque élément a une taille plus petite que

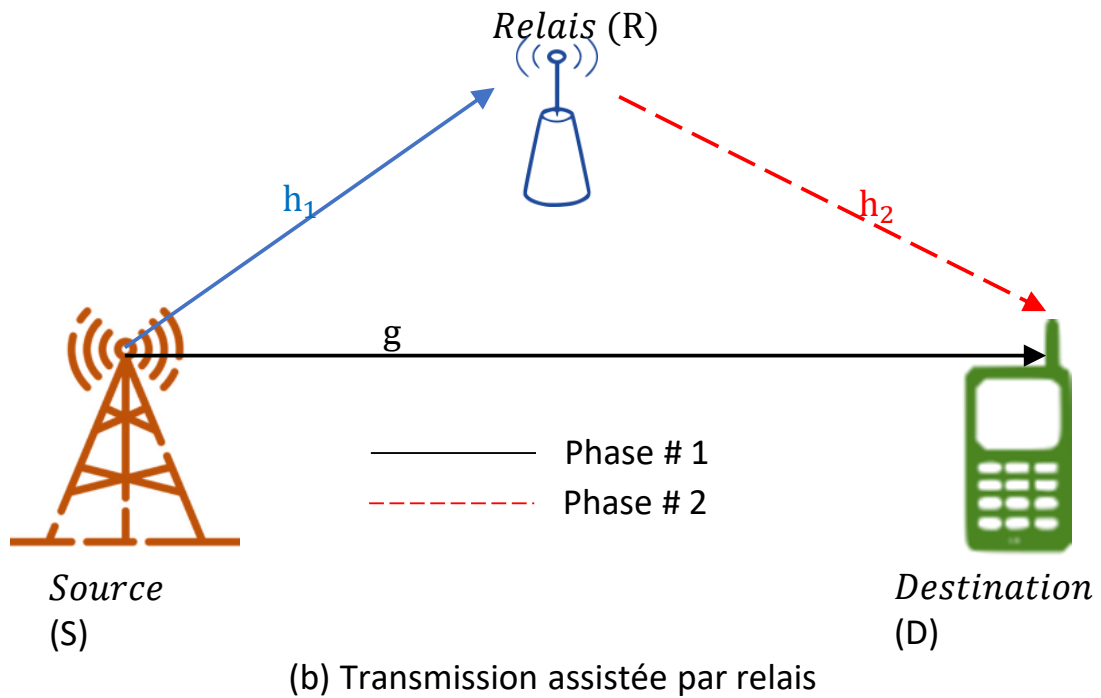
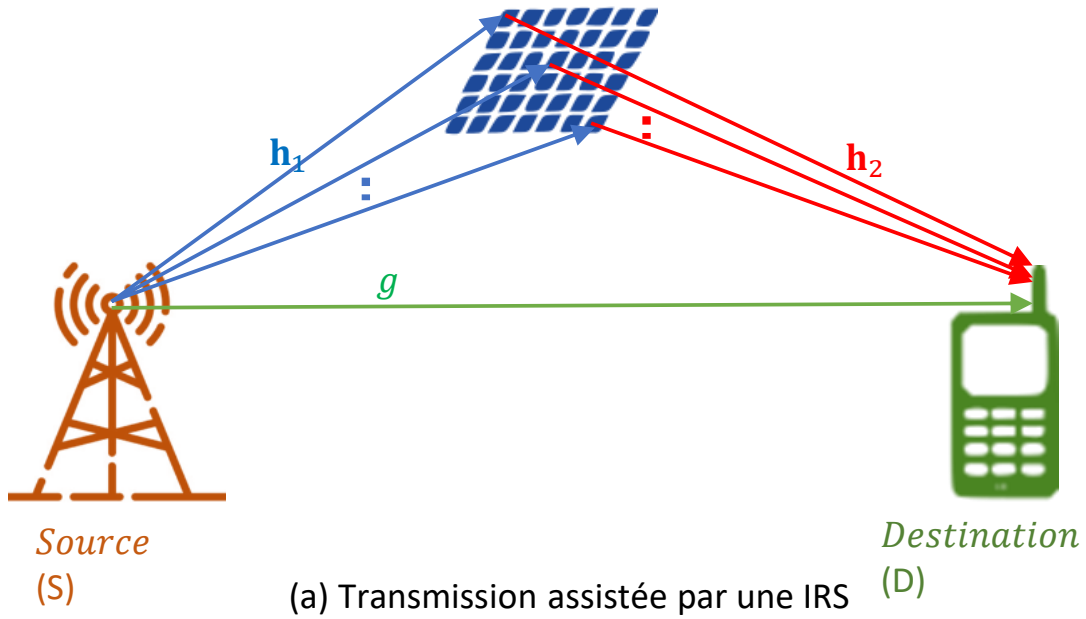


FIGURE 4.1 – Illustration des deux configurations considérées dans ce travail.

la longueur d'onde, donc il disperse le signal entrant avec un gain approximativement constant dans toutes les directions d'intérêt [?]. Les propriétés de l'IRS sont donc pleinement représentées par la matrice diagonale

$$\Theta = \alpha \text{diag} \left(e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_N} \right) \quad (4.3)$$

où $\alpha \in (0, 1]$ est le coefficient de réflexion d'amplitude fixe et $\theta_1, \dots, \theta_N$ sont les variables de déphasage qui peuvent être optimisées par l'IRS. Selon le modèle de système dérivé dans [?], le signal reçu à la destination est

$$y = \left(h_{sd} + \mathbf{h}_{sr}^T \Theta \mathbf{h}_{rd} \right) \sqrt{p} s + n \quad (4.4)$$

où p, s et n sont définis comme dans le cas SISO. Les canaux étant déterministes, la destination les connaît parfaitement et les variables de déphasage peuvent être optimisées.

La capacité de canal d'un réseau de transmission assisté par une IRS est donnée par [48]

$$\begin{aligned} R_{\text{IRS}}(N) &= \max_{\theta_1, \dots, \theta_N} \log_2 \left(1 + \frac{p |h_{sd} + \mathbf{h}_{sr}^T \Theta \mathbf{h}_{rd}|^2}{\sigma^2} \right) \\ &= \log_2 \left(1 + \frac{p \left(|h_{sd}| + \alpha \sum_{n=1}^N |[\mathbf{h}_{sr}]_n| |[\mathbf{h}_{rd}]_n| \right)^2}{\sigma^2} \right) \end{aligned} \quad (4.5)$$

4.1.2 Transmission assistée par un relais DF

Dans cette configuration alternative, nous utilisons un relais half-duplex qui est déployé au même endroit que l'IRS. Cette configuration est illustrée sur la Fig.4.1(b). Nous considérons le protocole de relais DF classique où la transmission est divisée en deux phases de taille égale. Dans la première phase, la source émet et le signal reçu à la destination est

$$y_{1d} = h_{sd} \sqrt{p_1} s + n_{1d} \quad (4.6)$$

où p_1 est la puissance d'émission, s est le signal d'information de puissance unitaire et $n_{nd} \sim \mathcal{N}_C(0, \sigma^2)$ est le bruit du récepteur. Dans la même phase, le signal reçu au relais est

$$y_{1r} = h_{sr} \sqrt{p_1} s + n_{1r} \quad (4.7)$$

où $\mathbf{h}_{sr} \in \mathbb{C}$ désigne le canal entre la source et le relais, et $n_{1r} \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(0, \sigma^2)$ est le bruit du récepteur. Le relais DF utilise y_{1r} pour décoder les informations, puis les coder à nouveau pour la transmission dans la deuxième phase. Notez que le relais peut être compact; une antenne, des chaînes d'émetteur-récepteur et une unité de bande de base s'adaptent aux dimensions d'un petit téléphone mobile.

Dans la deuxième phase, le relais émet des $\sqrt{p_2}s$ et le signal reçu à la destination est

$$y_{2d} = h_{rd}\sqrt{p_2}s + n_{2d} \quad (4.8)$$

où p_2 est la puissance d'émission, $\mathbf{h}_{rd} \in \mathbb{C}$ désigne le canal entre le relais et la destination, et $n_{2d} \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(0, \sigma^2)$ est le bruit du récepteur. En utilisant (??) et (??) pour une combinaison de rapport maximum (maximum ratio combining), le taux suivant peut être atteint à la destination [48]

$$R_{DF} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \min \left(\frac{p_1 |h_{sr}|^2}{\sigma^2}, \frac{p_1 |h_{sd}|^2}{\sigma^2} + \frac{p_2 |h_{rd}|^2}{\sigma^2} \right) \right) \quad (4.9)$$

4.2 Résultats des simulations

Nous allons maintenant comparer les systèmes numériquement. Les gains de canal sont modélisés en utilisant le 3GPP Urban Micro (UMi) du Tableau B.1.2.1-1 dans [?] avec une fréquence porteuse de $f_c=3$ GHz. Nous utilisons les versions line-of-sight (LOS) et non-LOS (NLOS) de UMi, qui sont définies pour des distances de 10 m . On note G_t et G_r les gains d'antenne (en dBi) respectivement à l'émetteur et au récepteur. Nous négligeons l'évanouissement de l'ombre (shadow fading) pour obtenir un modèle déterministe et on montre le gain du canal en fonction de la distance d et d'avoir [48]

$$\begin{aligned} & \beta(d)[\text{dB}] \\ & = G_t + G_r + \begin{cases} -28 - 22 \log_{10}(d) - 20 \log_{10}(f_c) & \text{si LOS,} \\ -22.7 - 36.7 \log_{10}(d) - 26 \log_{10}(f_c) & \text{si NLOS.} \end{cases} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Nous considérons la configuration de simulation de la Fig. 4.2, où la source et l'IRS/relais sont déployés à des emplacements fixes, tandis que l'emplacement de la destination est déterminé par la variable d_1 . Nous utilisons l'équation (4.10)

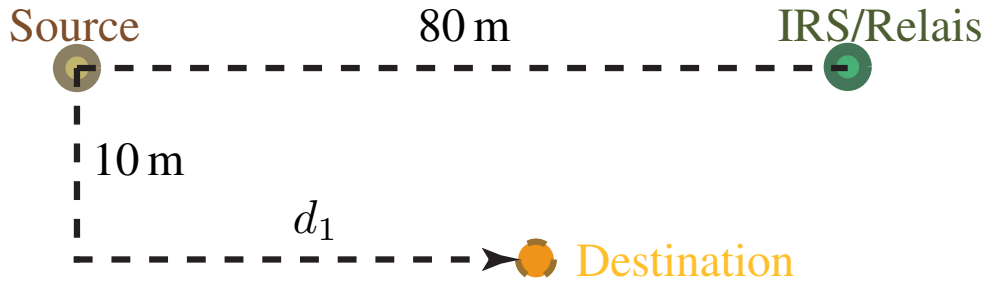
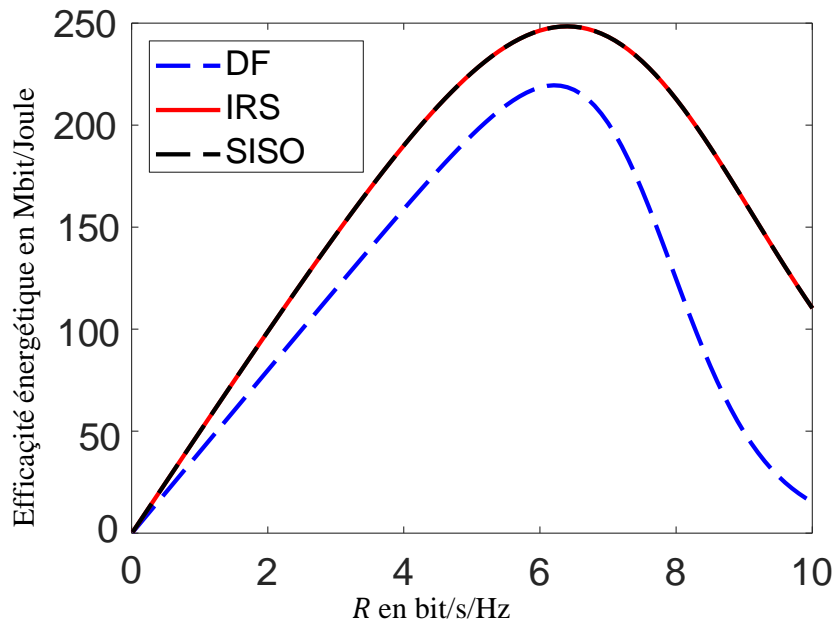


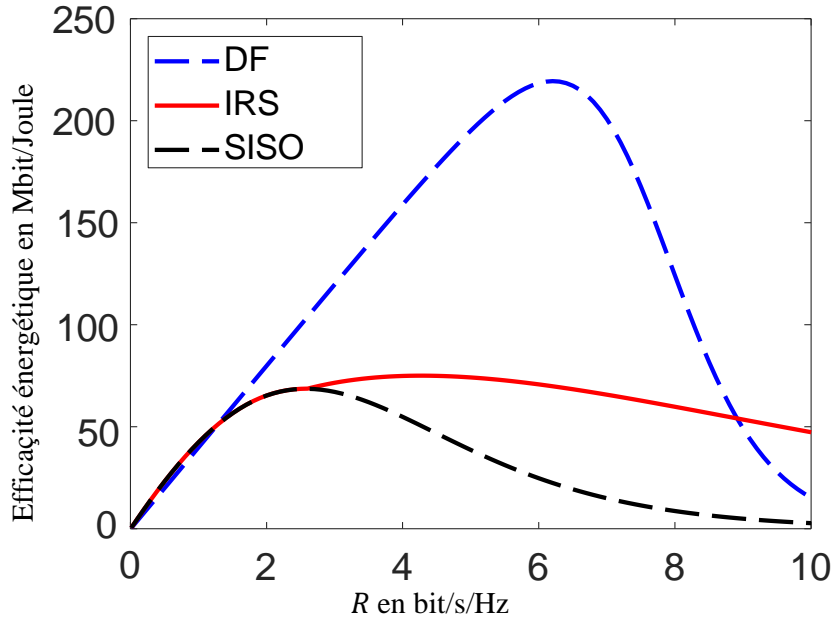
FIGURE 4.2 – La configuration de simulation où d_1 est variable.

pour calculer les gains de canal en fonction des distances, en supposant des antennes de taille égale de 5 dBi à la source et à l'IRS/relais, tandis que la destination est un combiné avec une antenne omnidirectionnelle avec 0 dBi. L'IRS et le relais sont déployés pour avoir des canaux LOS vers la source, et la destination a un canal LOS vers l'IRS/relais. On peut donc supposer $\beta_{IRS} = \beta_{sr}\beta_{rd}$. De plus, il existe un canal NLOS entre la source et la destination, ce qui conduit à un gain de canal plus faible et motive l'utilisation d'un IRS ou d'un relais pour prendre en charge la transmission.

La figure 4.3 montre l'EE en fonction de R pour des distances $d_1 \in \{40, 120\}$. Le nombre d'éléments dans l'IRS, M , est optimisé pour un EE maximal en utilisant la proposition 3 dans [48]. Nous utilisons le modèle et les équations dérivés en Sec.III-C avec $\zeta=0.5$, $P_S = P_D = P_R=100$ mW, $P_e=5$ mW [48],[13]. Pour une distance $d_1=40$ m, les cas IRS et SISO fournissent le même EE le plus élevé quel que soit le taux R . Pour $d_1=120$ m, le cas de relayage DF fournit l'EE le plus élevé pour presque toutes les valeurs moyennes du débit ($2 \leq R \leq 9$). Ce n'est que pour $R > 9$ bit/s/Hz que l'IRS fournit un EE plus élevé que le relais DF.



(a) $d_1 = 40$ m



(b) $d_1 = 120$ m

FIGURE 4.3 – L'efficacité énergétique en fonction du taux \bar{R} .

Conclusion et perspectives

Dans ce travail de recherche, une étude sur les système de transmission SISO assisté par des surfaces intelligentes a été effectuée. Tout d'abord, on a étudié les principes des systèmes des communication assistées par des relais. Ensuite, les communications assistées par des surfaces réfléchissantes intelligentes (IRSs) ont été abordés.

A la fin, On a mené une comparaison équitable entre systèmes des communication assistées par des IRSs et leurs contrepart assistées par des relais DF, en terme d'efficacité énergétique.

Ce travail met en évidence la puissance des systèmes de transmission assistés par des IRSs qui demeure un sujet de recherche.

Malgré la contribution faite dans ce mémoire et dans d'autres travaux sur les systèmes de transmission assistés, plusieurs problèmes restent à résoudre. En effet, quelqu'un peut considérer le problème d'estimation du canal pour ce type de systèmes, donc hybridation avec d'autres techniques prometteuses telles les MIMO massifs (Intelligent Reflecting Surface Assisted Massive MIMO networks).

Bibliographie

- [1] Savo Glisic. Advanced wireless communications and internet : Future evolving technologies. 2011.
- [2] Fredrik Rusek, Daniel Persson, Buon Kiong Lau, Erik G. Larsson, Thomas L. Marzetta, Ove Edfors, and Fredrik Tufvesson. Scaling up mimo : Opportunities and challenges with very large arrays. *IEEE Signal Processing Magazine*, 30 :40–60, 2013.
- [3] Erik G. Larsson, Ove Edfors, Fredrik Tufvesson, and Thomas L. Marzetta. Massive mimo for next generation wireless systems. *IEEE Communications Magazine*, 52 :186–195, 2014.
- [4] Thomas L. Marzetta. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 9 :3590–3600, 2010.
- [5] Stefano Buzzi, I Chih-Lin, Thierry E. Klein, H. Vincent Poor, Chenyang Yang, and Alessio Zappone. A survey of energy-efficient techniques for 5g networks and challenges ahead. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34 :697–709, 2016.

- [6] Shunqing Zhang, Qingqing Wu, Shugong Xu, and Geoffrey Y. Li. Fundamental green tradeoffs : Progresses, challenges, and impacts on 5g networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19 :33–56, 2017.
- [7] Xin Tan, Zhi Sun, Dimitrios Koutsonikolas, and Josep Miquel Jornet. Enabling indoor mobile millimeter-wave networks based on smart reflect-arrays. *IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications*, pages 270–278, 2018.
- [8] Christos K. Liaskos, Shuai Nie, Ageliki Tsioliaridou, Andreas Pitsillides, Sotiris Ioannidis, and Ian F. Akyildiz. A new wireless communication paradigm through software-controlled metasurfaces. *IEEE Communications Magazine*, 56 :162–169, 2018.
- [9] Sha Hu, Fredrik Rusek, and Ove Edfors. Beyond massive mimo : The potential of data transmission with large intelligent surfaces. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 66 :2746–2758, 2018.
- [10] Cunhua Pan, Hong Ren, Kezhi Wang, Wei Xu, Maged ElKashlan, Arumugam Nallanathan, and Lajos Hanzo Hanzo. Multicell mimo communications relying on intelligent reflecting surfaces. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 19 :5218–5233, 2020.
- [11] Yuanwei Liu, Xiao Liu, Xidong Mu, Tianwei Hou, Jiaqi Xu, Marco Di Renzo, and Naofal Al-Dhahir. Reconfigurable intelligent surfaces : Principles and opportunities. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23 :1546–1577, 2021.
- [12] Qingqing Wu and Rui Zhang. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18 :5394–5409, 2019.

- [13] Chongwen Huang, Alessio Zappone, George C. Alexandropoulos, Mérouane Debbah, and Chau Yuen. Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18 :4157–4170, 2019.
- [14] Richard H. Engelmann. The origins of radio. *IEEE Potentials*, 19 :41–44, 2000.
- [15] The world in your pocket. *The Economist*, 1999.
- [16] Jeffrey Collins, Suku Nair, and Krish Prabhu. 5g deployment considerations to enable consumer innovation. *2021 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, pages 1–6, 2021.
- [17] Matthias Patzold. Fifth-generation technology offers trillion-dollar business opportunities [mobile radio]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 12 :4–11, 2017.
- [18] Ericsson mobility report. <https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2018/ericsson-mobility-report-june-2018.pdf>, June 2018.
- [19] Wei Lu and Marco di Renzo. Stochastic geometry modeling and system-level analysis & optimization of relay-aided downlink cellular networks. *IEEE Transactions on Communications*, 63 :4063–4085, 2015.
- [20] Yuan Shen, Henk Wymeersch, and Moe Z. Win. Fundamental limits of wideband cooperative localization via fisher information. *2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pages 3951–3955, 2007.
- [21] Davide Dardari, Andrea Conti, Jaime Lien, and Moe Z. Win. The effect of cooperation on uwb-based positioning systems using experimental data. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2008 :1–11, 2008.
- [22] Henk Wymeersch, Ulric J. Ferner, and Moe Z. Win. Cooperative bayesian self-tracking for wireless networks. *IEEE Communications Letters*, 12, 2008.

- [23] Neal Patwari, Joshua N. Ash, Spyros Kyperountas, Alfred O. Hero, Randolph L. Moses, and Neiyer S. Correal. Locating the nodes : cooperative localization in wireless sensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, 22 :54–69, 2005.
- [24] Jian Zhao. Analysis and design of communication techniques in spectrally efficient wireless relaying systems. 2010.
- [25] Ernesto Zimmermann, Patrick Herhold, and Gerhard P. Fettweis. On the performance of cooperative diversity protocols in practical wireless systems. *2003 IEEE 58th Vehicular Technology Conference. VTC 2003-Fall (IEEE Cat. No.03CH37484)*, 4 :2212–2216 Vol.4, 2003.
- [26] Shinya Sugiura, Sheng L. Chen, and Lajos Hanzo. Cooperative differential space–time spreading for the asynchronous relay aided cdma uplink using interference rejection spreading code. *IEEE Signal Processing Letters*, 17 :117–120, 2010.
- [27] Li Wang and Lajos Hanzo. The resource-optimized differentially modulated hybrid af/df cooperative cellular uplink using multiple-symbol differential sphere detection. *IEEE Signal Processing Letters*, 16 :965–968, 2009.
- [28] Berna Gedik and Murat Uysal. Impact of imperfect channel estimation on the performance of amplify-and-forward relaying. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8 :1468–1479, 2009.
- [29] Chirag S. Patel and Gordon L. Stüber. Channel estimation for amplify and forward relay based cooperation diversity systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 6, 2007.
- [30] Shashi Borade, Lizhong Zheng, and Robert G. Gallager. Amplify-and-forward in wireless relay networks : Rate, diversity, and network size. *IEEE Transactions on Information Theory*, 53 :3302–3318, 2007.

- [31] Aggelos Bletsas, Hyundong Shin, and Moe Z. Win. Outage optimality of opportunistic amplify-and-forward relaying. *IEEE Communications Letters*, 11, 2007.
- [32] Ibrahim C. Abou-Faycal and Muriel Médard. Optimal uncoded regeneration for binary antipodal signaling. *2004 IEEE International Conference on Communications (IEEE Cat. No.04CH37577)*, 2 :742–746 Vol.2, 2004.
- [33] Haitao Xiong, Jing Xu, and Ping Wang. Frequency-domain equalization and diversity combining for demodulate-and-forward cooperative systems. *2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, pages 3245–3248, 2008.
- [34] Krishna Srikanth Gomadam and Syed Ali Jafar. Optimal relay functionality for snr maximization in memoryless relay networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 25, 2007.
- [35] Zhihang Yi and Il Kim. Diversity order analysis of the decode-and-forward cooperative networks with relay selection. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7, 2008.
- [36] J. Nicholas Laneman, David Tse, and Gregory W. Wornell. Cooperative diversity in wireless networks : Efficient protocols and outage behavior. *IEEE Transactions on Information Theory*, 50 :3062–3080, 2004.
- [37] Yonghui Li and Branka Vucetic. On the performance of a simple adaptive relaying protocol for wireless relay networks. *VTC Spring 2008 - IEEE Vehicular Technology Conference*, pages 2400–2405, 2008.
- [38] Bahareh Akhbari, Mahtab Mirmohseni, and Mohammad Reza Aref. Compress-and-forward strategy for the relay channel with non-causal state information. *2009 IEEE International Symposium on Information Theory*, pages 1169–1173, 2009.

- [39] Ertuğrul Başar. Reconfigurable intelligent surface-based index modulation : A new beyond mimo paradigm for 6g. *IEEE Transactions on Communications*, 68 :3187–3196, 2020.
- [40] Gui Zhou, Cunhua Pan, Hong Ren, Kezhi Wang, and Arumugam Nallanathan. A framework of robust transmission design for irs-aided miso communications with imperfect cascaded channels. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 68 :5092–5106, 2020.
- [41] Qingqing Wu and Rui Zhang. Towards smart and reconfigurable environment : Intelligent reflecting surface aided wireless network. *IEEE Communications Magazine*, 58 :106–112, 2020.
- [42] Miao Cui, Guangchi Zhang, and Rui Zhang. Secure wireless communication via intelligent reflecting surface. *IEEE Wireless Communications Letters*, 8 :1410–1414, 2019.
- [43] Weiping Shi, Xiaobo Zhou, Linqiong Jia, Yongpeng Wu, Feng Shu, and Jiangzhou Wang. Enhanced secure wireless information and power transfer via intelligent reflecting surface. *IEEE Communications Letters*, 25 :1084–1088, 2021.
- [44] Deepak Mishra and Håkan Johansson. Channel estimation and low-complexity beamforming design for passive intelligent surface assisted miso wireless energy transfer. *ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pages 4659–4663, 2019.
- [45] Zhen-Qing He and Xiaojun Yuan. Cascaded channel estimation for large intelligent metasurface assisted massive mimo. *IEEE Wireless Communications Letters*, 9 :210–214, 2020.

- [46] Hang Liu, Xiaojun Yuan, and Ying-Jun Angela Zhang. Matrix-calibration-based cascaded channel estimation for reconfigurable intelligent surface assisted multiuser mimo. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 38 :2621–2636, 2020.
- [47] Zhaorui Wang, Liang Liu, and Shuguang Cui. Channel estimation for intelligent reflecting surface assisted multiuser communications : Framework, algorithms, and analysis. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 19 :6607–6620, 2020.
- [48] Emil Björnson, Özgecan Özdoğan, and Erik G. Larsson. Intelligent reflecting surface versus decode-and-forward : How large surfaces are needed to beat relaying? *IEEE Wireless Communications Letters*, 9 :244–248, 2020.
- [49] Jiangbin Lyu and Rui Zhang. Spatial throughput characterization for intelligent reflecting surface aided multiuser system. *IEEE Wireless Communications Letters*, 9 :834–838, 2020.
- [50] C. L. Guo, Ying Cui, Feng Yang, and Lianghai Ding. Outage probability analysis and minimization in intelligent reflecting surface-assisted miso systems. *IEEE Communications Letters*, 24 :1563–1567, 2020.
- [51] Xianghao Yu, Dongfang Xu, and Robert Schober. Miso wireless communication systems via intelligent reflecting surfaces : (invited paper). *2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, pages 735–740, 2019.
- [52] Jindan Xu, Wei Xu, and A. L. Swindlehurst. Discrete phase shift design for practical large intelligent surface communication. *2019 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM)*, pages 1–5, 2019.

- [53] Huayan Guo, Ying-Chang Liang, Jie Chen, and Erik G. Larsson. Weighted sum-rate maximization for reconfigurable intelligent surface aided wireless networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 19 :3064–3076, 2020.
- [54] Changsheng You, Beixiong Zheng, and Rui Zhang. Channel estimation and passive beamforming for intelligent reflecting surface : Discrete phase shift and progressive refinement. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 38 :2604–2620, 2020.
- [55] Samith Abeywickrama, Rui Zhang, Qingqing Wu, and Chau Yuen. Intelligent reflecting surface : Practical phase shift model and beamforming optimization. *IEEE Transactions on Communications*, 68 :5849–5863, 2020.
- [56] Qingqing Wu and Rui Zhang. Beamforming optimization for wireless network aided by intelligent reflecting surface with discrete phase shifts. *IEEE Transactions on Communications*, 68 :1838–1851, 2020.
- [57] Jia Ye, Shuaishuai Guo, and Mohamed-Slim Alouini. Joint reflecting and precoding designs for ser minimization in reconfigurable intelligent surfaces assisted mimo systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 19 :5561–5574, 2020.
- [58] Marco di Renzo, Alessio Zappone, Mérouane Debbah, Mohamed-Slim Alouini, Chau Yuen, Julien de Rosny, and Sergei A. Tretyakov. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces : How it works, state of research, and the road ahead. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 38 :2450–2525, 2020.
- [59] Nanfang Yu, Patrice Genevet, Mikhail A. Kats, Francesco Aieta, Jean-Philippe Tetienne, Federico Capasso, and Zeno Gaburro. Light propagation with phase discontinuities : Generalized laws of reflection and refraction. *Science*, 334 :333 – 337, 2011.

- [60] Venkat Arun and H. Balakrishnan. Rfocus : Practical beamforming for small devices. *ArXiv*, abs/1905.05130, 2019.
- [61] Christophe Caloz and Tatsuo Itoh. Electromagnetic metamaterials : transmission line theory and microwave applications : the engineering approach. 2005.
- [62] Wankai Tang, Ming Zheng Chen, Jun Yan Dai, Yong Zeng, Xinsheng Zhao, Shi Jin, Qiang Cheng, and Tie Jun Cui. Wireless communications with programmable metasurface : New paradigms, opportunities, and challenges on transceiver design. *IEEE Wireless Communications*, 27 :180–187, 2020.
- [63] Christophe Caloz and Zoé-Lise Deck-Léger. Spacetime metamaterials—part i : General concepts. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 68 :1569–1582, 2020.
- [64] Viktor G. Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of epsilon and mu. *Physics-Uspekhi*, 10 :509–514, 1968.
- [65] Smith, Padilla, Vier, Nemat-Nasser, and Schultz. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Physical review letters*, 84 18 :4184–7, 2000.
- [66] Pendry. Negative refraction makes a perfect lens. *Physical review letters*, 85 18 :3966–9, 2000.
- [67] David Schurig, Jack J. Mock, B. J. Justice, Steven A. Cummer, John Brian Pendry, Anthony Starr, and D. Robert Smith. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *Science*, 314 :977 – 980, 2006.
- [68] Christophe Caloz and Andrea Alú. Guest editorial special cluster on magnetless nonreciprocity in electromagnetics. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018.

- [69] Toshiro Kodera, Dimitrios L. Sounas, and Christophe Caloz. Artificial faraday rotation using a ring metamaterial structure without static magnetic field. *Applied Physics Letters*, 99 :031114, 2011.
- [70] Edward F. Kuester, M. A. Mohamed, Melinda Piket-May, and Christopher L. Holloway. Averaged transition conditions for electromagnetic fields at a metafilm. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 51 :2641–2651, 2003.
- [71] Christopher L. Holloway, M. A. Mohamed, Edward F. Kuester, and Andrew Dienstfrey. Reflection and transmission properties of a metafilm : with an application to a controllable surface composed of resonant particles. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 47 :853–865, 2005.
- [72] Ludek Subrt and Pavel Pechac. Controlling propagation environments using intelligent walls. *2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, pages 1–5, 2012.
- [73] Ludek Subrt and Pavel Pechac. Intelligent walls as autonomous parts of smart indoor environments. *IET Commun.*, 6 :1004–1010, 2012.
- [74] Nadège Kaina, Matthieu Dupre, Geoffroy Lerosey, and Mathias Fink. Shaping complex microwave fields in reverberating media with binary tunable metasurfaces. *Scientific Reports*, 4, 2014.
- [75] Juan Carlos Bucheli Garcia, Alain Sibille, and Mohamed Amine Kamoun. Reconfigurable intelligent surfaces : Bridging the gap between scattering and reflection. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 38 :2538–2547, 2020.
- [76] Wahab Ali Gulzar Khawaja, Ozgur Ozdemir, Yavuz Yapıcı, Fatih Erden, and Ismail Guvenc. Coverage enhancement for nlos mmwave links using passive reflectors. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 1 :263–281, 2020.

- [77] Tie Jun Cui, Mei Qing Qi, Xiang Wan, Jie Zhao, and Qiang Cheng. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. *Light-Science & Applications*, 3, 2014.
- [78] Bo O. Zhu, Junming Zhao, and Yijun Feng. Active impedance metasurface with full 360° reflection phase tuning. *Scientific Reports*, 3, 2013.
- [79] Huanhuan Yang, Xibi Chen, Fan Yang, Shenheng Xu, Xiangyu Cao, Maokun Li, and Jun Gao. Design of resistor-loaded reflectarray elements for both amplitude and phase control. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16 :1159–1162, 2017.
- [80] Marek E. Bialkowski, Ashley W. Robinson, and Hyok J. Song. Design, development, and testing of x-band amplifying reflectarrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 50 :1065–1076, 2002.
- [81] Daisuke Kitayama, Yuto Hama, Kenta Goto, Kensuke Miyachi, Takeshi Motegi, and Osamu Kagaya. Transparent dynamic metasurface for a visually unaffected reconfigurable intelligent surface : controlling transmission/reflection and making a window into an rf lens. *Optics express*, 29 18 :29292–29307, 2021.
- [82] Hyung Ki Kim, Dongju Lee, and Sungjoon Lim. Frequency-tunable metamaterial absorber using a varactor-loaded fishnet-like resonator. *Applied optics*, 55 15 :4113–8, 2016.
- [83] Huanhuan Yang, Xiangyu Cao, Fan Yang, Jun Gao, Shenheng Xu, Maokun Li, Xibi Chen, Yi Zhao, Yuejun Zheng, and Sijia Li. A programmable metasurface with dynamic polarization, scattering and focusing control. *Scientific Reports*, 6, 2016.
- [84] Wenhao Cai, Hongyu Li, Ming Li, and Li-Yu Daisy Liu. Practical modeling and beamforming for intelligent reflecting surface aided wideband systems. *IEEE Communications Letters*, 24 :1568–1571, 2020.

- [85] Hongyu Li, Wenhao Cai, Yang Liu, Ming Li, and Li-Yu Daisy Liu. Intelligent reflecting surface enhanced wideband mimo-ofdm communications : From practical model to reflection optimization. *IEEE Transactions on Communications*, 69 :4807–4820, 2021.
- [86] Slawomir Koziel and Leifur Þ. Leifsson. Surrogate-based modeling and optimization. 2013.
- [87] Qurrat-Ul-Ain Nadeem, Abla Kammoun, Anas Chaaban, Mérouane Debah, and Mohamed-Slim Alouini. Asymptotic max-min sinr analysis of reconfigurable intelligent surface assisted miso systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 19 :7748–7764, 2020.
- [88] Cunhua Pan, Hong Ren, Kezhi Wang, Maged ElKashlan, Arumugam Nallanathan, Jiangzhou Wang, and Lajos Hanzo Hanzo. Intelligent reflecting surface aided mimo broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 38 :1719–1734, 2020.
- [89] Yizheng Tang, Ganggang Ma, Hailiang Xie, Jie Xu, and Xiao Han. Joint transmit and reflective beamforming design for irs-assisted multiuser miso swipt systems. *ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–6, 2020.
- [90] Xianghao Yu, Dongfang Xu, and Robert Schober. Enabling secure wireless communications via intelligent reflecting surfaces. *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–6, 2019.
- [91] Hong Shen, Wei Xu, Shulei Gong, Zhenyao He, and Chunming Zhao. Secrecy rate maximization for intelligent reflecting surface assisted multi-antenna communications. *IEEE Communications Letters*, 23 :1488–1492, 2019.

- [92] Henk Wymeersch, Jiguang He, Benoît Denis, Antonio Clemente, and Markku J. Juntti. Radio localization and mapping with reconfigurable intelligent surfaces : Challenges, opportunities, and research directions. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 15 :52–61, 2020.
- [93] Emad Ibrahim, Rickard Nilsson, and Jaap van de Beek. Intelligent reflecting surfaces for mimo communications in los environments. *2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1–6, 2021.
- [94] Özgecan Özdoğan, Emil Björnson, and Erik G. Larsson. Using intelligent reflecting surfaces for rank improvement in mimo communications. *ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pages 9160–9164, 2020.
- [95] Joongsub Choi, Girim Kwon, and Hyuncheol Park. Joint beamforming design for los mimo systems with multiple intelligent reflecting surfaces. *MILCOM 2021 - 2021 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, pages 267–272, 2021.
- [96] Gang Yang, Yating Liao, Ying-Chang Liang, and Olav Tirkkonen. Reconfigurable intelligent surface empowered underlying device-to-device communication. *2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1–6, 2021.
- [97] Yashuai Cao, Tiejun Lv, Wei Ni, and Zhipeng Lin. Sum-rate maximization for multi-reconfigurable intelligent surface-assisted device-to-device communications. *IEEE Transactions on Communications*, 69 :7283–7296, 2021.
- [98] Emad Ibrahim, Rickard Nilsson, and Jaap van de Beek. Binary polarization shift keying with reconfigurable intelligent surfaces. *ArXiv*, abs/2112.08172, 2022.

- [99] Emad Ibrahim, Rickard Nilsson, and Jaap van de Beek. Differential polarization shift keying through reconfigurable intelligent surfaces. *ArXiv*, abs/2201.12226, 2022.
- [100] Wenjing Yan, Xiaojun Yuan, and Xiaoyan Kuai. Passive beamforming and information transfer via large intelligent surface. *IEEE Wireless Communications Letters*, 9 :533–537, 2020.
- [101] Boyu Ning, Zhi Chen, Wenrong Chen, Yimin Du, and Jun Fang. Terahertz multi-user massive mimo with intelligent reflecting surface : Beam training and hybrid beamforming. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70 :1376–1393, 2021.
- [102] Xiaojun Yuan, Ying-Jun Zhang, Yuanming Shi, Wenjing Yan, and Hang Liu. Reconfigurable-intelligent-surface empowered wireless communications : Challenges and opportunities. *IEEE Wireless Communications*, 28 :136–143, 2021.

Abstract

Intelligent Reflecting Surfaces (IRSs), also known as reconfigurable intelligent surfaces (RISs) and large intelligent surfaces (LISs), are envisioned to provide reconfigurable wireless environments for future communication networks. By appropriately adjusting the reflection coefficients and the phase shift coefficients, they improve the link quality and significantly improve the coverage. Compared to conventional communication's assisting techniques, such as relays, IRSs consume less power due to passive reflection and can operate in a full-duplex (FD) mode without self-interference. Therefore, IRSs have been proposed as a cost-effective solution to improve the spectral and energy efficiency of future wireless communication networks.

In this work, we carried out a fair comparison between communication systems assisted by IRSs and their counterparts assisted by DF relays, in terms of energy efficiency.

Keywords: spectral/energy efficiency, 5G, Intelligent Reflecting Surfaces (IRSs), reconfigurable intelligent surfaces (RISs), large intelligent surfaces (LISs), full-duplex (FD) mode.

مُلخَّص:

الأسطح العاكسة الذكية (IRS)، والمعروفة أيضًا باسم الأسطح الذكية القابلة لإعادة التكوين (RISs) والأسطح الذكية الكبيرة (LISs)، من المتصور أن توفر بيئات لاسلكية قابلة لإعادة التكوين لشبكات الاتصالات المستقبلية. من خلال ضبط معاملات الانعكاس ومعاملات تحول الطور بشكل مناسب، فإنها تعمل على تحسين جودة الارتباط وتحسين التغطية بشكل كبير.

مقارنة بتقنيات مساعدة الاتصالات التقليدية، مثل المرحلات، تستهلك ال IRS طاقة أقل بسبب الانعكاس السلبي ويمكن أن تعمل في وضع ثنائي الاتجاه (FD) دون تداخل ذاتي. لذلك، تم اقتراح ال IRS كحل فعال من حيث التكلفة لتحسين كفاءة الطيف والطاقة لشبكات الاتصالات اللاسلكية المستقبلية.

في هذا العمل، أجرينا مقارنة عادلة بين أنظمة الاتصال بمساعدة ال IRS ونظيراتها بمساعدة مرحلات DF، من حيث كفاءة الطاقة.

Résumé

Les surfaces réfléchissantes intelligentes (Intelligent Reflecting Surfaces (IRSs)), également appelés surfaces intelligentes reconfigurables (reconfigurable intelligent surfaces (RISs)) et grandes surfaces intelligentes (large intelligent surfaces (LISs)), sont envisagés pour fournir des environnements sans fil reconfigurables pour les futurs réseaux de communication. En ajustant de manière appropriée les coefficients de réflexion et les coefficients de déphasage, elles peuvent améliorer la qualité de la liaison et améliorer considérablement la couverture. Par rapport aux techniques d'aide à la communication conventionnelles, telles que les relais, les IRSs consomment moins d'énergie en raison de la réflexion passive et peuvent fonctionner en mode FD (Full-duplex mode) sans auto-interférence (self-interference). Par conséquent, les IRS ont été proposés comme une solution rentable pour améliorer l'efficacité spectrale et énergétique des futurs réseaux de communication sans fil.

Dans ce travail, on a mené une comparaison équitable entre systèmes des communication assistées par des IRSs et leurs contrepart assistées par des relais DF, en terme d'efficacité énergétique.