

---

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 : Systèmes des Télécommunications

Spécialité : Télécommunications

Thème

Une étude sur les Surfaces Réfléchissantes  
Intelligentes (IRS)

**Présenté par :**

- DELLOUM Imadeddine

- YAHI Nadjat

**Sujet proposé et dirigé par :**

- Dr. BENMAHMOUD Slimane

**Devant le jury composé de :**

.....

Dr. BENMAHMOUD Slimane

.....

Président

Encadreur

Examineur

Projet N : .... / 2021

## Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à : mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde, à toi mon père

(Omar)

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon coeur, ma vie et mon bonheur, maman que j'adore

(Aicha)

à mes frère youcef et hamoudi et ma chère soeur abir aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnaient durant mon chemin d'études supérieures, mes aimables amis, collègues d'étude.

Je vous dis merci

Imadeddine

---

Je dédie ce modeste travail A celle qui est dans mon coeur, à celle qui a veillée pour notre confort et sacrifiée beaucoup pour notre réussite, Ma chère mère, (que dieu me la garde) A celui qui m'a toujours appris comment réfléchir avant d'agir, à celui qui m'a soutenu tout au long de ma vie scolaire, à celui qui n'a jamais épargné un effort pour mon bien,

Mon cher père (que dieu me le garde)

A mes chers frères : ahmed fouaz, fateh,abdallah et le petit elhadj.

A mon chère sœur fatima zahra.

A mes chères amies qui m'ont accompagné tout au long de ce parcours universitaire.

A mes collègues et amis de classe

A tous les membres de la promotion d'master en système de télécommunication de l'université de Mohamed Boudiaf de M'sila.

Je tiens à dédier ce modeste travail à toute personne ayant contribué à son aboutissement, Et à tous ceux qui me Connaissent...

Nadjat

## Remerciements

Avant de présenter ce travail, je tiens à remercier DIEU tout puissant, de m'avoir permis d'arriver à ce niveau, et aussi pour m'avoir donné beaucoup de patience et de courage sans oublier mes parents qui n'ont lésiné sur aucun problème pour m'apporter toute l'aide nécessaire pour atteindre ce niveau qui me permettra d'assurer mon avenir.

A travers ce modeste mémoire je tiens à présenter mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance à mon aimable encadreur **Dr. Benmahmoud Slimane**.

Je tiens à remercier tous les enseignants au département d'Electronique de l'université Mohamed Boudiaf à m'sila pour leur aides, soutiens et leurs conseils ainsi que tout le staff administratif du département.

*Imadeddine*

---

Tout d'abord, louange à « Allah » qui m'a guidé sur le droit chemin tout au long du travail et m'a inspiré les bons pas et les justes reflexes. Sans sa une étude sur les surfaces reflechissantes intelligentees (IRS ) , ce travail n'aura pas abouti.

A la fin de ce travail, nous tenons à remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

A ce titre, nous remercions vivement Notre encadreur **Dr. Benmahmoud Slimane** Pour ses conseils et son suivi durant la réalisation de notre projet.

Aussi, nous tenons à exprimer notre reconnaissance aux membres du jury.

Et enfin un remerciement à tous nos enseignants, pour leurs contributions concrètes à travers l'accès à l'information et surtout pour le savoir et les efforts qu'ils ont fourni durant notre cursus d'étude.

*Nadjat*

# Sommaire

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Introduction aux communications mobiles cellulaires</b>	<b>3</b>
1.1 Systèmes d'accès sans-fil mobiles et fixes . . . . .	4
1.1.1 Bref historique de l'accès mobile . . . . .	5
1.1.2 Bref historique de l'accès sans fil fixe . . . . .	7
1.2 Les technologies et les facteurs conducteurs de la 5G . . . . .	8
1.2.1 Les technologies 5G . . . . .	8
1.2.2 Les facteurs conducteurs . . . . .	9
<b>2 Les communications coopératives sans-fil</b>	<b>11</b>
2.1 Topologies des réseaux à relais . . . . .	12
2.1.1 Relais à double sauts avec une seule branche sans lien direct	12
2.1.2 Relais à double sauts à plusieurs branches sans lien direct .	13
2.1.3 Relais à double sauts à une seule branche avec un lien direct	14
2.1.4 Relais à double sauts à plusieurs branches avec lien direct .	15
2.2 Les protocoles de relayage . . . . .	15
2.2.1 Relayage decode-and-forward . . . . .	16
2.2.2 Relayage amplify-and-forward . . . . .	16
2.3 Le modèle du canal à relayage . . . . .	17
2.3.1 Source mobile, relais et destination fixes . . . . .	18
2.3.2 Source et destination mobiles, relais fixe . . . . .	18
2.3.3 Tous les nœuds sont mobiles (Source, destination et relais mobiles) . . . . .	19

---

2.4	Les stratégies de coopération . . . . .	19
2.4.1	La coopération basée sur la répétition . . . . .	19
2.4.2	La coopération basée sur le codage spatio-temporel distribué . . . . .	20
2.5	Conclusion . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Les communications assistées par des surfaces réfléchissantes intelligentes (IRS)</b>	<b>21</b>
3.1	Introduction aux communications assistées par des surfaces réfléchissantes intelligentes (IRS) . . . . .	22
3.2	IRS vs. relayage . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Simulations et Résultats</b>	<b>27</b>
4.1	Modèle du système . . . . .	28
4.1.1	Transmission assistée par une IRS . . . . .	28
4.1.2	Transmission assistée par un relais DF . . . . .	30
4.2	Résultats des simulations . . . . .	31
4.3	Conclusion . . . . .	32
	<b>Conclusion générale</b>	<b>35</b>

## Table des figures

1.1	Station de base qui sert à la fois les abonnés mobiles et fixes. . . . .	7
2.1	Relais à double saut à une branche sans lien direct pour l'extension de la couverture. . . . .	13
2.2	Relais à double saut multi-branches sans lien direct pour l'extension de la couverture et l'amélioration de la diversité. . . . .	14
2.3	Relais à double saut à une seule branche avec liaison directe. . . . .	15
2.4	Relais à double sauts à plusieurs branches avec lien direct. . . . .	16
3.1	Système de communication assisté par IRS. . . . .	22
3.2	Un système d'antennes multiples amélioré par IRS. . . . .	23
3.3	Détails d'une IRS. . . . .	24
4.1	Illustration des deux configurations considérées dans ce travail. . . . .	29
4.2	La configuration de simulation où $d_1$ est variable. . . . .	31
4.3	La puissance d'émission nécessaire pour atteindre le débit $\bar{R}$ dans le scénario représenté sur la Fig. 4.3, en fonction de la distance $d_1$ . . . . .	34

## Introduction générale

Au cours des dernières années, le trafic de données (mobile et fixe) a augmenté de façon exponentielle en raison de la croissance spectaculaire des smartphones, tablettes, ordinateurs portables et de nombreux autres appareils consommateurs de données sans fil. La demande de trafic de données sans fil sera encore plus à l'avenir. Il y aura une demande énorme pour le trafic de données mobiles et le nombre d'appareils connectés. Le trafic mondial de données mobiles est passé à 15,9 exaoctets par mois en 2018, soit une multiplication par 6 par rapport à 2014. En outre, le nombre d'appareils mobiles et de connexions devrait augmenter considérablement au cours des prochaines années. De nouvelles technologies sont nécessaires pour répondre à cette demande. Lié au trafic de données sans fil, le paramètre clé à considérer est le débit sans fil (the wireless throughput) (bits/s).

Dans la communication sans fil, les signaux transmis sont atténués par l'évanouissement dû à la propagation par trajets multiples et par l'ombrage dû aux grands obstacles entre l'émetteur et le récepteur, ce qui représente un défi fondamental pour une communication fiable.

Récemment, les surface intelligente re-configurable ou réfléchissantes (RIS) ont été considérées comme l'une des technologies révolutionnaires pour permettre des communications sans fil intelligentes et économes en énergie, qui est une structure bidimensionnelle avec un grand nombre d'éléments passifs. Dans ce mémoire on étudie ce type de technologie de communication.

Ce mémoire est organisé en cinq chapitres. On introduit dans **le premier chapitre** les systèmes de communication mobiles 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. Les topologies canoniques des réseaux de relais, les protocoles des relais et les stratégies de coopération sont introduits. Le contexte de ce chapitre est utile pour mieux comprendre les principales contributions des chapitres suivants.

Dans **le troisième chapitre**, on révèle en détails les secrets des systèmes de communications assistés par des IRS.

Dans **le dernier chapitre**, on étudie la performance d'un systèmes de transmission assisté par une IRS où nous essayons de faire une comparaison équitable entre la transmission soutenue par IRS et le relais DF, dans le but de déterminer la taille d'un IRS nécessaire pour surpasser le relais conventionnel. Pour cela, nous calculons les puissances d'émission optimales et le nombre optimal d'éléments dans un IRS.

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

*1*

**Introduction aux communications mobiles  
cellulaires**

## 1.1 Systèmes d'accès sans-fil mobiles et fixes

Les communications sans fil dans le monde d'aujourd'hui sont diverses et omniprésentes. Cependant, sa variante la plus importante et la plus visible est les réseaux mobiles cellulaires. À l'origine, ces réseaux ne permettaient la communication vocale que sur des réseaux analogiques. Cependant, comme indiqué ci-dessous, ils ont évolué au fil du temps pour devenir tous les réseaux numériques fournissant de plus en plus de capacité de données, au point que les derniers réseaux de ce type ne communiquent que des données à commutation de paquets. Désormais, la voix, la vidéo et d'autres applications sont toutes converties en données et intégrées dans un flux de données à commutation de paquets commun. Dans de tels réseaux mobiles, la zone de couverture se compose de plusieurs cellules adjacentes, chaque cellule contenant une station de base fixe (*base station*, BS). La transmission vers et depuis une unité mobile individuelle (*mobile unit*, MU) se fait normalement entre cette unité et la station de base qui fournit la meilleure communication. Une telle communication est communément appelée accès mobile. La communication réelle entre une BS et une MU a lieu sur ce qui est défini comme la couche physique. Cette couche est chargée de communiquer les données à un niveau de fiabilité acceptable et, si nécessaire, au débit le plus élevé possible pour les ressources de fréquence données.

Bien que les réseaux d'accès mobile soient conçus pour communiquer avec des unités mobiles, rien ne les empêche de communiquer avec des unités fixes situées dans des maisons ou des petites et moyennes entreprises. En fait, les communications de cette forme sont généralement de meilleure qualité que celles avec les unités mobiles en raison de l'utilisation d'antennes à gain plus élevé, d'une puissance de sortie éventuellement plus élevée et de l'élimination des évanouissements induits par les mobiles. Une telle communication est communément appelée accès sans fil fixe (*fixed wireless access*, FWA).

Bien que ce texte présente, à un niveau élevé, l'une des principales techniques prometteuses des systèmes mobiles de cinquième génération (5G), il ne s'efforce pas de fournir une introduction aux systèmes de communication mobiles cellulaires.

### 1.1.1 Bref historique de l'accès mobile

Les premiers systèmes de téléphonie cellulaire commerciaux ont été introduits au début des années 1980, utilisaient une technologie analogique et sont maintenant appelés *systèmes de première génération (1G)*. Ils ont été conçus principalement pour la fourniture de services vocaux.

Les *systèmes de deuxième génération (2G)* sont apparus au début des années 1990. Bien que, comme les systèmes 1G, ils étaient principalement destinés aux services vocaux, ils utilisaient la modulation numérique, permettant une capacité vocale plus élevée et la prise en charge des applications de données à bas débit. Des exemples de systèmes 2G comprennent le système Global System for Mobile Communications (GSM) conçu en Europe, les systèmes IS-136 TDMA et IS-95 CDMA de conception américaine et le système PDC de conception japonaise. À titre d'exemple de capacités de données, la norme GSM d'origine prenait en charge les données commutées à 9.6 kb/s. À la fin des années 1990, cependant, avec l'introduction du débit de données amélioré pour l'évolution du GSM (EDGE), des débits d'utilisation compris entre 80 et 120 kb/s étaient pris en charge.

Le processus de définition générale des normes 3G pour une application mondiale a été lancé par l'Union internationale des télécommunications (UIT), qui a fait référence à des systèmes tels que les systèmes de télécommunications mobiles internationales 2000 (IMT-2000). Les systèmes 3G sont devenus disponibles au début des années 2000 et ont représenté un bond important par rapport aux systèmes 2G. Ces systèmes ont été conçus pour fournir une large gamme de services, y compris la téléphonie, des données plus rapides que celles disponibles avec la 2G, la vidéo, la radiomessagerie et la messagerie.

L'Institut européen de normalisation des télécommunications (ETSI) était initialement responsable de la normalisation d'un système conforme aux IMT-2000 qui devait s'appeler Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) et être une évolution du GSM. Cependant, en 1998, le projet de partenariat de troisième génération (3GPP) a été créé avec le mandat de poursuivre ce travail de normalisation sous les auspices non seulement de l'ETSI mais également sous ceux d'autres organisations régionales de développement de la normalisation, faisant ainsi du projet un effort plus global.

À peu près au moment de la création du 3GPP, une organisation similaire appelée 3GPP2 était en cours de création sous les auspices d'associations de télécommunications nord-américaines, japonaises et chinoises. Comme le 3GPP, son objectif était de standardiser sur un système compatible IMT-2000.

Tous les systèmes 3G normalisés par 3GPP et 3GPP2 utilisaient la technologie CDMA (Code Division Multiple Access), augmentaient considérablement la capacité vocale et offraient des débits de données beaucoup plus élevés sur les supports à commutation de circuits et à commutation de paquets.

L'UIT a commencé ses travaux sur les systèmes 4G en 2005 et a qualifié ces systèmes d'IMT-Advanced. De tels systèmes ont été définis comme étant ceux capables de fournir un débit de données DL maximal de 1 Gb / s dans des conditions de faible mobilité et de 100 Mb / s dans des conditions de mobilité élevée. Le candidat du 3GPP pour IMT-Advanced était LTE-Advanced. Le candidat IEEE était le 802.16 m appelé WirelessMAN-Advanced. Ces deux candidats étaient basés sur la technologie OFDM. En octobre 2010, l'UIT a annoncé que LTE-Advanced et Wireless MAN-Advanced avaient reçu la désignation officielle d'IMT-Advanced, les qualifiant de véritables technologies 4G.

En 2015, l'UIT a défini les systèmes de cinquième génération (5G) comme ceux qui satisfont à ses exigences IMT-2020. IMT-2020 envisage la prise en charge de nombreux scénarios d'utilisation, dont trois ont été identifiés : le haut débit mobile amélioré (eMBB), les communications ultra-fiables et à faible latence (URLLC) et les communications massives de type machine (mMTC).

Parmi les nombreuses exigences envisagées par les IMT-2020 figurent (a) la capacité de fournir un débit de données DL maximal de 20 Gb/s et un débit de données UL maximal de 10 Gb/s, (b) des débits de données DL expérimentés par l'utilisateur allant jusqu'à 100 Débits de données Mb/s et UL jusqu'à 50 Mb/s, (c) latence aérienne de 1 ms, et (d) fonctionnement pendant la mobilité jusqu'à 500 km/s.

### 1.1.2 Bref historique de l'accès sans fil fixe

L'accès sans fil fixe implique une connexion sans fil bidirectionnelle à débit de données relativement élevé (des dizaines de Mb/s à 1+ Gb/s) entre un emplacement d'utilisateur fixe et une station d'émetteur-récepteur qui est connectée à un réseau central de traitement de données par paquets.

Ainsi, une liaison sans fil unique connectant un emplacement d'utilisateur fixe au réseau central via un émetteur-récepteur unidirectionnel est techniquement qualifiée de système FWA. En fait, dans les années 1990, de tels liens ont commencé à être installés. D'un point de vue économique, cependant, ces systèmes sont rarement rentables et leur déploiement est donc limité. Si, d'un autre côté, une station de base est utilisée pour fournir une connexion à plusieurs emplacements d'utilisateurs fixes, l'économie devient beaucoup plus intéressante car le coût de la station de base est partagé par tous les utilisateurs. En conséquence, dans un sens pratique, FWA implique aujourd'hui un accès via un système sans fil point à multipoint. La figure 1.1 représente une structure point à multi-point (PMP) où une station de base est représentée desservant à la fois des utilisateurs mobiles et fixes.

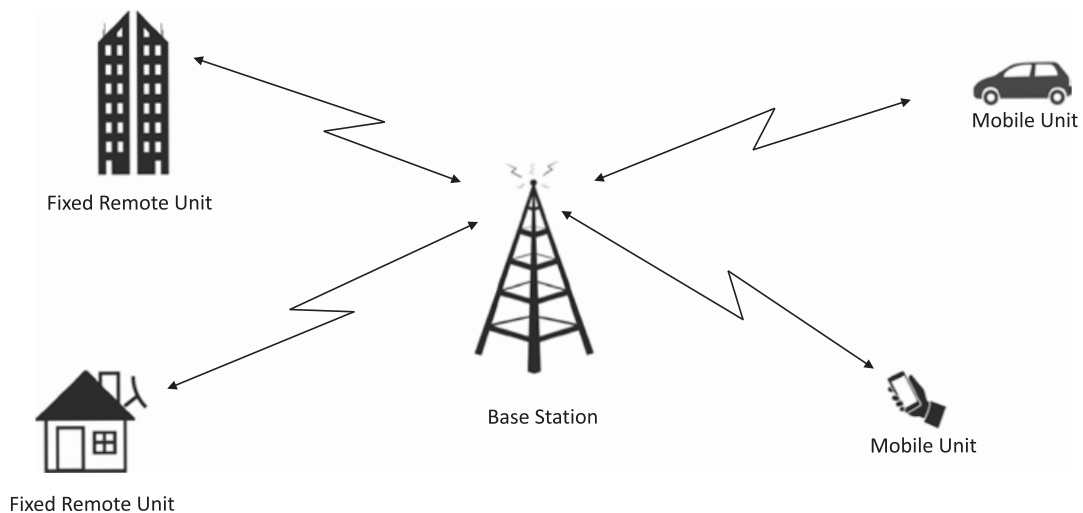


FIGURE 1.1 – Station de base qui sert à la fois les abonnés mobiles et fixes.

Au milieu des années 2010, de grandes entreprises telles qu'Ericsson et Nokia ont commencé à proposer des systèmes FWA basés sur la 4G superposés aux systèmes mobiles. Le changement de jeu attendu est la 5G, qui devrait fournir des débits de données compétitifs sur le câble. En fait, l'une des premières applications de la technologie 5G était FWA, le déploiement de ces systèmes ayant commencé en 2019.

## 1.2 Les technologies et les facteurs conducteurs de la 5G

Les éléments de base de la 5G comprennent les éléments suivants :

- Fonction de gestion des accès et de la mobilité (AMF) : assure le chiffrement et la protection de l'intégrité, la gestion de la mobilité, l'authentification et l'autorisation, etc.
- Fonction de gestion de session (SMF) : effectue l'attribution et la gestion d'adresses IP UE, la sélection et le contrôle de l'UPF, l'itinérance, etc.
- Gestion unifiée des données (UDM) : effectue la gestion des abonnements, des données utilisateur, des inscriptions et de la gestion de la mobilité, etc.
- Fonction de contrôle de politique (PCF) : exécute des règles de politique pour les fonctions du CP, etc.
- Fonction de plan utilisateur (UPF) : effectue le point d'interconnexion externe au réseau de données, la gestion de la qualité de service de UP, etc.
- Fonction d'application (AF) : interagit avec le cadre politique pour le contrôle politique, etc.

### 1.2.1 Les technologies 5G

Devant être commercialisés vers 2021, les réseaux mobiles 5G font l'objet d'intenses activités de portée et de développement. Par rapport aux réseaux mobiles 4G actuels, les réseaux 5G devraient prendre en charge une énorme capacité système, beaucoup moins de latence et environ 1000 fois plus d'appareils par kilo-

mètre carré, entre autres exigences. Pour répondre à ces exigences, plusieurs nouvelles technologies ont été proposées et sont en cours de développement pour les réseaux 5G. Ces technologies incluent, mais sans s'y limiter : MIMO massif, mise en réseau définie par logiciel (software-defined networking), mm-Wave, réseau d'accès radio cloud (cloud-RAN), accès multiple non orthogonal, communications M2M, informatique de périphérie mobile (mobile edge computing), mise en cache sans fil, réseaux ultra-denses et communication full-duplex. Dans ce qui suit, nous décrivons brièvement certaines de ces technologies.

### 1.2.2 Les facteurs conducteurs

Les systèmes cellulaires 5G doivent faire un bond significatif en termes de fonctionnalités et de performances par rapport à LTE, car des améliorations incrémentielles ne sont pas souhaitées et ne justifient pas les investissements en capital importants dont les opérateurs doivent s'engager pour déployer les services 5G. Il est important de noter que nous avons maintenu une seule norme cellulaire mondiale. Les facteurs moteurs de la 5G sont [1] :

- Augmentation du débit de données utilisateur
- Augmentation de la capacité du système
- Nombre massif de connexions
- Réduction de la latence de bout en bout
- Mélange hétérogène de services
- Déploiements flexibles de la bande passante
- Flexibilité du réseau
- Passer à des communications plus écoénergétiques.

L'UIT a publié un diagramme pour identifier les services 5G. Les trois cas d'utilisation significatifs (coins du triangle) sont destinés à encapsuler les usages attendus de la 5G à l'avenir :

- Haut débit mobile amélioré (eMBB)
- Communication massive de machine à machine (mMTC)
- Communications ultra-fiables à faible latence (URLLC).

Ces cas d'utilisation de la 5G vont de la maison intelligente, des drones connectés, de la cybersanté, de l'énergie connectée, des voitures autonomes, des jeux de réalité virtuelle/réalité augmentée en temps réel, etc. dans la préparation des services 5G très variés [1].

Le système cellulaire 5G devrait prendre en charge ces scénarios d'utilisation en utilisant les technologies suivantes :

- **Déploiements de spectre flexibles** : spectre sous licence, sans licence et partagé, bande passante plus grande et contiguë, multi-RAT, etc.
- **Architecture réseau améliorée** : prise en charge de la tendance cloud de l'industrie des TIC, SDN / NFV, découpage de réseau, informatique de périphérie multi-accès, latence plus faible, etc.
- **Numérologie flexible** : prend en charge une grande variété de cas d'utilisation et de déploiements spectraux (bandes inférieures et supérieures à 6 GHz), intervalles de temps flexibles et bandes passantes de transmission, etc.
- **Modulation et codage** : la modulation QAM continue de fournir un compromis raisonnable entre le spectre et l'efficacité énergétique, les codes de correction d'erreurs polaires et autres.
- **Techniques avancées** : NOMA, full-duplex, mise en forme spectrale, etc.

## Les communications coopératives sans-fil

Dans ce chapitre, les communications coopératives ou à relais sont présentées comme un moyen de surmonter les limitations du déploiement de plusieurs antennes sur un même terminal de communication. Les topologies canoniques des réseaux de relais, les protocoles des relais et les stratégies de coopération sont introduits.

## 2.1 Topologies des réseaux à relais

Dans un réseau de communication, tous les utilisateurs d'un réseau peuvent recevoir des signaux d'autres utilisateurs, en raison de la propagation non directionnelle des ondes électromagnétiques. Dans les communications coopératives, les utilisateurs agissent en tant que relais qui reçoivent et traitent les signaux de la source et transmettent les résultats à la destination. Différentes topologies peuvent être construites, selon la disponibilité du canal direct de la source à la destination ou le nombre de relais dans le réseau. De plus, les réseaux de relais peuvent être distingués par le protocole utilisé par les relais pour traiter les signaux reçus de source ou par la stratégie de coopération. Les principales topologies, protocoles et stratégies qui se présentent dans la littérature sont présentés ci-après [2].

### 2.1.1 Relais à double sauts avec une seule branche sans lien direct

Selon les conditions de propagation, le lien direct entre la source et la destination peut ne pas être suffisamment fort pour faciliter la transmission des données. Par exemple, un utilisateur mobile au bord de la cellule d'un réseau cellulaire recevrait un signal faible de la station de base et serait soumis à une couverture limitée. Dans cette situation, un utilisateur voisin peut agir en tant que relais pour relier la source à la destination, en créant une topologie de relais canonique, à savoir un relais à deux sauts avec une seule branche sans lien direct. La figure 2.1 illustre un système de relais à double saut dans un réseau cellulaire. Comme on peut le constater, un utilisateur mobile (Source) communique avec la station de base (Destination) via un autre utilisateur mobile (Relais). Le relais à double saut a été étudié dans la littérature comme solution permettant de résoudre le problème de couverture limitée de nombreuses applications sans fil telles que les réseaux cellulaires, les réseaux WLAN, les réseaux de capteurs sans fil, etc. [2]. En particulier, le relais à double saut a été développé en technologie WLAN IEEE 802.11 et WiMAX IEEE 802.16j et a été normalisé en 3GPP LTE [2]. En plus de sa propre importance, les relais à double saut constitue l'épine dorsale d'autres topologies multibranches.

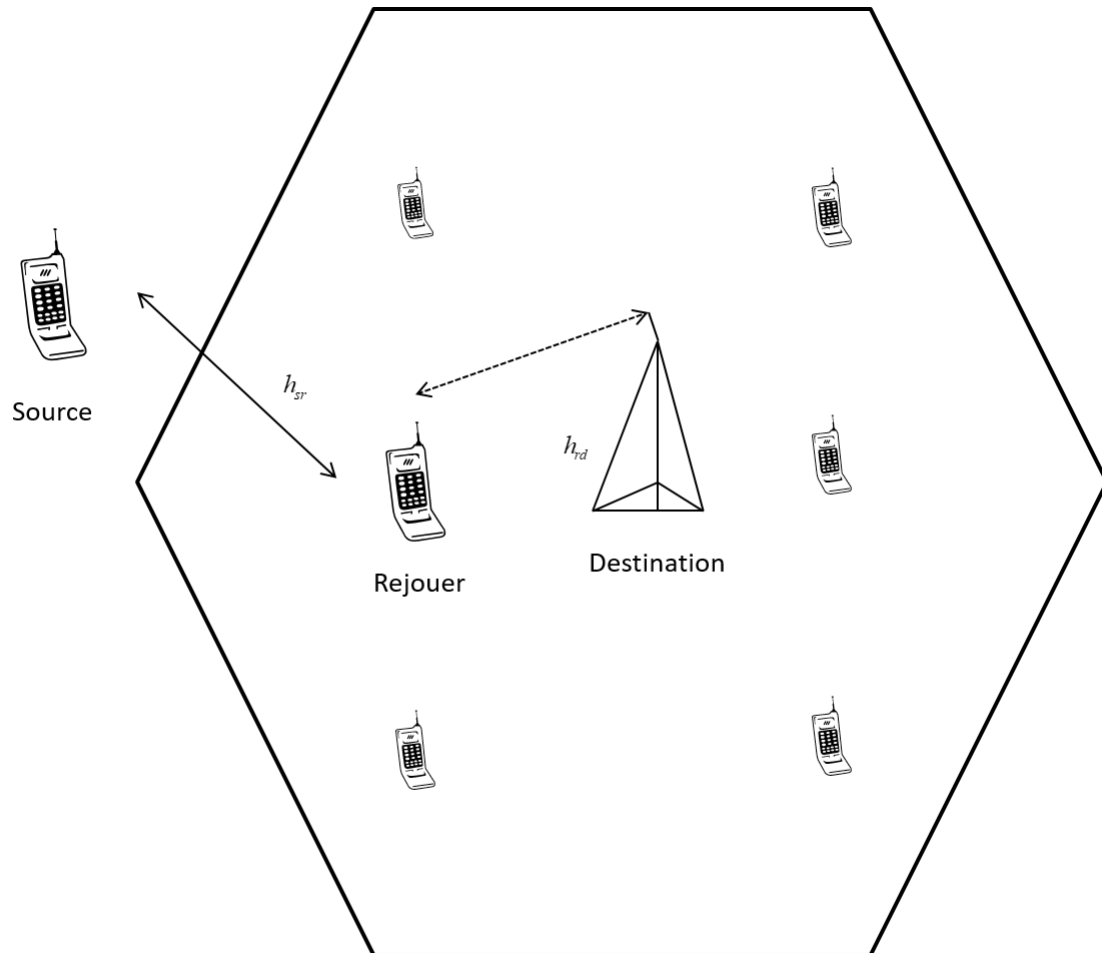


FIGURE 2.1 – Relais à double saut à une branche sans lien direct pour l’extension de la couverture.

### 2.1.2 Relais à double sauts à plusieurs branches sans lien direct

Le relais double saut à une seule branche peut être étendu au relais double saut à plusieurs branches s’il y a plus de relais disposés à coopérer. Ceci est décrit à la **figure 3.2**. Dans cette topologie, l’utilisateur qui rencontre une couverture limitée peut bénéficier à la fois d’une extension de couverture et d’une amélioration de la diversité avec l’aide d’autres utilisateurs.

La diversité maximale réalisable dans cette topologie est égale à  $R$ , le nombre de relais [2], [3].

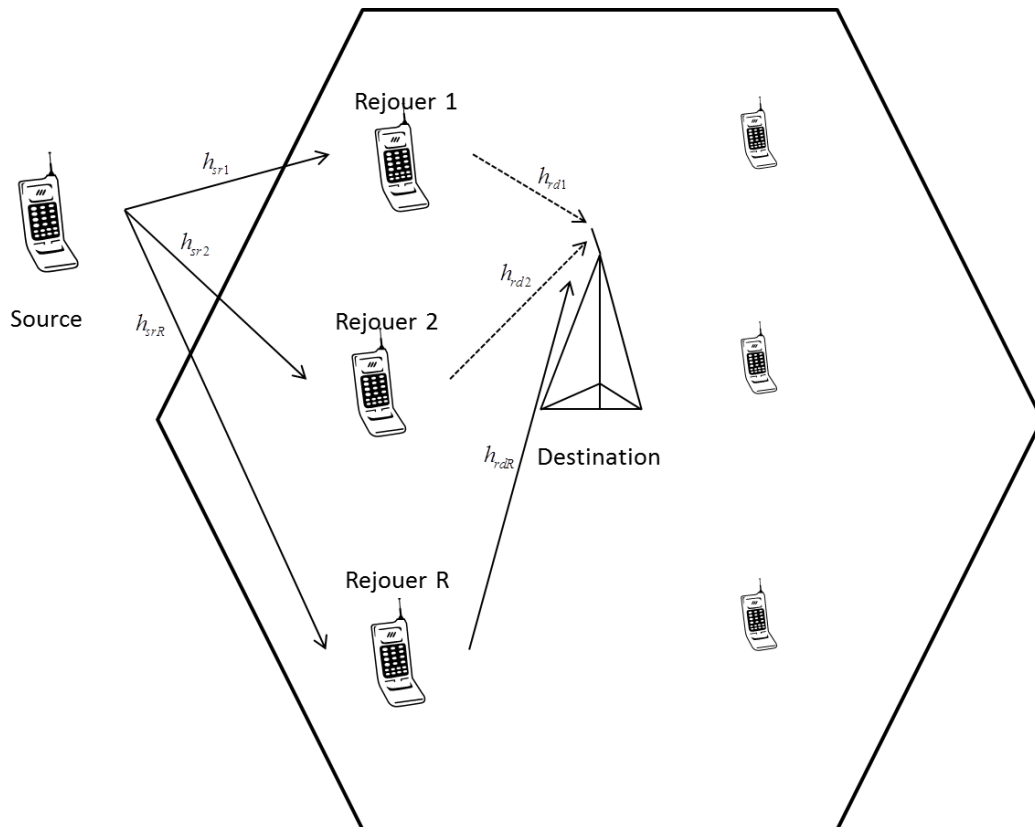


FIGURE 2.2 – Relais à double saut multi-branches sans lien direct pour l’extension de la couverture et l’amélioration de la diversité .

### 2.1.3 Relais à double sauts à une seule branche avec un lien direct

Si le signal reçu du lien direct est suffisamment fort, il peut être utilisé pour améliorer le gain de diversité du réseau. La figure 3.3 illustre un réseau de relais à double sauts à une seule branche avec un lien direct [2], [3].

La diversité spatiale maximale réalisable pour ce réseau est de deux. Cette architecture a été examinée dans plusieurs études en tant que l’une des topologies de relais les plus importantes.

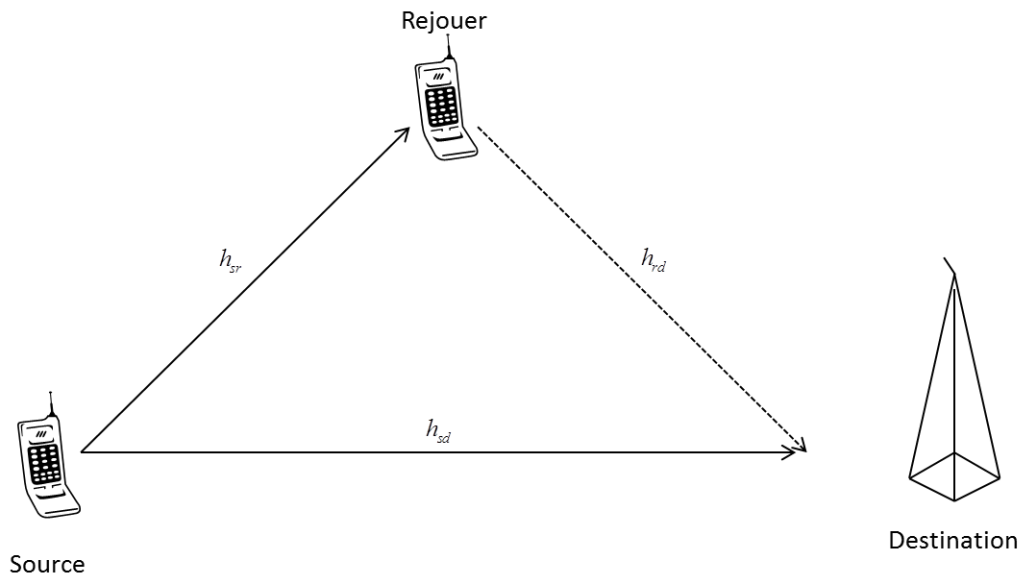


FIGURE 2.3 – Relais à double saut à une seule branche avec liaison directe .

### 2.1.4 Relais à double sauts à plusieurs branches avec lien direct

Le relais à une seule branche avec lien direct peut être étendu au relais à plusieurs branches avec lien direct s'il y a plus de relais dans le réseau disposés à vous aider. De cette façon, des branches supplémentaires à double saut peuvent être construites pour obtenir une plus grande diversité coopérative, comme illustré à la figure 2.4 [2], [3].

La diversité spatiale maximale réalisable des réseaux de relais multi-branches avec lien direct est  $R + 1$ ,  $R$  étant le nombre de relais.

## 2.2 Les protocoles de relayage

Les signaux reçus de la source sont traités par les relais avant leur transmission à la destination. Selon le type de traitement, les relais sont classés en des relais de décodage et de retransmission (decode-and-Forward, DF) ou des relais d'amplification et de retransmission (amplify-and-forward, AF).

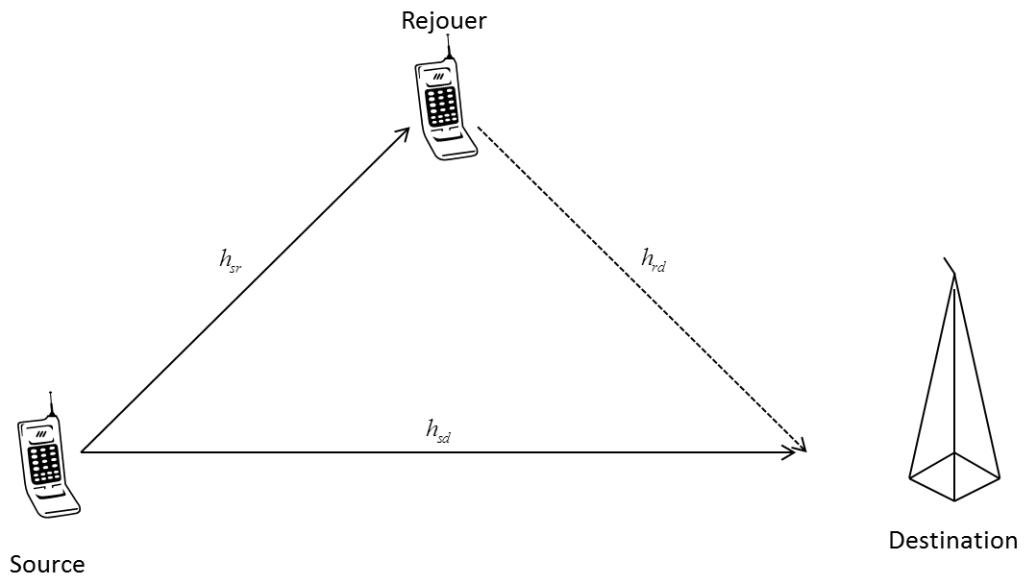


FIGURE 2.4 – Relais à double sauts à plusieurs branches avec lien direct .

### 2.2.1 Relayage decode-and-forward

Dans le relayage DF, les relais décodent le signal reçu de la source, le re-encodent, puis retransmettent le résultat à la destination. Le processus de décodage et de réencodage au niveau des relais introduit une charge de calcul supplémentaire au niveau des relais. De plus, le processus de décodage ne peut pas être exempt d'erreur ce qui pose un problème de propagation d'erreur [2].

### 2.2.2 Relayage amplify-and-forward

Dans le relayage AF, le processus de décodage est évité et le signal reçu est simplement multiplié par un facteur de multiplication avant d'être retransmis à la destination. Le principal inconvénient du relayage AF est que le bruit au niveau du relais est également amplifié avec le signal. Il convient également de mentionner que le terme « amplifier » ne signifie pas nécessairement que l'amplitude du signal sera renforcée par le facteur d'amplification, mais il pourrait s'agir de l'une ou l'autre des manières [2].

## 2.3 Le modèle du canal à relayage

En utilisant le relais AF, un canal en cascade est construit entre une source et une destination. Ce canal en cascade a des propriétés différentes de celles d'un canal direct. Supposons que le symbole soit transmis de la source au relais (Figure 3.1). Le signal reçu au niveau du relais est [4]

$$x = \sqrt{P_0}h_{sr}v + w_1, \quad w_1 \sim \mathcal{CN}(0, N_0) \quad (2.1)$$

où  $P_0$  est la puissance moyenne transmise par symbole à la source. Le signal reçu au relais est multiplié par le facteur d'amplification  $A$  et retransmis à la destination. Le signal reçu à la destination est

$$y = Ah_{rd}x + w_2, \quad w_2 \sim \mathcal{CN}(0, N_0) \quad (2.2)$$

La substitution de (2.1) dans (2.2) donne

$$y = A\sqrt{P_0}hv + w \quad (2.3)$$

où sont  $h = h_{sr}h_{rd}$  et  $w = Ah_{rd}w_1 + w_2$  le canal équivalent et le bruit, respectivement. Comme on peut le constater, du point de vue de la destination, le symbole transmis  $v$  est déformé par  $h$ , le produit de deux canaux. Ce canal serait interchangeable appelé le canal cascadié, le canal équivalent ou le canal double de Rayleigh.

Avec la supposition que les canaux individuels subissent un évanouissement de Rayleigh, c'est-à-dire  $h_{sr} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{sr}^2)$ ,  $h_{rd} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{rd}^2)$ , les parties réelle et imaginaire de

$$h = X + jY$$

sont des variables aléatoires laplaciennes distribuées de manière identique avec des pdfs [5]

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma_{sr}\sigma_{rd}} \exp\left(\frac{-2|x|}{\sigma_{sr}\sigma_{rd}}\right) \quad (2.4)$$

$$f_Y(y) = \frac{1}{\sigma_{sr}\sigma_{rd}} \exp\left(\frac{-2|y|}{\sigma_{sr}\sigma_{rd}}\right) \quad (2.5)$$

En outre, la pdf de l'enveloppe  $\eta = |h[k]|$  est

$$f_\eta(\eta) = \frac{4\eta}{\sigma_{sr}^2\sigma_{rd}^2} K_0\left(\frac{2\eta}{\sigma_{sr}\sigma_{rd}}\right) \quad (2.6)$$

où  $K_0(\cdot)$  est la fonction de Bessel modifiée d'ordre zéro du deuxième type [5], [6]. De plus, le modèle en série chronologique du canal en cascade est important pour l'étude des performances des réseaux de relais dans des canaux variant dans le temps. Pour dériver ce modèle, en fonction de la mobilité des nœuds les uns par rapport aux autres, les trois cas suivants sont considérés. Par souci de simplicité, mettons  $\sigma_{sr}^2 = \sigma_{rd}^2 = 1$  dans les trois cas.

### 2.3.1 Source mobile, relais et destination fixes

Lorsque Source est en mouvement mais que Relais et Destination sont fixes, le canal SR devient un canal variant dans le temps et leurs propriétés statistiques suivent les canaux de diffusion isotropes bidimensionnels fixes vers mobiles [7]. Cependant, le canal RD reste statique. Le canal SR peut être décrit par un modèle AR (1) comme suit [8]

$$h_{sr}[k] = \alpha_{sr}h_{sr}[k-1] + \sqrt{1 - \alpha_{sr}^2}e_{sr}[k] \quad (2.7)$$

où  $\alpha_{sr} = J_0(2\pi f_{sr}n) \leq 1$  est l'auto-corrélation du canal SR,  $f_{sr}$  est la fréquence Doppler normalisée du canal SR et  $e_{sr}[k] \sim \mathcal{CN}(0, 1)$  est indépendant de  $h_{sr}[k-1]$ .

En outre, dans le scénario relais fixe et destination, deux utilisations consécutives du canal RD sont approximativement égales, à savoir

$$h_{rd}[k] \approx h_{rd}[k-1] \quad (2.8)$$

Ainsi, pour le canal en cascade, multiplier (2.7) par (2.8) donne

$$h[k] = \alpha_{sr}h[k-1] + \sqrt{1 - \alpha_{sr}^2}h_{rd}[k-1]e_{sr}[k] \quad (2.9)$$

qui est un modèle AR (1) avec le paramètre  $\alpha_{sr}$  et  $h_{rd}[k-1]e_{sr}[k]$  comme bruit blanc d'entrée [8].

### 2.3.2 Source et destination mobiles, relais fixe

Lorsque les sources et les destinations se déplacent, mais que le relais est fixe, les canaux SR et RD varient en fonction du temps et suivent à nouveau le modèle de diffusion fixe à mobile [7]. Par conséquent, le modèle AR (1) de (3.7) est utilisé pour modéliser le canal SR.

De même, pour le canal RD, le modèle AR (1) est [8], [9]

$$h_{\text{rd}}[k] = \alpha_{\text{rd}} h_{\text{rd}}[k-1] + \sqrt{1 - \alpha_{\text{rd}}^2} e_{\text{rd}}[k] \quad (2.10)$$

où  $\alpha_{\text{rd}} = J_0(2\pi f_{\text{rd}} n) \leq 1$  est l'auto-corrélation du canal RD,  $f_{\text{rd}}$  est la fréquence Doppler normalisée du canal RD et  $e_{\text{rd}}[k] \sim \mathcal{CN}(0, 1)$  est indépendant de  $h_{\text{rd}}[k-1]$ .

### 2.3.3 Tous les nœuds sont mobiles (Source, destination et relais mobiles)

Dans ce cas, tous les liens suivent le modèle de canal mobile à mobile [10]. Cependant, ils sont toutes atténués par un évanouissement de Rayleigh et la seule différence est que l'auto-corrélation du canal doit être remplacée conformément à ce modèle.

## 2.4 Les stratégies de coopération

Le processus de transmission dans les réseaux coopératifs est généralement divisé en deux phases. Dans la première phase, les relais sont silencieux et écoutent le signal transmis par la source. Dans la seconde phase, les relais coopèrent pour délivrer les signaux reçus à la destination. Il existe deux stratégies de coopération principales : le codage basé sur la répétition et le codage distribué spatio-temporel [11].

### 2.4.1 La coopération basée sur la répétition

La stratégie basée sur la répétition est en réalité une combinaison de diversité de réception et de diversité de transmission en utilisant le code de répétition. Tous les relais reçoivent différentes copies du même signal de la source en phase I, ce qui est similaire à la diversité du récepteur dans les communications point à point. Durant la phase II, les relais amplifient et rediffusent les symboles reçus vers la destination de manière séquentielle dans le temps. Ceci est similaire à la diversité de transmission en utilisant un codage de répétition. La stratégie basée

sur la répétition est simple à mettre en œuvre. Il ne nécessite pas d'encodage et de décodage compliqués à la source ou à la destination. De plus, pendant la transmission de chaque relais, les autres relais restent silencieux et ne doivent donc pas être synchronisés au niveau des symboles. Cependant, la stratégie basée sur la répétition a une efficacité spectrale faible. Dans la stratégie basée sur la répétition, les signaux reçus de plusieurs liaisons au niveau de la destination doivent être combinés à l'aide d'une technique de combinaison pour obtenir une diversité coopérative [12].

### **2.4.2 La coopération basée sur le codage spatio-temporel distribué**

La stratégie basée sur la répétition souffre d'un faible débit de données. Une solution logique serait de déployer le codage spatio-temporel de manière distribuée à l'aide de relais. Dans le codage spatio-temporel distribué (distributed space-time coding, DSTC), différents relais reçoivent différentes copies des mêmes symboles d'information lors de la phase I. Les relais traitent ces signaux reçus et les transmettent simultanément à la destination lors de la deuxième phase. Le traitement distribué à différents nœuds de relais forme un réseau d'antennes virtuelles (virtual antenna array, VAA). Par conséquent, des schémas de codage en blocs spatio-temporels classiques peuvent être appliqués aux réseaux des relais pour obtenir une diversité coopérative et un gain de codage [2], [12].

## **2.5 Conclusion**

Ce chapitre présente les principales topologies de relayage, telles que le relayage à double saut avec une seule branche et celui à double branche avec et sans lien direct. Des protocoles de relayage et des stratégies de coopération ont également été décrits. En plus, un modèle de série chronologique a été présenté pour le canal en cascade. Le contexte de ce chapitre sera nécessaire pour une meilleure compréhension du système de transmission examiné dans les chapitres suivants.

## Les communications assistées par des surfaces réfléchissantes intelligentes (IRS)

Dans ce chapitre, on révèle en détails les secrets des systèmes de communications assistés par des IRS. Le contexte de ce chapitre est utile pour mieux comprendre les principaux résultats du chapitre suivant.

### 3.1 Introduction aux communications assistées par des surfaces réfléchissantes intelligentes (IRS)

Dans la Fig.3.1 [13], un système de communication assistée par une IRS est présenté. En général, le système se compose d'un panneau d'antenne et d'un contrôleur IRS qui doit manipuler les déphasages du signal. Il peut être vérifié qu'il s'agit d'un système facile à installer qui peut être intégré dans un mur intérieur ou sur toute autre surface de bâtiment [14]. Comme nous le savons tous, dans

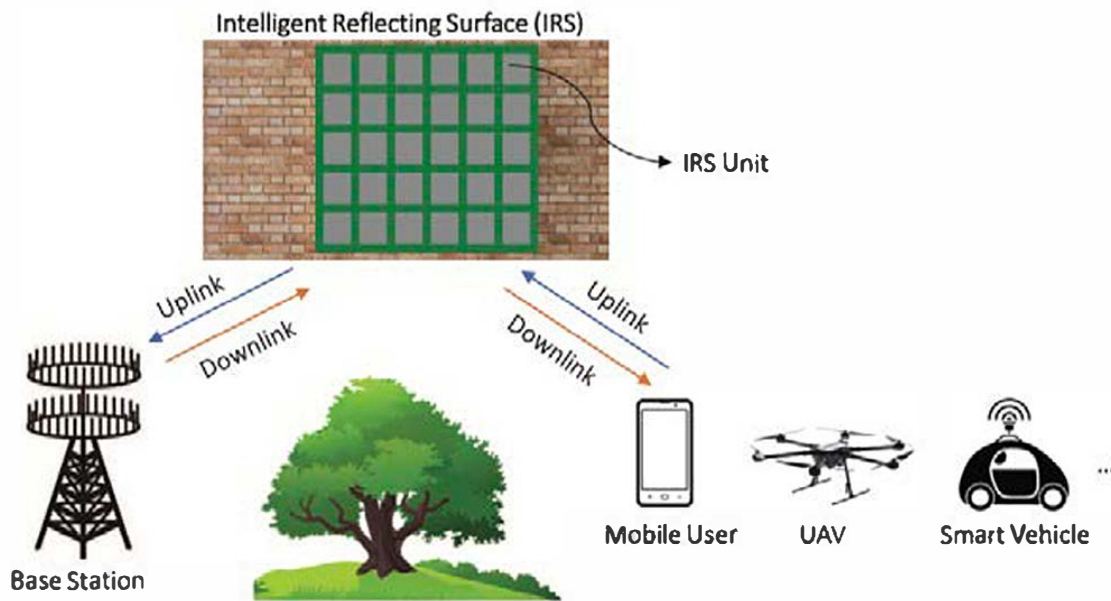


FIGURE 3.1 – Système de communication assisté par IRS.

la réalité, le signal 5G serait facilement bloqué par les murs, les bâtiments et les arbres ou d'autres obstacles. Ces dernières années, de plus en plus de chercheurs ont commencé à étudier la surface réfléchissante intelligente (IRS) qui fournit une méthode peu coûteuse pour s'attaquer aux problèmes auxquels les systèmes de télécommunication modernes sont confrontés.

Le concept de base de l'IRS est de refléter le signal radio émis par la station de base (BS) en utilisant un réseau d'antennes passives. Il peut être considéré comme un système MISO, qui reçoit plusieurs entrées de l'émetteur et utilise ensuite la formation de faisceaux (Beamforming) pour réfléchir le signal souhaité et la re-formation de faisceaux vers le récepteur correspondant. Un système IRS typique est illustré sur la Fig.3.2 [15], il contient les émetteurs, les récepteurs, le panneau IRS et le contrôleur IRS [16].

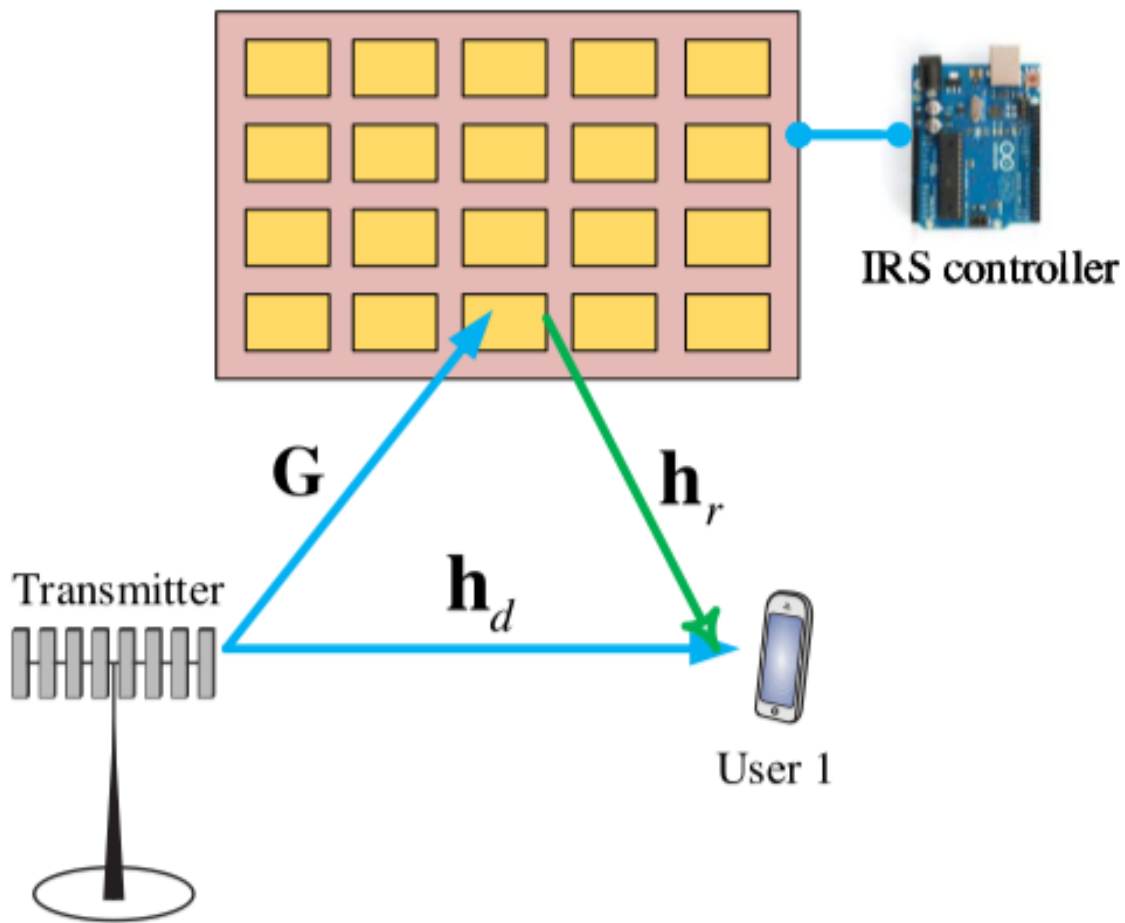


FIGURE 3.2 – Un système d'antennes multiples amélioré par IRS.

Comme le montre la Fig.3.3 [16], le panneau IRS est constitué de plusieurs méta-atomes qui peuvent réfléchir passivement les signaux radio aux utilisateurs souhaités [16], [15]. Chaque méta-atome est une antenne à faible coût qui peut jouer le rôle de réflecteur et connectée à un contrôleur IRS. Dans certains cas, les méta-atomes joueraient également le rôle de collecteurs d'énergie dans certains systèmes basés sur SWIPT (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer).

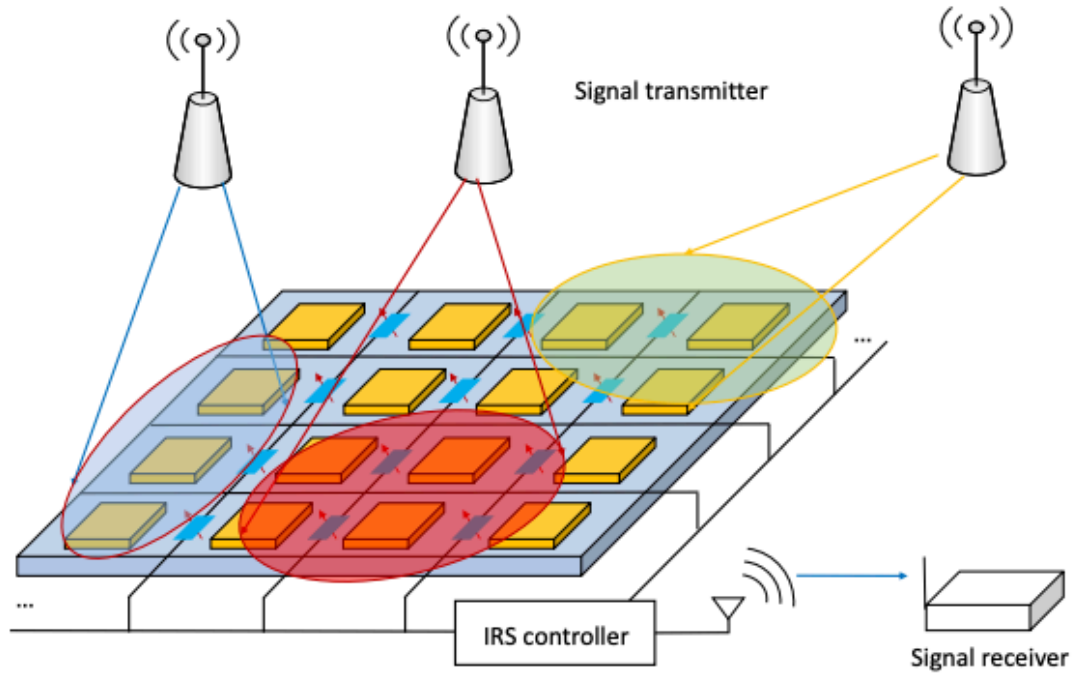


FIGURE 3.3 – Détails d'une IRS.

Plus que la propriété à faible coût de la technologie IRS, il existe de nombreux autres avantages [17],[18]. Tout d'abord, le panneau IRS est facile à installer et économe en énergie, ce qui permet d'être installé à l'intérieur et d'améliorer la couverture du signal. De plus, il est capable d'augmenter la qualité de service des utilisateurs au bord des cellules. Étant donné que l'IRS réfléchit passivement le signal, aucun autre bruit ne serait ajouté à la procédure. Et cela peut réduire relativement les interférences des cellules voisines qui affectent les utilisateurs. Troisièmement, le système peut également être utilisé pour augmenter la sécurité de la couche physique [18] [19]. En prenant en compte le bruit artificiel et l'algorithme de formation de faisceaux, la sécurité est en mesure d'obtenir une amélioration substantielle. Les résultats de la simulation dans [20], [18] et [21] présentent la conclusion qu'avec l'aide du bruit artificiel et de l'algorithme d'optimisation approprié, la puissance des signaux reçus du côté de l'espionnage peut considérablement diminuer et les performances globales du système pourraient être amélioré dans une certaine mesure.

On peut facilement conclure que l'IRS serait une technologie prévisible qui joue un rôle essentiel dans les progrès de la commercialisation de la 5G. l'IRS a beaucoup de potentiel à l'avenir et d'autres recherches devraient être proposées pour améliorer cette technologie.

De plus, de nombreux travaux inspirés sont proposés par des chercheurs précédents. Dans [22], les chercheurs ont étudié le système mono-utilisateur avec IRS et ont obtenu la solution optimale pour le taux maximum réalisable. Ensuite, un système sécurisé qui introduit le bruit artificiel a été discuté dans [20] où la solution au problème dans cet article améliore non seulement la capacité du système, mais également la sécurité par rapport à d'autres systèmes IRS traditionnels. En outre, [21] a combiné le système SWIPT avec l'IRS et a encore amélioré les performances du système, ce qui permet de prolonger la durée de vie de la batterie des appareils IoT. Les références [16]-[19], [21] et [23] sont tous axés sur l'amélioration de la sécurité du système IRS ou de la consommation d'énergie du système avec diverses méthodes d'optimisation non convexes. Par conséquent, sur la base des études précédentes, cet article fournit une solution serrée pour maximiser le débit de canal d'un système IRS multi-utilisateurs. Et distinct de certaines des études précédentes, cet article a utilisé une méthode optimale pour obtenir une solution plus serrée de la matrice de décalage de phase plutôt que la SDR directement appliquée et a utilisé la randomisation gaussienne [22].

## 3.2 IRS vs. relayage

Un réflecteur est une surface qui «réfléchit» une onde plane incidente sous la forme d'un faisceau [24]. Différent des réflecteurs paraboliques, dont la courbure physique et la direction déterminent la formation du faisceau, un réflecteur est plat et se compose d'un réseau d'éléments discrets qui diffusent et déphasent chacun différemment les ondes incidentes [25].

Le motif de déphasage parmi les éléments détermine dans quelle direction le faisceau réfléchi est formé. Bien que la surface puisse être grande, les éléments individuels ont généralement une taille inférieure à la longueur d'onde [25], [26]. Les réseaux de réflexion avec des propriétés reconfigurables en temps réel ont récemment gagné en intérêt dans les communications mobiles, sous des noms tels que la surface réfléchissante intelligente (IRS) [22], [18] et les métasurfaces

contrôlées par logiciel [27], [28] et [29]. L'idée principale est de prendre en charge la transmission d'une source vers une destination en adaptant l'environnement de propagation; c'est-à-dire pour configurer l'IRS pour former en faisceau son signal reçu vers la destination.

C'est le même cas d'utilisation que pour les relais half-duplex [30], à la différence essentielle qu'un relais traite activement le signal reçu avant de retransmettre un signal amplifié, tandis qu'un IRS réfléchit passivement le signal sans amplification mais avec formation de faisceau. Le relais atteint un rapport signal sur bruit (SNR) plus élevé au prix d'une pénalité pré-log due à la transmission à deux sauts. Une comparaison avec un relais idéal d'amplification (AF) a été faite dans [31], montrant de grands gains d'efficacité énergétique en utilisant un IRS. Cependant, le relais de décodage (DF) est connu pour surpasser le relais AF en termes de débits réalisables [32] et constitue donc une meilleure référence.

## 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. Alors que les travaux précédents ont principalement optimisé les réflexions, dans cet étude on compare la nouvelle technologie avec le relais classique DF. L'observation principale est que des débits très élevés et/ou de grandes métasurfaces sont nécessaires pour surpasser le relais DF, à la fois en termes de minimisation de la puissance d'émission totale et de maximisation de l'efficacité énergétique, ce qui inclut également la dissipation dans le matériel de l'émetteur-récepteur.

Dans ce travail, nous essayons de faire une comparaison équitable entre la transmission soutenue par IRS et le relais DF, dans le but de déterminer la taille d'un IRS nécessaire pour surpasser le relais conventionnel.

## 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

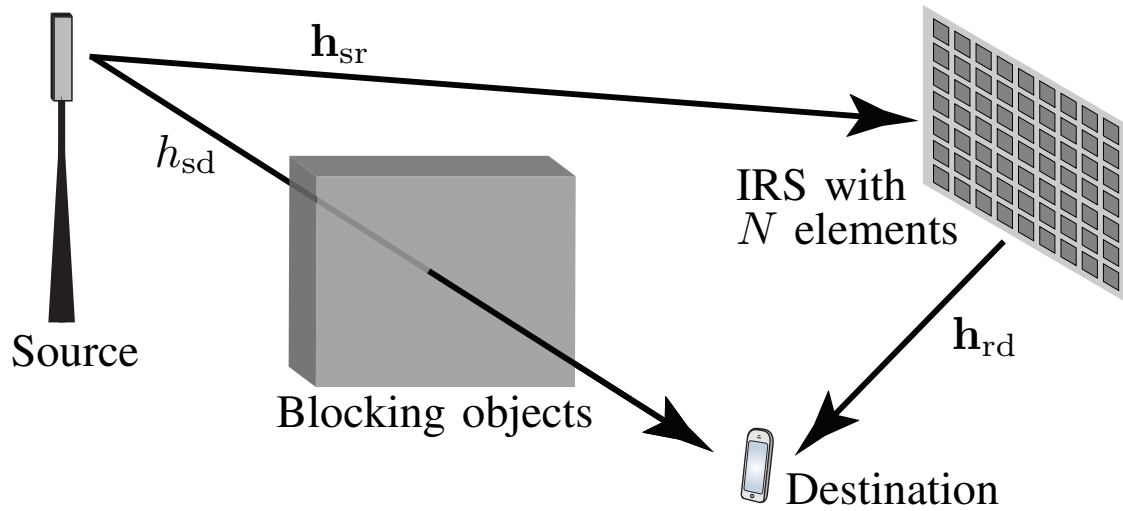
$$R_{\text{SISO}} = \log_2 \left( 1 + \frac{p |h_{sd}|^2}{\sigma^2} \right) \quad (4.2)$$

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.

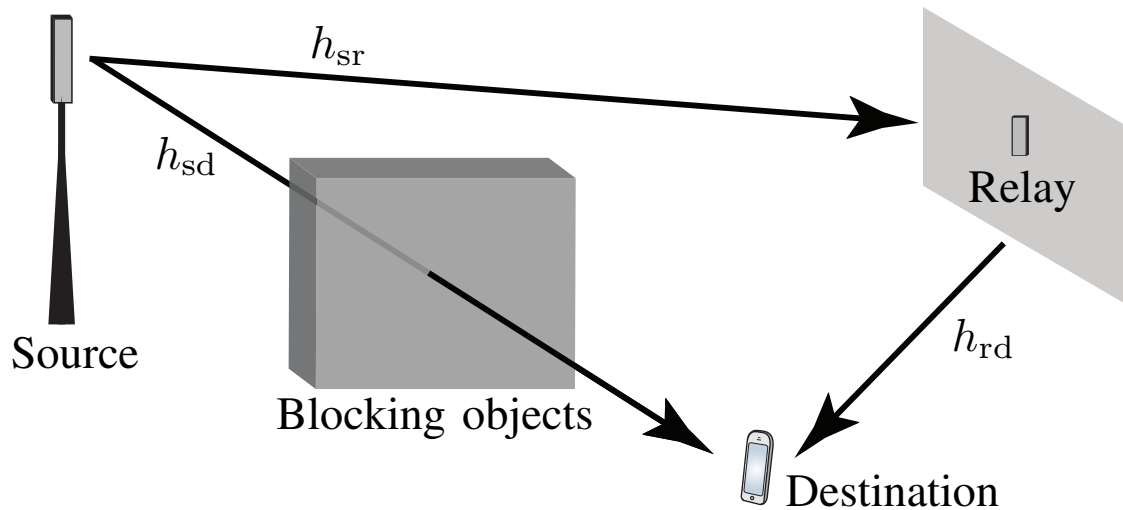
### 4.1.1 Transmission assistée par une IRS

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 la longueur d'onde, donc il disperse le signal entrant avec un gain approximativement constant dans toutes les directions d'intérêt [33]. Les propriétés de l'IRS sont donc pleinement représentées par la matrice diagonale

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



(a) Transmission assistée par une IRS



(b) Transmission assistée par relais

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

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 [33], 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 [34]

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

### 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

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

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

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

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

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

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 (2.7) et (2.9) pour une combinaison de rapport maximum (maximum ratio combining), le taux suivant peut être atteint à la destination [34]

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

## 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 [35] 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 [34]

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

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)

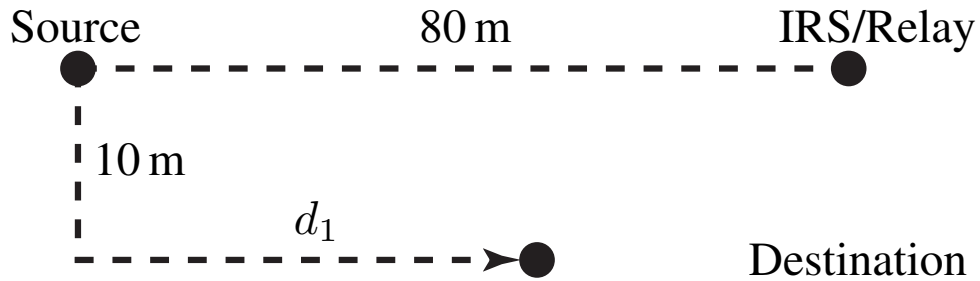


FIGURE 4.2 – La configuration de simulation où  $d_1$  est variable.

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 Fig. 4.3 montre la puissance d'émission nécessaire pour atteindre un débit de  $\bar{R} = 4$  bits/s/Hz ou  $\bar{R} = 6$  bits/s/Hz. La bande passante est  $B = 10$  MHz, la puissance de bruit correspondante est de -94 dBm et  $\alpha = 1$ . La figure montre les résultats pour le cas SISO, le relais DF et un IRS avec  $N \in \{25; 50; 100; 150\}$ .

Dans le cas de  $\bar{R} = 4$  bits/s/Hz, le cas SISO nécessite la puissance la plus élevée tandis que le cas de relais DF nécessite le moins de puissance à tous les emplacements considérés de la destination. La puissance d'émission requise dans le cas de l'IRS diminue à mesure que  $N$  augmente et l'écart avec le cas de relais DF est le plus petit lorsque la destination est soit proche de la source, soit de l'IRS. On peut facilement voir que  $N > 160$  est nécessaire si l'IRS doit surpasser le relais DF lorsque  $d_1 = 80$  m.

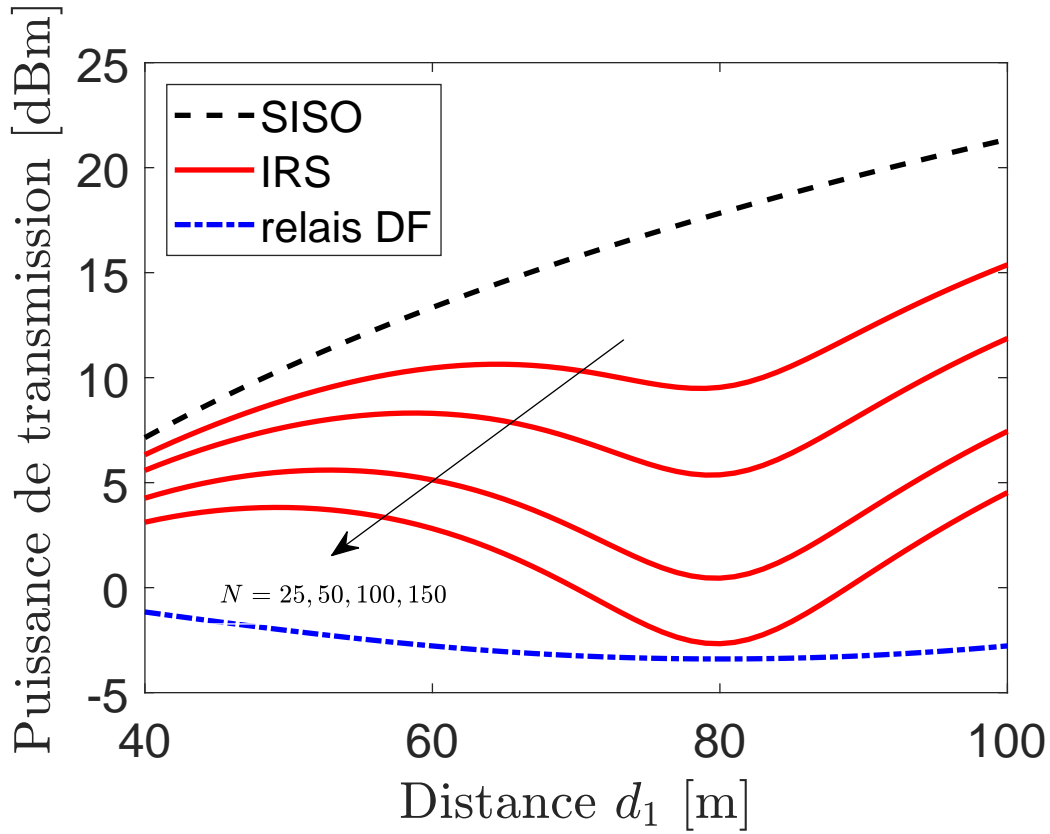
Des puissances d'émission plus élevées sont nécessaires sur la Fig. 4.3(b), où le débit est augmenté à  $\bar{R} = 6$  bits/s/Hz. Le cas de l'IRS devient plus compétitif; il nécessite le moins d'énergie lorsque la destination est proche de la source, alors que seulement  $N > 70$  est nécessaire pour surpasser le relais lorsque  $d_1 = 80$  m. La raison pour laquelle le relais perd certains de ses avantages est qu'il doit avoir un SINR plus élevé que dans le cas de l'IRS en raison de la pénalité de 1/2-prélog; ainsi, la puissance requise croît plus rapidement avec  $\bar{R}$  dans le cas de relais.

### 4.3 Conclusion

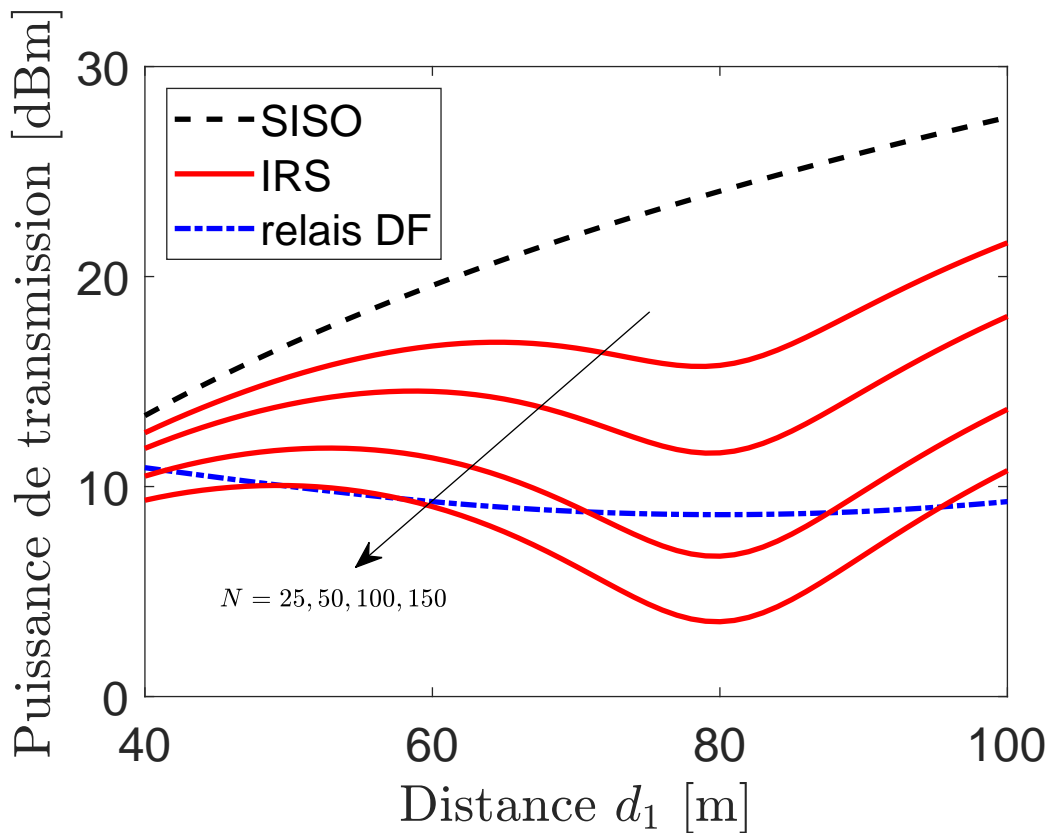
Nous avons comparé le relais DF classique avec le nouveau concept des IRS. L'observation clé est qu'un IRS a besoin de centaines d'éléments ré-configurables (chacun de la taille d'une antenne) pour être compétitif, même si nous avons considéré les canaux idéaux de déphasage et de fréquence plate, qui sont deux

hypothèses qui profitent clairement à l'IRS. La raison en est que la puissance d'émission de la source doit voyager sur deux canaux pour atteindre la destination, ce qui entraîne un très petit gain de canal par élément dans l'IRS - le SNR devient presque le même que pour le relais d'amplification et de transmission sans amplification. Par conséquent, l'IRS a besoin de nombreux éléments pour compenser le faible gain du canal. En revanche, avec le relais DF, on émet d'abord sur un canal avec un gain  $\beta_{sr}$  puis on émet à nouveau sur un canal avec un gain  $\beta_{rd}$ .

Alors que le grand nombre d'éléments est une faiblesse pour les IRS, l'avantage est qu'un IRS ne nécessite aucun amplificateur de puissance dans sa forme idéale ; cependant, dans la pratique, des composants actifs sont nécessaires pour le déphasage adaptatif.



(a)  $\bar{R} = 4$  bit/s/Hz.



(b)  $\bar{R} = 6$  bit/s/Hz.

FIGURE 4.3 – La puissance d'émission nécessaire pour atteindre le débit  $\bar{R}$  dans le scénario représenté sur la Fig. 4.3, en fonction de la distance  $d_1$ .

## Conclusion et perspectives

Dans ce travail de recherche, une brève étude sur les surface intelligente re-configurable ou réfléchissantes (RIS) a été effectuée. Tout d'abord, on a étudié les fondamentaux des systèmes de transmission assistés par des IRS. Les performances de ce type de systèmes ont été analysées en termes de puissance d'émission nécessaire pour atteindre un taux de transmission donné  $R$ . Le dernier chapitre présente les apports spécifiques de ce mémoire.

Ce travail met en évidence la puissance des systèmes assisté par des IRS qui demeure un sujet de recherche.

Malgré la contribution faite dans ce mémoire et dans d'autres travaux sur les systèmes IRS, plusieurs problèmes restent à résoudre. En effet, quelqu'un peut considérer le problème d'allocation des ressources quand on utilise des IRS pour un système de communication NOMA (non-orthogonal multiple access) c-à-d pour un système NOMA assisté par une surface réfléchissante intelligente.

## Bibliographie

- [1] IMT Vision – framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond M series mobile , radiodetermination , amateur and related satellite services. 2015.
- [2] M. Dohler and Yonghui Li. Cooperative communications : Hardware, channel and phy. 2010.
- [3] Q. Li, R. Hu, Y. Qian, and G. Wu. Cooperative communications for wireless networks : techniques and applications in lte-advanced systems. *IEEE Wireless Communications*, 19, 2012.
- [4] Q. Zhao and H. Li. Differential modulation for cooperative wireless systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 55 :2273–2283, 2007.
- [5] C. Patel, Gordon L. Stüber, and T. Pratt. Statistical properties of amplify and forward relay fading channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 55 :1–9, 2006.
- [6] N. O'Donoghue and José M. F. Moura. On the product of independent complex gaussians. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 60 :1050–1063, 2012.
- [7] W. W. Jakes. Microwave mobile communications. 1974.
- [8] M. R. Avendi and H. Nguyen. Performance of differential amplify-and-forward relaying in multinode wireless communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 62 :3603–3613, 2013.

- [9] M. R. Avendi and H. Nguyen. Selection combining for differential amplify-and-forward relaying over rayleigh-fading channels. *IEEE Signal Processing Letters*, 20 :277–280, 2013.
- [10] M. R. Avendi, H. Nguyen, and Dac-Binh Ha. It ] 4 d ec 2 01 5 differential amplify-and-forward relaying using linear combining in time-varying channels. 2018.
- [11] T. Kiran and B. S. Rajan. Partially-coherent distributed space-time codes with differential encoder and decoder. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 25, 2006.
- [12] Y. Jing and B. Hassibi. Distributed space-time coding in wireless relay networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5, 2006.
- [13] Jun Zhao. A survey of intelligent reflecting surfaces (IRSs) : Towards 6g wireless communication networks with massive mimo 2.0. 2019.
- [14] G. Yu, Xiaoming Chen, C. Zhong, D. W. K. Ng, and Zhaoyang Zhang. Design, analysis, and optimization of a large intelligent reflecting surface-aided b5g cellular internet of things. *IEEE Internet of Things Journal*, 7 :8902–8916, 2020.
- [15] Jiayi Zhang, Emil Björnson, M. Matthaiou, D. W. K. Ng, H. Yang, and D. Love. Prospective multiple antenna technologies for beyond 5g. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 38 :1637–1660, 2020.
- [16] Shimin Gong, Xiao Lu, D. T. Hoang, D. Niyato, Lei Shu, D. Kim, and Ying-Chang Liang. Toward smart wireless communications via intelligent reflecting surfaces : A contemporary survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 22 :2283–2314, 2020.
- [17] G. Zhou, Cunhua Pan, H. Ren, K. Wang, and A. Nallanathan. Intelligent reflecting surface aided multigroup multicast miso communication systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 68 :3236–3251, 2020.
- [18] Qingqing Wu and R. Zhang. Towards smart and reconfigurable environment : Intelligent reflecting surface aided wireless network. *IEEE Communications Magazine*, 58 :106–112, 2020.

- [19] Xianghao Yu, Dongfang Xu, Y. Sun, D. W. K. Ng, and R. Schober. Robust and secure wireless communications via intelligent reflecting surfaces. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 38 :2637–2652, 2020.
- [20] Dongfang Xu, Xianghao Yu, Yan Sun, D. W. K. Ng, and R. Schober. Resource allocation for secure irs-assisted multiuser miso systems. *2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pages 1–6, 2019.
- [21] Jingxian Liu, Ke Xiong, Y. Lu, D. W. K. Ng, Zhangdui Zhong, and Zhu Han. Energy efficiency in secure irs-aided swipt. *IEEE Wireless Communications Letters*, 9 :1884–1888, 2020.
- [22] Qingqing Wu and R. Zhang. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18 :5394–5409, 2019.
- [23] D. W. K. Ng, R. Schober, and H. Alnuweiri. Power efficient miso beamforming for secure layered transmission. *2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 422–427, 2014.
- [24] J Huang. Reflectarray antenna. 2005.
- [25] D. Headland, T. Niu, E. Carrasco, D. Abbott, S. Sriram, M. Bhaskaran, C. Fumeaux, and W. Withayachumnankul. Terahertz reflectarrays and nonuniform metasurfaces. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 23 :1–18, 2017.
- [26] N. M. Estakhri and A. Alú. Wave-front transformation with gradient metasurfaces. *Physical Review X*, 6 :041008, 2016.
- [27] C. Liaskos, Shuai Nie, A. Tsioliaridou, A. Pitsillides, S. Ioannidis, and I. Akyildiz. A new wireless communication paradigm through software-controlled metasurfaces. *IEEE Communications Magazine*, 56 :162–169, 2018.
- [28] Emil Björnson, L. Sanguinetti, H. Wymeersch, J. Hoydis, and T. Marzetta. Massive mimo is a reality - what is next? five promising research directions for antenna arrays. *ArXiv*, abs/1902.07678, 2019.

- [29] M. Renzo, M. Debbah, D. P. Huy, A. Zappone, Mohamed-Slim Alouini, C. Yuen, Vincenzo Sciancalepore, G. C. Alexandropoulos, J. Hoydis, H. Gaa-nin, J. D. Rosny, A. Bounceur, G. Lerosey, and M. Fink. Smart radio environments empowered by reconfigurable ai meta-surfaces : an idea whose time has come. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019 :1–20, 2019.
- [30] J. N. Laneman, D. Tse, and G. Wornell. Cooperative diversity in wireless networks : Efficient protocols and outage behavior. *IEEE Transactions on Information Theory*, 50 :3062–3080, 2004.
- [31] C. Huang, A. Zappone, G. C. Alexandropoulos, M. Debbah, and C. Yuen. Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18 :4157–4170, 2019.
- [32] G. Farhadi and N. Beaulieu. On the ergodic capacity of multi-hop wireless relaying systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8, 2009.
- [33] Özgecan Özdoğan, Emil Björnson, and E. Larsson. Intelligent reflecting surfaces : Physics, propagation, and pathloss modeling. *IEEE Wireless Communications Letters*, 9 :581–585, 2020.
- [34] Emil Björnson, Özgecan Özdoğan, and E. Larsson. Intelligent reflecting surface versus decode-and-forward : How large surfaces are needed to beat relaying? *IEEE Wireless Communications Letters*, 9 :244–248, 2020.
- [35] 3rd generation partnership project; technical specification group radio access network; evolved universal terrestrial radio access (e-utra); further advancements for e-utra physical layer aspects (release 9).

## **Abstract**

The deployment of software-controlled metasurfaces also known as intelligent reflective surfaces (IRS) can improve the throughput and energy efficiency of wireless channels. IRSs are used to reflect signals from source to destination, especially when the direct path is weak. This work fairly compares this new technology with the classic DF relaying. The main observation is that very high bit rates and/or large metasurfaces are needed to outperform the DF relaying, in terms of minimizing the total transmit power.

**Keywords :** spectral efficiency, 5G.

## ملخص:

يمكن أن يؤدي استخدام الأسطح الفائقة والتي يمكن أن نتحكم فيها بواسطة البرمجيات والمعروفة أيضاً باسم الأسطح العاكسة الذكية (IRS) إلى تحسين الإنتاجية وكفاءة الطاقة للقنوات اللاسلكية. تُستخدم الـ IRS لعكس الإشارات من المصدر إلى الوجهة ، خاصةً عندما يكون المسار المباشر ضعيفاً. يقارن هذا العمل هذه التقنية الجديدة إلى حد ما مع مرحل فك تشفير DF الكلاسيكي. الملاحظة الرئيسية هي أن هناك حاجة إلى معدلات بتات عالية جداً و/أو أسطح فائقة كبيرة للتغلب على فك تشفير DF الكلاسيكي ، من حيث تقليل قدرة الإرسال الإجمالية.

## Résumé

Le déploiement des métasurfaces contrôlées par logiciel encore appelé des surface intelligentes réfléchissantes (IRS) peut améliorer le débit et l'efficacité énergétique des canaux sans fil. Les IRS sont utilisées pour refléter les signaux de la source à la destination, en particulier lorsque le chemin direct est faible. Ce travail compare d'une manière équitable cette nouvelle technologie avec le relais classique de décodage DF. L'observation principale est que des débits très élevés et/ou de grandes métasurfaces sont nécessaires pour surpasser le relais DF, en termes de minimisation de la puissance d'émission totale.