

Optimisation de la liaison montante d'un système de communication multi-utilisateur assisté par des surfaces intelligentes vers une plateforme aérienne à haute altitude

par

Nessrine MSILINI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 29 AOÛT 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Nessrine MSILINI, 2025



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Waël Jaafar, directeur de mémoire
Département de génie logiciel et TI à l'École de technologie supérieure

M. Georges Kaddoum, codirecteur
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

Mme. Bassant Selim, présidente du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Rami Langar, examinateur externe
Département de génie logiciel et TI à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE “18 AOÛT 2025”

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie ma mère attentionnée, mon père aimant et mon frère qui m'apporte son soutien, MERCI de croire en moi. Je vous dois tous les succès que j'ai remportés et que je remporterai tout au long de ma vie.

Je tiens également à remercier mon directeur de mémoire, M. Waël Jaafar, et mon co-directeur de mémoire, M. Georges Kaddoum, pour leur patience et leurs conseils. Leur regard critique m'a été très précieux pour structurer mon travail et améliorer la qualité des différentes sections.

Un grand merci et une grande reconnaissance à Mlle Insaf Rzig et à Mlle Eya Boubaker pour m'avoir fait part d'informations précieuses. Je pense que nous nous sommes rencontrées au bon moment.

Que les membres du jury trouvent ici l'expression de ma sincère gratitude pour l'honneur qu'ils me font en prenant le temps de lire et d'évaluer ce travail.

Enfin, je souhaite exprimer, du plus profond de mon cœur, toute ma reconnaissance à Oumaima Rais, Ranim Rahali, Fatma Atitallah et Ohood Sabr. Leur présence bienveillante et leur soutien indéfectible m'ont permis de traverser les périodes les plus sombres de ce parcours. Dans les moments de doute et de solitude, loin de chez moi, elles ont su essuyer mes larmes, alléger mes peines et me redonner la force de me relever. Merci d'avoir été là, avec tant de générosité et d'humanité.

Optimisation de la liaison montante d'un système de communication multi-utilisateur assisté par des surfaces intelligentes vers une plateforme aérienne à haute altitude

Nessrine MSILINI

RÉSUMÉ

Ce mémoire s'intéresse à l'optimisation des communications montantes dans un système de télécommunication intégré plateforme à haute altitude (HAPS)–surface intelligente (RIS), où les utilisateurs partagent les ressources du HAPS et les éléments réfléchissants d'une surface intelligente RIS. Après une modélisation précise des canaux utilisateurs–HAPS et RIS–HAPS selon une distribution Nakagami- m , le problème est formulé comme une optimisation conjointe des puissances d'émission et des phases RIS afin de maximiser la somme des débits du système. Cette optimisation est contrainte par des exigences minimales de qualité de service (QoS) pour chaque utilisateur. Divers algorithmes d'optimisation sont explorés, y compris une méthode aléatoire (Random) servant de référence de base, qui est développée en une méthode de base (Baseline) partiellement aléatoire, quantifiant quelques paramètres (tels que la puissance et le déphasage RIS), ainsi que des algorithmes métaheuristiques tels que l'algorithme d'optimisation baleine (WOA), l'optimisation par essaim de particules (PSO) et l'optimisation itérative proposée, i.e., optimisation alternée (AO). Les résultats numériques permettent de comparer ces approches selon plusieurs paramètres système (ex : nombre d'antennes, puissance maximale, etc.), en mettant en évidence les compromis entre performance et complexité algorithmique.

Mots-clés: HAPS, RIS, Optimisation

Optimization of the Uplink for RIS-Assisted Orthogonal Multi-User HAPS Communications

Nessrine MSILINI

ABSTRACT

This thesis focuses on optimizing uplink communications in an integrated high-altitude platform (HAPS)–intelligent surface (RIS) telecommunications system, where users share HAPS resources and the reflective elements of an intelligent RIS surface. After accurately modelling the user–HAPS and RIS–HAPS channels according to a Nakagami- m distribution, the problem is formulated as a joint optimization of transmission powers and RIS phases to maximize the total sum throughput of the system. This optimization is constrained by minimum quality-of-service (QoS) requirements for each user. Various optimization algorithms are explored, including a random method (Random) serving as a baseline reference, which is developed into a partially random baseline method (Baseline), quantifying a few parameters (such as RIS power and phase shift), metaheuristic algorithms such as the Whale Optimization Algorithm (WOA) and Particle Swarm Optimization (PSO), and finally a proposed iterative optimization approach, i.e., Alternating Optimization (AO). Through extensive simulations, we compare these methods in terms of sum data rate, and under the impact of several system parameters (e.g., number of antennas, maximum power, etc.), highlighting the trade-offs between performance and complexity.

Keywords: HAPS, RIS, Optimization

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 CONTEXTE ET GÉNÉRALITÉS	5
1.1 Évolution des réseaux mobiles : de la 1G à la 5G	5
1.1.1 La 1G	6
1.1.2 La 2G	6
1.1.3 La 3G	7
1.1.4 La 4G	8
1.1.5 La 5G	9
1.2 Vers la 6G	10
1.2.1 Pourquoi la 6G ?	10
1.2.2 Objectifs de la 6G	10
1.2.3 6G : Vers de nouveaux paradigmes	11
1.3 Plateformes aériennes à haute altitude	13
1.3.1 Définition et fonctionnement	13
1.3.2 Modélisation des communications assistées par HAPS	17
1.4 Surfaces intelligentes reconfigurables	20
1.4.1 Évolution historique	20
1.4.2 Classification des RIS	22
1.4.3 Fonctionnement	23
1.4.4 Modélisation des communications assistées par RIS	24
1.5 Conclusion	26
CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART	27
2.1 Revue de littérature sur les communications HAPS : La liaison descendante	27
2.2 Revue de littérature sur les communications HAPS : La liaison montante	28
2.3 Différences et enjeux entre la liaison montante et la liaison descendante	31
2.4 Revue de littérature sur les communications avec RIS	33
2.5 Déploiements conjoints HAPS – RIS	36
2.6 Modélisation des communications HAPS assistées par RIS	36
2.7 Conclusion	38
CHAPITRE 3 ÉTUDE DE LA LIAISON MONTANTE D'UN SYSTÈME MULTI- UTILISATEUR ASSISTÉ PAR RIS VERS HAPS	39
3.1 Modèle du système	39
3.2 Modèle de canal	41
3.3 Modèle de communication	43
3.4 Formulation du problème	44
3.5 Méthodes d'optimisation et configuration des simulations	45
3.5.1 Optimisation de base	46

3.5.2	Optimisation des baleines	47
3.5.3	Optimisation par essaim de particules	48
3.5.4	Optimisation alternée (Solution proposée)	49
3.5.5	Charge de calcul des méthodes	52
3.6	Conclusion	52
CHAPITRE 4 RÉSULTATS NUMÉRIQUES ET DISCUSSION		55
4.1	Paramètres de simulation et environnement	55
4.2	Assignation de \mathbf{N}_R et \mathbf{N}_H	55
4.2.1	Allocation proportionnelle au gain de canal	56
4.2.2	Allocation proportionnelle à la distance UE-RIS et UE-HAPS	57
4.2.3	Allocation de type Max–Min	58
4.2.4	Allocation égalitaire	58
4.3	Étude des performances pour différentes stratégie d'assignation de \mathbf{N}_R et \mathbf{N}_H	58
4.4	Étude de convergence des méthodes métaheuristiques	61
4.5	Analyse de l'impact des paramètres système	63
4.5.1	Variation du nombre d'éléments RIS	64
4.5.2	Variation du nombre d'antennes HAPS	65
4.5.3	Variation de la puissance de transmission	66
4.6	Discussion	67
4.7	Conclusion	69
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		71
LISTE DE RÉFÉRENCES		73

LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau 1.1	Comparaison des des différentes générations de réseau 1G à 5G Adapté de (Bensoussan & Le Mouroux, 2026, pp. 311-316),(Solyman & Yahya, 2022, pp. 2-4) et (Shah, 2022, pp. 1-3)	9
Tableau 1.2	Différents types de métasurfaces	22
Tableau 2.1	Synthèse des travaux en liaison descendante pour HAPS	29
Tableau 2.2	Synthèse des travaux en liaison montante pour HAPS	31
Tableau 2.3	Synthèse des travaux sur communciations avec RIS	35
Tableau 3.1	Tableau des symboles et leur description	40
Tableau 3.2	Nombre d'évaluations du débit	52
Tableau 4.1	Assignation proportionnelle au gain de canal ($K = 4, N_R = N_H = 16$) .	57
Tableau 4.2	Allocation proportionnelle à la distance UE-RIS et UE-HAPS ($K = 4, N_R = N_H = 16$)	57
Tableau 4.3	Allocation de type Max–Min ($K = 4, N_R = N_H = 16$)	58
Tableau 4.4	Allocation égalitaire ($K = 4, N_R = N_H = 16$)	59

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	L'évolution des réseaux mobiles de la 1 ^{er} génération à la 6 ^{ème} génération	5
Figure 1.2	Exemple de réseau de communication assisté par HAPS : Le HAPS peut établir des liens avec le satellite, la station de base terrestre, les antennes relais, et les utilisateurs finaux (terrestres ou aériens)	14
Figure 1.3	Exemples de plateformes HAPS aérostatiques : (a) Stratobus (Thales Alenia Space) (Thales Alenia Space, 2024), (b) Sceye HAPS (SoftBank) (SoftBank Group Corp., 2025), (c) Dirigeables historiques de la NASA (ARC-1993-A83-0499-24) (NASA, 1993)	15
Figure 1.4	Exemples de plateformes HAPS aérodynamiques : (a) Zephyr (Airbus) (Airbus, 2024), (b) Sunglider (HAPSMobile) (InceptiveMind, 2020)	16
Figure 1.5	Exemple de ballons stratosphériques : KSC-2013-3113 (NASA) Adaptée de (NASA, 2013)	16
Figure 1.6	Développement de métamatériaux, de métasurfaces, de métasurfaces reconfigurables et de métasurfaces intelligentes reconfigurables (RIS) Adaptée de (Feng <i>et al.</i> , 2023, p. 2)	21
Figure 1.7	(a) Communication sans fil assistée par RIS/IRS vs. (b) Communication par rétrodiffusion vs. (c) Communication assistée par relai AF Adaptée de (Gong <i>et al.</i> , 2020, p. 2)	23
Figure 1.8	Principe de fonctionnement du RIS Adaptée de (Das <i>et al.</i> , 2023, p. 8) ..	24
Figure 3.1	Modèle de communication UEs-HAPS assisté par RIS	41
Figure 3.2	Méthodes d'optimisation développées	45
Figure 3.3	Comportements des baleines à bosse pour chasser.	48
Figure 3.4	Temps d'exécution moyen par méthode (100 réalisations de canaux, $N_R = N_H = 16$)	53
Figure 4.1	Disposition spatiale du système : Coordonnées des utilisateurs (UE1–UE4), du RIS et du HAPS.	56
Figure 4.2	Débit total moyen vs. stratégie d'assignation des éléments RIS et antennes HAPS (Méthode Baseline).	59

Figure 4.3	Débit total moyen vs. stratégie d'assignation des éléments RIS et antennes HAPS (Méthode PSO).	60
Figure 4.4	Débit total moyen vs. stratégie d'assignation des éléments RIS et antennes HAPS (Méthode WOA).	61
Figure 4.5	Débit total moyen vs. stratégie d'assignation des éléments RIS et antennes HAPS (Méthode AO).	62
Figure 4.6	Courbes de convergence des méthodes d'optimisation ($N_H = N_R = 16$ et $P_{\max} = 40$ dBm).	63
Figure 4.7	Débit total moyen vs. N_R (différentes méthodes).	64
Figure 4.8	Débit total moyen vs. N_H (différentes méthodes).	65
Figure 4.9	Débit total moyen vs. P_{\max} (différentes méthodes).	67

LISTE DES ALGORITHMES

	Page
Algorithme 3.1	Optimisation aléatoire (Random) 46
Algorithme 3.2	Optimisation de base (Baseline) 47
Algorithme 3.3	Optimisation des baleines (WOA) 49
Algorithme 3.4	Optimisation par essaim de particules (PSO) 50
Algorithme 3.5	Optimisation par alternance (AO) 51

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

1G	1ère Génération
2G	2ème Génération
3G	3ème Génération
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	4ème Génération
5G	5ème Génération
6G	6ème Génération
AF	Amplify-and-Forward
AO	Alternating Optimization
AoA	Angle-of-Arrival
AoD	Angle-of-Departure
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BLM	BaseLine Method
BS	Base Station
CDMA	Code Division Multiple Access
CSI	Channel State Information
DF	Decode-and-Forward
DFTS-OFDM	Discrete Fourier Transform-Spread OFDM
eMBB	enhanced Mobile Broadband
ÉTS	École de Technologie Supérieure
EVM	Error Vector Magnitude
FDMA	Frequency-Division Multiple Access
GSM	Global System for Mobile Communications
HAPS	High-Altitude Platform Station

HSPA	High Speed Packet Access
HQAM	High-order Quadrature Amplitude Modulation
ICV	Intelligent & Connected Vehicle
IoT	Internet-of-Things
ITU-R	International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector
LEO	Low-Earth Orbit
LoS	Line-of-Sight
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
mMTC	massive Machine-Type Communications
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
ML	Machine Learning
MMS	Multimedia Messaging Service
mmWave	millimetre-Wave
NAMP	Narrowband Advanced Mobile Phone Service
NLoS	Non-Line-of-Sight
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
NR	New Radio
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PIN	Positive-Intrinsic-Negative (diode)
PLF	Path-Loss Factor
PSO	Particle Swarm Optimization
QoS	Quality-of-Service
RF	Radio Frequency
RIS	Reconfigurable Intelligent Surface
RQAM	Rectangular Quadrature Amplitude Modulation

RSMA	Rate-Splitting Multiple Access
SCA	Successive Convex Approximation
SC-FDMA	Single-Carrier Frequency Division Multiple Access
SDR	Semidefinite Relaxation
SDP	Semidefinite Programming
SDP/DC	SDP + Difference-of-Convex
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SMS	Short Message Service
SQAM	Symmetric Quadrature Amplitude Modulation
TACS	Total Access Communication System
TDMA	Time Division Multiple Access
TUAV	Tethered UAV
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communications
VHETNET	Vertical Heterogeneous Network
VoIP	Voice over Internet Protocol
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WMMSE	Weighted Minimum Mean-Square Error
WO	Whale Optimization
XQAM	Cross Quadrature Amplitude Modulation

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

bps	bit par seconde
bps/Hz	bits par seconde par Hertz
dB	Décibel
dBi	Décibels par rapport à un radiateur isotrope
dBm	Décibel-milliwatts
dBm/Hz	Décibel-milliwatt par hertz
Gbps	Géga bit par seconde
GHz	Gigahertz
Hz	Hertz
kbps	Kilo bit par seconde
kHz	KiloHertz
Km	Kilomètre
m	Mètre
Mbps	Méga bit par seconde
MHz	MegaHertz
mW	milliwatt
ms	Milliseconde
rad	Radian
Tbps	Térabit par seconde
THz	Térahertz
W	Watt
π	Pi (constante mathématique)
σ^2	Variance du bruit (souvent en W ou dBm)

INTRODUCTION

Dans un monde de plus en plus interconnecté, la demande croissante en connectivité fiable, rapide et omniprésente pousse les réseaux sans fil à évoluer au-delà des standards actuels. La sixième génération de réseaux mobiles, ou 6G, ne se limite pas à une augmentation des débits, elle vise à construire une architecture capable de connecter intelligemment des milliards d'objets, de personnes et de systèmes, dans des environnements complexes, urbains ou isolés (Saad, Bennis & Chen, 2020; Dang, Amin, Shihada & Alouini, 2020).

Face à ces ambitions, des nouvelles technologies émergent pour relever les défis liés à la couverture, à l'efficacité énergétique et à la résilience des réseaux. Parmi celles-ci, deux concepts retiennent particulièrement l'attention des chercheurs : les surfaces intelligentes reconfigurables (Reconfigurable Intelligent Surfaces -RIS) et les plateformes aérienne à haute altitude (High Altitude Platform Stations -HAPS).

Les RIS transforment les surfaces de l'environnement en entités capables de manipuler les ondes électromagnétiques, sans émission active, permettant d'améliorer la qualité-de-service (QoS) tout en réduisant la consommation d'énergie (Liaskos *et al.*, 2018). Les HAPS, quant à elles, sont des plateformes quasi-stationnaires positionnées dans la stratosphère (à environ 20 km d'altitude), agissant comme des relais aériens souples, rapides à déployer et capables de couvrir de vastes régions (Belmekki *et al.*, 2024; LinkedIn, 2025).

Comme souligné dans (Kurt *et al.*, 2021), l'intégration de RIS et de HAPS dans l'architecture 6G permet d'envisager des réseaux en couches, où les stations terrestres, les plateformes stratosphériques et les satellites coopèrent pour garantir une connectivité homogène. Les HAPS se distinguent des satellites par leur latence plus faible, leur stabilité de position et leur coût de déploiement réduit. Les RIS, de leur côté, offrent une solution éco-énergétique pour contrôler dynamiquement les canaux sans recourir à des équipements actifs gourmands en énergie (LinkedIn, 2025).

Malgré les avancées dans ce domaine, une grande partie des recherches existantes s'est concentrée sur le lien de communication descendant (du HAPS vers les utilisateurs), plus accessible sur le plan analytique et pratique (Kurt *et al.*, 2021). En revanche, le lien montant (des utilisateurs vers le HAPS), bien que crucial dans de nombreux scénarios (Internet-des-Objets -IoT, télémédecine, communication d'urgence), reste peu exploré. Cette négligence s'explique en grande partie par la faible puissance d'émission des dispositifs utilisateurs, qui limite significativement les performances de la liaison montante. De plus, la volonté de maintenir des terminaux simples et universels, sans modifications matérielles spécifiques pour chaque scénario, impose des contraintes supplémentaires. Dans ce contexte, il devient crucial de développer des solutions d'optimisation réseau capables de renforcer la liaison montante, sans alourdir la complexité côté utilisateur.

Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique en proposant une solution simple et efficace. Il s'agit d'exploiter des surfaces intelligentes réfléchissantes (RIS) placées sur les façades de bâtiments afin d'améliorer la qualité de la liaison montante vers le HAPS. Cette approche permet de compenser la faible puissance d'émission des terminaux utilisateurs tout en conservant une architecture légère et réaliste. Ceci passe par l'étape de modélisation de la communication montante dans un système où plusieurs utilisateurs communiquent avec un HAPS via une surface RIS. L'objectif est de maximiser le débit montant total tout en respectant des contraintes de QoS (c-à-d un débit de communication minimal garanti par utilisateur), à travers l'optimisation conjointe de la puissance d'émission et des phases du RIS. Différentes techniques d'optimisation seront comparées, telles que l'optimisation aléatoire, l'algorithme WOA et la méthode PSO.

La suite de ce rapport est organisée comme suit : une première partie présente les fondements théoriques des communications 6G, des RIS et des HAPS. Puis, une revue de littérature sur les HAPS et RIS est détaillée. Ensuite, nous expliquons la modélisation du système étudié et

la formulation mathématique du problème d'optimisation. Enfin, nous exposons les méthodes mises en œuvre, suivies d'une analyse des résultats expérimentaux et d'une conclusion générale.

CHAPITRE 1

CONTEXTE ET GÉNÉRALITÉS

Cette section commence par une présentation générale du cadre conceptuel, introduisant les technologies émergentes façonnant les réseaux de communication sans fil, telles que les stations à haute altitude (HAPS) et les surfaces intelligentes reconfigurables (RIS). L'impact potentiel de l'intégration HAPS-RIS dans le contexte de la 6G sera ensuite exploré.

1.1 Évolution des réseaux mobiles : de la 1G à la 5G

La sixième génération de réseaux mobiles (6G) représente la prochaine grande avancée dans l'évolution des communications sans fil, visant à offrir des performances inédites en matière de débit, de latence, de couverture et d'intelligence du réseau. Toutefois, bien avant l'émergence de cette vision ambitieuse, le monde a connu une succession de générations cellulaires, chacune apportant son lot d'innovations et de ruptures technologiques.

Depuis la première génération (1G) dans les années 1980, jusqu'à la 5G déployée massivement à partir de 2020 (Bensoussan & Le Mouroux, 2026), les réseaux mobiles ont évolué pour répondre à des besoins de plus en plus exigeants en matière de connectivité, de capacité et de services numériques (Voir figure 1.1). Cette évolution progressive a permis d'introduire la voix, les messages texte, l'Internet mobile, la vidéo à la demande, et plus récemment, l'IoT et les applications critiques à faible latence.

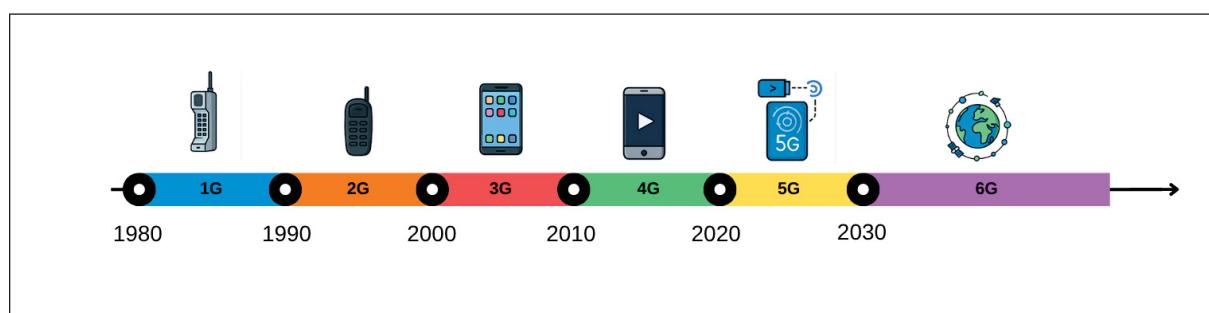


Figure 1.1 L'évolution des réseaux mobiles de la 1^{er} génération à la 6^{ème} génération

La suite de cette section présente brièvement les caractéristiques clés de chaque génération.

1.1.1 La 1G

La technologie 1G, lancée dans les années 1980, était la première génération de communications mobiles. Fondamentalement, elle repose sur la technologie analogique et utilise l'accès multiple par répartition en fréquence (FDMA) (Solyman & Yahya, 2022). La 1G permettait essentiellement la transmission vocale dans la bande de fréquences 800 MHz, utilisant la modulation de fréquence analogique (FM) (Bensoussan & Le Mouroux, 2026), et était représentée par deux normes principales, la première étant apparue aux États-Unis en 1976 sous le nom d'AMPS (Advanced Mobile Phone System) et la seconde étant le NAMPS (Narrowband Advanced Mobile Phone System). Ces normes se caractérisaient par des débits de données très limités (jusqu'à 2,4 kbps) et une QoS relativement médiocre. Selon (Bensoussan & Le Mouroux, 2026; Shah, 2022), pour le système AMPS, chaque canal occupe 30 kHz, tandis que pour le NAMPS, une bande passante de 30 kHz est partagée en trois bandes de 10 kHz chacune, ce qui se traduit par une qualité inférieure à celle de l'AMPS. De ce fait, et en raison de sa nature analogique, de ses débits de données faibles, et de sa QoS limitée, la 1G ne pouvait pas répondre aux demandes croissantes en matière de fiabilité, de sécurité et de services supplémentaires, ouvrant ainsi la voie à l'avènement de la 2G numérique.

1.1.2 La 2G

La deuxième génération, introduite dans les années 1990, a marqué une rupture avec la technologie analogique en introduisant la transmission numérique. Cette génération repose principalement sur des techniques d'accès multiple telles que le TDMA (Time Division Multiple Access), un système d'accès multiple par répartition dans le temps, connu sous le nom de DAMPS (Digital AMPS) et caractérisé par une bande passante de 30 kHz par canal multiplexé entre trois utilisateurs. Ensuite, le système numérique a évolué à ce qui est connu comme le système GSM (Global System for Mobile Communications), principalement utilisé dans les systèmes de téléphonie cellulaire et caractérisé par un canal occupant une bande passante de 200

kHz multiplexée entre huit utilisateurs (Bensoussan & Le Mouroux, 2026). La 2e génération a permis l'introduction de nombreux services, tels qu'une meilleure qualité vocale, les SMS (Short Messaging Service) et les MMS (Multimedia Messaging Service) (Bensoussan & Le Mouroux, 2026). En outre, elle a établi une norme internationale uniforme pour les communications mobiles, facilitant l'expansion mondiale de cette technologie.

Cependant, afin de répondre au besoin d'un débit plus élevé, une génération intermédiaire appelée 2.5G a vu le jour. Cette nouvelle génération a introduit de nouvelles normes telles que le GPRS (General Packet Radio Service), un système de transmission de données mobiles compatible avec les systèmes TDMA et GSM, qui a permis à ce dernier d'offrir un débit de 172 kbps (jusqu'à 112 kbps en pratique). La 2.5G a aussi introduit le HSCSD (High Speed Circuit Switched Data), un système de transmission de données mobiles compatible avec le système TDMA. Celui-ci offre un débit de données de 64 kbps, ce qui en fait une bonne option pour les transmissions vidéo qui ne nécessitent pas une grande fiabilité.

Malgré les progrès réalisés par la 2G et ses extensions, les débits de données restaient insuffisants pour répondre à la demande émergente d'accès à l'Internet mobile et aux services multimédias.

1.1.3 La 3G

Les facteurs mentionnés précédemment ont conduit à la création de la nouvelle génération au début des années 2000. La troisième génération a marqué un tournant majeur vers les communications orientées données, car elle repose sur des technologies telles que le CDMA-2000 à large bande (ou WCDMA : Wideband CDMA) qui offre des débits de 144 kbps et occupe une bande passante de 5 MHz (Bensoussan & Le Mouroux, 2026). Grâce à la 3G, le monde a découvert les services Internet mobile, la visiophonie et les applications multimédias (Shah, 2022). Cette génération a élargi l'expérience des utilisateurs bien au-delà de la voix et des messages, et a joué un rôle essentiel dans l'émergence des téléphones intelligents (smartphones) permettant une connectivité Internet stable et continue (Solyman & Yahya, 2022) .

Des normes telles que l'UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) et ses évolutions HSPA (High Speed Packet Access) ont amélioré les performances du réseau et réduit la latence des communications. En effet, le HSPA est considéré comme étant la génération 3.5G. Le HSPA peut être distingué entre le HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) en lien descendant, qui a une vitesse de 14,4 Mbps, et le HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) en lien montant, qui a une vitesse pouvant atteindre 5,76 Mbps (Bensoussan & Le Mouroux, 2026).

Cependant, avec l'essor rapide des téléphones intelligents et des applications plus gourmandes en bande passante, les performances offertes par la 3G sont devenues insuffisantes, notamment en termes de vitesse et de latence, d'où la nécessité d'évoluer vers une génération de réseau plus performante.

1.1.4 La 4G

La 4G est lancée dans les années 2010, avec pour objectif de fournir un accès Internet mobile à très haut débit, en utilisant les technologies OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) et SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access), également connu sous le nom de DFTS-OFDM (DFT Spread OFDM) (Bensoussan & Le Mouroux, 2026; Solyman & Yahya, 2022). Ces technologies sont utilisées pour leur haute résistance aux distorsions causées par la propagation par trajets multiples afin de prendre en charge les vitesses élevées des technologies 4G, appelées LTE (Long-term Evolution) et LTE-A (LTE-Advanced).

Les technologies LTE et LTE-A ont permis d'atteindre des vitesses de pointe allant jusqu'à 1,5 Gbps (en liaison montante pour le LTE-A). De plus, le système LTE-A permet d'étendre la bande passante à 100 MHz en combinant plusieurs sous-bandes de 20 MHz, une technique connue sous le nom d'agrégation de porteuses. Comme indiqué dans (Shah, 2022), la 4G a introduit une architecture tout IP, simplifiant la gestion du réseau et optimisant l'utilisation des ressources spectrales. Cependant, l'explosion du nombre d'objets IoT connectés, la diversification des usages, et la demande croissante de latence ultra-faible, ont mis en évidence ses limites.

1.1.5 La 5G

La 5G, déployée à partir de 2020, apporte une rupture technologique majeure en réponse aux besoins croissants en connectivité des objets, des villes intelligentes, et des applications critiques. Basée principalement sur l'OFDMA et introduisant la technique multi-usagers NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access), elle offre des performances exceptionnelles en matière de latence, de densité de connexion, et de débit, pouvant atteindre jusqu'à 10 Gbps vue que la vitesse binaire qu'on peut transmettre pour chaque hertz de la bande passante a passé de 0.2 pour la 2G à 5 bps/Hz pour 5G (Bensoussan & Le Mouroux, 2026; Shah, 2022).

La 5G New Radio (5G-NR) opère sur trois bandes, les bandes basses (en bas de 1 GHz), les bandes modérées (entre 1 GHz et 6GHz, typiquement les bandes 1.8 GHz, 2 GHz, et 3.5 GHz) et les bandes hautes (entre 24 GHz et 40 GHz). L'utilisation des bandes hautes est possible notamment grâce à l'usage des ondes millimétriques. D'après (Bensoussan & Le Mouroux, 2026), cette norme permet une meilleure flexibilité du spectre et une intégration plus fine des antennes multiples intelligentes, c-à-d les antennes MIMO massives (massive Multiple-Input Multiple-Output). Cette génération a permis la mise en œuvre d'applications URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communications), eMBB (Enhanced Mobile Broadband), et mMTC (massive Machine Type Communications), répondant aux défis de l'IoT et de l'industrie 4.0 (Shah, 2022). Toutefois, malgré ses performances impressionnantes, la 5G ne peut à elle seule répondre aux exigences futures de l'intelligence ubiquitaire, des communications immersives et des systèmes autonomes.

La comparaison entre les 5 générations principales est résumée dans le tableau 1.1 ci-dessous.

Tableau 1.1 Comparaison des des différentes générations de réseau 1G à 5G
Adapté de (Bensoussan & Le Mouroux, 2026, pp. 311-316),(Solyman & Yahya, 2022, pp. 2-4) et (Shah, 2022, pp. 1-3)

Génération	Début	Technique d'accès	Applications	Bandes	Normes	Débit max
1G	1980	FDMA	Voix analogique	30 kHz	AMPS, TACS	2.4 kbps
2G	1990	FDMA, TDMA	Voix, SMS, MMS	200 kHz	GSM, IS-95	64-384 kbps
3G	2000	WCDMA, CDMA2000	Internet mobile, multimédia	5 MHz	UMTS, HSPA	Jusqu'à 2 Mbps
4G	2010	OFDMA, SC-FDMA	VoIP, vidéo HD, web mobile	1.4-20 MHz	LTE, LTE-A	Jusqu'à 1 Gbps
5G	2020	OFDMA, NOMA	IoT, eMBB, URLLC	600 MHz-40 GHz	5G-NR	Jusqu'à 10 Gbps

1.2 Vers la 6G

Face aux limites techniques rencontrées par la 5G, notamment en termes de latence, de couverture et de capacité de connexion massive, la recherche se tourne déjà vers la prochaine étape de l'évolution des réseaux mobiles : la 6G. Cette génération vise non seulement à repousser les performances actuelles, mais également à intégrer de manière native l'intelligence artificielle et à soutenir des applications émergentes à forte exigence technologique.

1.2.1 Pourquoi la 6G ?

La technologie sans fil de sixième génération (6G) s'annonce comme une évolution transformative, s'appuyant sur les fondations de la 5G pour répondre à des besoins croissants en matière de connectivité avancée. Malgré ses avantages, la 5G présente certaines limites qui justifient le développement d'une nouvelle génération.

Parmi ces limites figurent l'incapacité à garantir des débits de données ultra-élevés et une latence extrêmement faible, éléments pourtant essentiels pour les futures expériences immersives et les systèmes autonomes avancés (Kaur & Khan, 2022). De plus, les auteurs de (Shafi, Jha & Jain, 2024) expliquent que les motivations derrière la 6G résident dans la volonté de dépasser ces contraintes et d'introduire un nouveau paradigme d'intelligence omniprésente.

La 6G ambitionne d'atteindre des vitesses de transmission dépassant le térorbit par seconde, tout en améliorant l'efficacité énergétique et spectrale. Elle vise également à fusionner de manière transparente les mondes physique, numérique et humain, afin de supporter un large éventail d'applications intelligentes, en particulier dans les villes intelligentes et les environnements de travail sans frontières (Kaur & Khan, 2022; Shafi *et al.*, 2024).

1.2.2 Objectifs de la 6G

Les chercheurs visent des performances encore jamais atteintes (Jiang, Han, Habibi & Schotten, 2021). Ces objectifs peuvent être résumés comme suit :

- **Haut débit de données** : Alors que la 5G offre un débit de pointe allant jusqu'à 10 Gbps, la 6G promet des vitesses dépassant le 1 téabit par seconde (Tbps), rendant possible la transmission instantanée de données massives et de contenus holographiques, en exploitant notamment les bandes térahertz (0,1–10 THz) (Kaur & Khan, 2022; Shafi *et al.*, 2024; Mihret & Haile, 2021).
- **Latence ultra-faible** : La latence visée en 6G est de l'ordre de 0,1 ms, contre environ 1 ms pour la 5G, ce qui permettrait des communications ultra-réactives nécessaires aux applications temps réel/critiques tels que la chirurgie à distance et le contrôle industriel, etc. (Shafi *et al.*, 2024; Jiang *et al.*, 2021).
- **Fiabilité extrême** : L'objectif est d'atteindre un taux de fiabilité de 99,99999 % (7 neufs), ce qui dépasse les capacités actuelles de la 5G (99,999 %) et est crucial pour les services industriels et d'urgence (Mihret & Haile, 2021; Jiang *et al.*, 2021).
- **Densité de connexion** : la 6G prévoit de supporter jusqu'à **10⁷ dispositifs/km²**, soit dix fois plus que la 5G, pour permettre l'essor de l'IoT massif (Kaur & Khan, 2022).
- **Efficacité énergétique et spectrale** : la 6G vise une amélioration de 10 à 100 fois de l'efficacité énergétique et spectrale par rapport à la 5G, afin de répondre aux impératifs de durabilité (Shafi *et al.*, 2024).
- **Intégration native de l'intelligence artificielle (IA)** : Contrairement à la 5G où l'IA est utilisée en périphérie, la 6G ambitionne une orchestration réseau IA-native pour la gestion autonome des ressources, le routage intelligent, et l'allocation dynamique du spectre (Mihret & Haile, 2021).

Ces objectifs sont soutenus par une vision de convergence entre les mondes physique, numérique et biologique.

1.2.3 6G : Vers de nouveaux paradigmes

Alors que la 5G a ouvert la voie à une connectivité plus rapide et plus dense, elle a également révélé les limites d'une architecture principalement terrestre. Pour faire face aux nouvelles attentes, qu'il s'agisse de connecter des régions isolées, de répondre à la densité urbaine

croissante, ou de fournir une qualité de service constante en toutes circonstances, la 6G devra s'appuyer sur des innovations de rupture. Parmi ces technologies de prochaine génération, certaines se démarquent par leur capacité à redéfinir fondamentalement l'infrastructure des réseaux mobiles. En effet, ces dernières visent à construire un réseau ubiquitaire, intelligent, économique en énergie, et capable de s'adapter dynamiquement aux conditions de propagation, aux besoins des utilisateurs, et aux contraintes géographiques.

C'est dans ce contexte que les Plateformes à Haute Altitude (HAPS) et les Surfaces Intelligentes Reconfigurables (RIS) émergent comme des éléments clés de l'écosystème 6G. En effet, les HAPS introduisent une nouvelle couche dans l'architecture réseau, se positionnant en hauteur par rapport aux stations terrestres. Positionnés dans la stratosphère entre 17 km et 25 km, ces plateformes peuvent fournir une couverture étendue, flexible et ciblée, même dans les zones difficiles d'accès, comme les déserts, les océans, ou les régions sinistrées (Kaur & Khan, 2022; Jiang *et al.*, 2021). Leur rôle dans les architectures verticales de la 6G (terrestre et non-terrestre) est central, en complémentarité avec les satellites et les stations de base terrestres.

De leur côté, en permettant un contrôle passif et intelligent de l'environnement électromagnétique, les RIS offrent une solution prometteuse pour améliorer la couverture et la fiabilité des communications sans avoir à augmenter la densité d'antennes ou la puissance d'émission. Elles transforment les obstacles en opportunités de propagation, ce qui s'aligne parfaitement avec la vision d'un réseau 6G éco-responsable et omniprésent (Kaur & Khan, 2022; Shafi *et al.*, 2024).

Ainsi, ces deux technologies, HAPS et RIS, constituent des fondations sur lesquelles reposera une grande partie des ambitions de la 6G. Dans ce qui suit, nous explorerons plus en détail leur fonctionnement, leur potentiel, et les défis liés à leur intégration dans les futurs réseaux mobiles.

1.3 Plateformes aériennes à haute altitude

1.3.1 Définition et fonctionnement

Les plateformes à haute altitude, appelées HAPS, sont des dispositifs autonomes qui évoluent dans la stratosphère à une altitude avoisinant les 20 km, où elles servent de relais de communication à large couverture (Tozer & Grace, 2001; Belmekki *et al.*, 2024). Ces nœuds de réseau quasi-stationnaires offrent une connectivité omniprésente et suscitent un regain d'intérêt grâce aux récents progrès technologiques (Tozer & Grace, 2001; Kurt *et al.*, 2021). Ces avancées comprennent des améliorations au niveau du rendement des panneaux solaires, des batteries à plus haute densité, des matériaux légers, des systèmes avioniques autonomes et des antennes de communication. Tout ceci fait du HAPS une solution viable pour combler le fossé en matière de connectivité entre les systèmes terrestres et satellitaires (Kurt *et al.*, 2021; Belmekki *et al.*, 2024).

Selon (Anicho, Charlesworth, Baicher, Nagar & Buckley, 2019), les systèmes de communication HAPS comprennent des composants non-terrestres et terrestres. Le segment non-terrestre comprend des sous-systèmes embarqués pour le contrôle de vol, la gestion de l'énergie et la charge utile de communication, ainsi que des connexions potentielles avec d'autres HAPS ou satellites. Le segment terrestre comprend, pour sa part, une station de contrôle, une passerelle de communication et des réseaux terrestres comprenant des stations de base et des équipements utilisateurs (Voir figure 1.2).

(Hoshino, Sudo & Ohta, 2019) montre que les HAPS peuvent fonctionner comme une entité intelligente à grande échelle, facilitant une communication rapide et efficace entre les satellites et réduisant le besoin de stations relais au sol. De plus, les HAPS offrent des avantages par rapport aux communications par satellite, tels que leur positionnement à plus basse altitude qui garantit une couverture plus ciblée et une latence plus faible, ainsi qu'une capacité accrue pour prendre en charge des débits de données élevés grâce à l'utilisation de technologies avancées telles que le Massive MIMO et le SDMA, ce qui les rend indispensables pour les réseaux sans fil de nouvelle

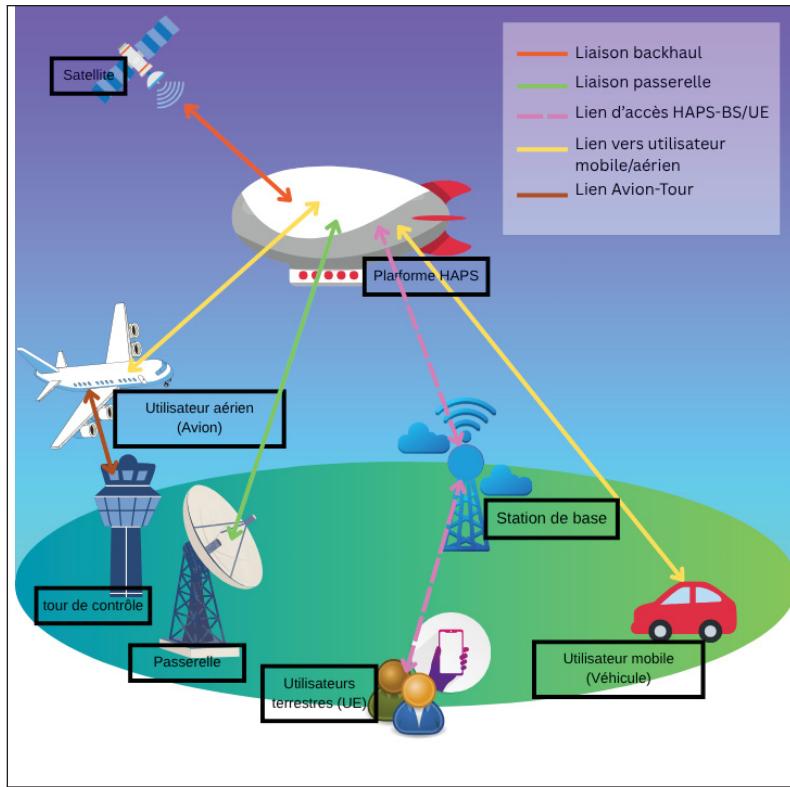


Figure 1.2 Exemple de réseau de communication assisté par HAPS : Le HAPS peut établir des liens avec le satellite, la station de base terrestre, les antennes relais, et les utilisateurs finaux (terrestres ou aériens)

génération en tant qu'alternative convaincante à la densification des réseaux terrestres, comme indiqué (Kurt *et al.*, 2021)

Les HAPS peuvent être classés en deux grandes familles : les plateformes aérostatisques (comme les dirigeables ou les ballons) et les plateformes aérodynamiques (principalement les drones à voilure fixe) (Belmekki *et al.*, 2024). Chaque catégorie présente des spécificités en termes de durée de vol, d'altitude de fonctionnement, de stabilité et de capacité de charge utile.

D'après (Burns, Johnson, Jung & Fladeland, 2023), parmi les solutions aérostatisques, on retrouve le Stratobus de Thales Alenia Space, un dirigeable autonome capable d'effectuer des missions de surveillance et de communication. Sceye, soutenu par SoftBank, développe également une plateforme stratosphérique rigide conçue pour fournir de la connectivité dans des zones à faible

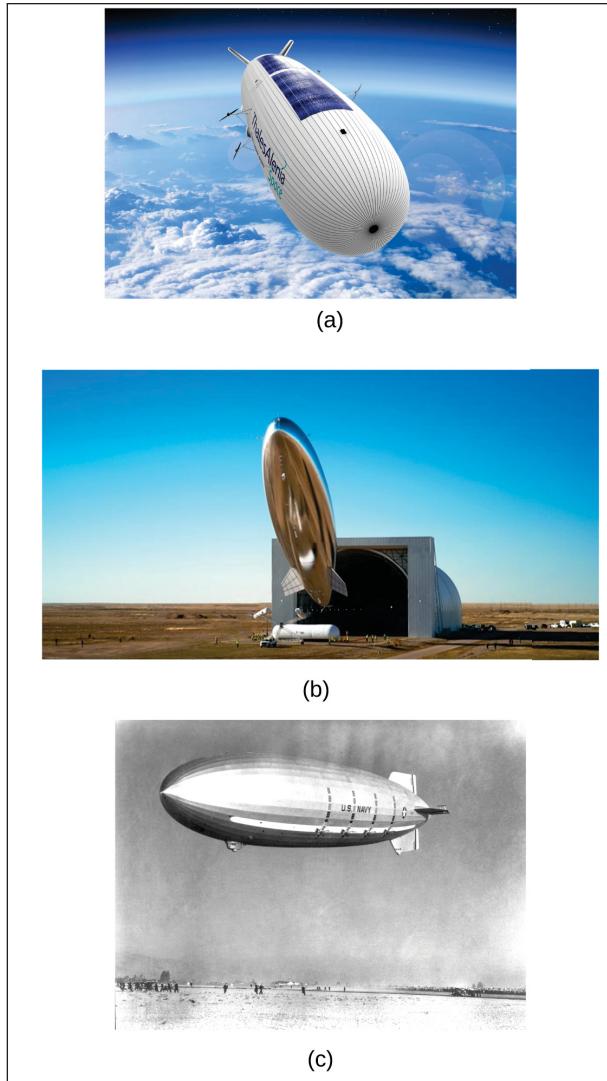


Figure 1.3 Exemples de plateformes HAPS aérostatisques : (a) Stratobus (Thales Alenia Space) (Thales Alenia Space, 2024), (b) Sceye HAPS (SoftBank) (SoftBank Group Corp., 2025), (c) Dirigeables historiques de la NASA (ARC-1993-A83-0499-24) (NASA, 1993)

couverture. À cela s'ajoutent des projets de dirigeables historiques développés par la NASA comme illustré dans la figure 1.3.

Dans la catégorie aérodynamique, le Zephyr, développé par Airbus, est un drone solaire à voilure fixe capable de voler à très haute altitude (20 km) pendant plusieurs semaines (Burns *et al.*, 2023). De son côté, le Sunglider, développé par HAPSMobile (filiale de SoftBank) en collaboration

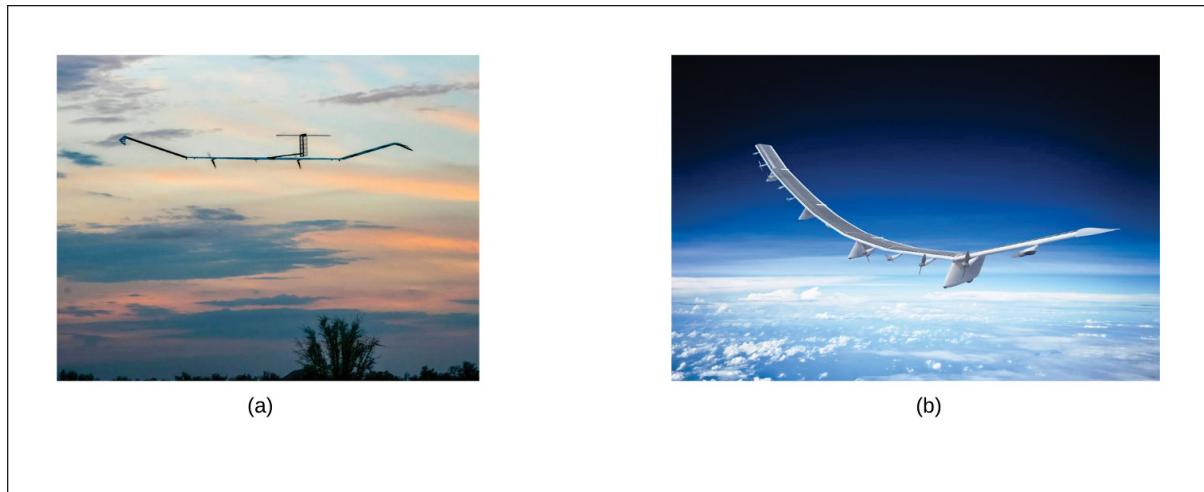


Figure 1.4 Exemples de plateformes HAPS aérodynamiques : (a) Zephyr (Airbus) (Airbus, 2024), (b) Sunglider (HAPSMobile) (InceptiveMind, 2020)

avec AeroVironment, vise à assurer une connectivité stratosphérique continue dans les zones éloignées (Voir figure 1.4).



Figure 1.5 Exemple de ballons stratosphériques : KSC-2013-3113 (NASA) Adaptée de (NASA, 2013)

Enfin, les ballons stratosphériques, comme le modèle KSC-2013-3113 de la NASA (Voir figure 1.5), sont utilisés pour les expériences atmosphériques et les missions de communication à court terme.

Selon l'étude (Belmekki, Trichili, Ooi & Alouini, 2023), il est démontré que le marché mondial des HAPS pourrait atteindre près de 4 milliards de dollars, couvrant la fabrication pour les services de communication et de la télédétection. Des régions telles que l'Amérique latine, le Moyen-Orient et l'Afrique connaissent une croissance rapide du nombre d'unités HAPS en service, reflétant un engouement vers cette alternative dans les zones où les infrastructures terrestres sont rares.

1.3.2 Modélisation des communications assistées par HAPS

Dans le cadre des réseaux 6G, il devient primordial de modéliser avec précision les canaux de communication impliquant des HAPS, en particulier pour optimiser la couverture, anticiper les pertes de signal et garantir une QoS stable.

Communications HAPS-HAPS

Les auteurs de (Yilmaz, Yilmaz, Kalem & Durmaz, 2023) proposent un modèle analytique décrivant le comportement du canal pour les communications en ligne de vue (LoS) entre deux plateformes HAPS évoluant dans la stratosphère. L'un des éléments fondamentaux de ce modèle est le gain du lien (*path gain*), qui permet de quantifier l'atténuation du signal en fonction de la distance et des paramètres du système. Il est exprimé comme suit :

$$\frac{P_{Rx}}{P_{Tx}} = \left(\frac{\lambda}{4\pi l_{LoS}} \right)^2 G_{Tx} G_{Rx} L_{Atm} \cdot PLF, \quad (1.1)$$

où P_{Rx} est la puissance reçue, P_{Tx} est la puissance transmise, λ est la longueur d'onde, l_{LoS} est la distance entre les deux plateformes HAPS (en visibilité directe), G_{Tx} et G_{Rx} sont respectivement les gains d'antenne à l'émission et à la réception, L_{Atm} est l'atténuation liée à l'atmosphère,

et PLF (Path Loss Factor) désigne un facteur d'ajustement qui tient compte de conditions spécifiques tels que la pluie ou la réfraction.

Éq.(1.1) permet de prédire la dégradation du signal en fonction de la distance et des conditions environnementales. En utilisant la formule de Shannon, la capacité du lien peut être estimée par

$$C_{HH} = BW_{HH} \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_{\text{Rx}}}{N_0 \cdot BW_{HH}} \right), \quad (1.2)$$

où C_{HH} est la capacité du canal (en bits par seconde), BW_{HH} est la bande passante allouée pour la communications HAPS-HAPS, et N_0 est la densité spectrale unitaire de bruit (par Hz).

Communication HAPS-utilisateur

Pour la communication entre un HAPS et un utilisateur terrestre ou aérien en très basse altitude, le modèle de communication HAPS-utilisateur suit le modèle à champ libre (free-space) adapté aux scénarios de visibilité directe (Line-of-Sight -LoS) et indirecte (Non Line-of-Sight -NLoS). Le gain de lien de communication est modélisé avec l'équation

$$G_n^H = G \left(\frac{4\pi d_n^H f_c}{c} \right)^2 |(h_n^H)|^2, \quad (1.3)$$

où d_n^H est la distance entre l'utilisateur n et le HAPS, f_c est la fréquence porteuse, et $c = 3 \cdot 10^8$ (m/sec) est la vitesse de la lumière dans le vide. G est le gain de l'antenne directionnelle, et h_n^H est le coefficient d'évanouissement à petite échelle correspondant à l'évanouissement de Rice qui tient compte des composantes LoS et NLoS. Enfin, le débit de transmission correspondant, dénoté R_n^H , est donné par

$$R_n^H = b_n^H B_{max} \log_2 \left(1 + \frac{p_n^H P_{max} G_n^H}{b_n^H B_{max} N_0} \right), \quad (1.4)$$

où $b_n \in [0, 1]$ est la fraction de bande passante allouée à la communication entre le HAPS et l'utilisateur n , B_{max} est la bande passante totale, p_n^H est la fraction de puissance d'émission du

HAPS pour le signal destiné à l'utilisateur n , P_{max} est la puissance maximale du HAPS, et N_0 est la densité spectrale unitaire du bruit.

Communication utilisateur–RIS–HAPS

La modélisation de la liaison montante entre un utilisateur et une plateforme HAPS à travers un RIS est décrite dans Konishi, Nishimaki, Shibata, Nabatame & Nagate (2020). Le signal reçu au HAPS peut s'écrire :

$$y_1 = \left[\sum_{n=1}^N \alpha_n e^{j\phi_n} \beta_n \right] x_s + z_1 \quad (1.5)$$

où x_s est le signal transmis par l'utilisateur, ϕ_n la phase appliquée par le n -ième élément du RIS, et α et β les gains de canal respectivement pour les liens source–RIS et RIS–HAPS. Ces coefficients s'expriment comme :

$$\alpha_n = d_{SR}^{-\frac{\sigma}{2}} g_n e^{-j\psi_n}, \beta_n = d_{RH}^{-\frac{\sigma}{2}} v_n e^{-j\vartheta_n} \quad (1.6)$$

où d_{SR} et d_{RH} représentent les distances correspondantes, σ l'exposant de pertes de trajet, g_n et v_n les variables aléatoires suivant respectivement des lois de Rayleigh et de Rice, et z_1 le bruit AWGN de puissance N_0 .

Lorsque les phases sont choisies de manière optimale ($\phi_n = \psi_n + \vartheta_n$), le signal reçu se simplifie en :

$$y_1 = \sqrt{P_s} \left[\sum_{n=1}^N g_n v_n \right] x_s + z_1 \quad (1.7)$$

où P_s est la puissance d'émission de l'utilisateur. Ainsi, le SNR instantané au HAPS est donné par :

$$\gamma_1 = \frac{\left(\sum_{n=1}^N g_n v_n \right)^2 P_s}{N_0 (d_{SR} d_{RH})^\sigma} \quad (1.8)$$

Ce modèle met en évidence que la performance en liaison montante est directement limitée par la puissance d'émission restreinte de l'utilisateur, ce qui rend l'optimisation des phases RIS indispensable pour améliorer la qualité de réception au HAPS Konishi *et al.* (2020).

1.4 Surfaces intelligentes reconfigurables

Les RIS désignent une nouvelle classe de dispositifs capables d'interagir avec les signaux électromagnétiques pour améliorer la performance des systèmes de communication sans fil, souvent désignées sous différents noms tels que Intelligent Reflecting Surfaces (IRS), Reflective Intelligent Surfaces (RIS), ou Large Intelligent Surfaces (LIS) (Liu *et al.*, 2021; Di Renzo *et al.*, 2020).

Les LIS représentent une avancée par rapport à la technologie MIMO (multiple-input-multiple-output) massive conventionnelle. Elles se caractérisent par des surfaces actives dotées d'éléments d'antenne individuels équipés de chaînes radiofréquence (RF) dédiées, d'amplificateurs de puissance et de capacités de traitement du signal. Il est à noter que chaque élément possède une chaîne RF complète et une unité de bande de base indépendante, ce qui constitue une avancée significative dans le domaine des antennes actives. À l'opposé, les RIS ou IRS fonctionnent comme des réflecteurs passifs, composées d'éléments individuels réglables avec des réponses de phase ajustables pour l'orientation et la focalisation du faisceau électromagnétique (Liu *et al.*, 2021; Di Renzo *et al.*, 2020).

1.4.1 Évolution historique

L'évolution des surfaces reconfigurables s'est étroitement liée à la progression des métamatériaux et des métasurfaces, illustrant un continuum d'innovation qui a considérablement influencé le paysage de la manipulation des ondes électromagnétiques et de l'optimisation des systèmes. Plus spécifiquement, elle se décline selon le cheminement suivant (Liu *et al.*, 2021) :

- **Métamatériaux :** Le développement des RIS remonte au concept des métamatériaux, qui sont des matériaux artificiels conçus pour présenter des propriétés que l'on ne trouve pas

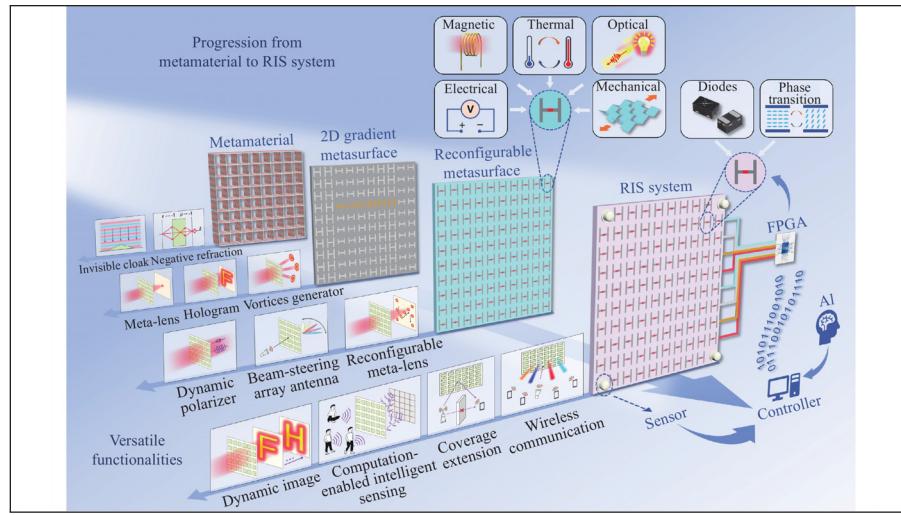


Figure 1.6 Développement de métamatériaux, de métasurfaces, de métasurfaces reconfigurables et de métasurfaces intelligentes reconfigurables (RIS)
Adaptée de (Feng *et al.*, 2023, p. 2)

dans les matériaux naturels, ouvrant la voie à la manipulation des ondes électromagnétiques de manière non-conventionnelle.

- **Métasurfaces :** Les métasurfaces, qui sont des versions bidimensionnelles ultramince des métamatériaux, permettent de transformer des surfaces ordinaires en éléments actifs capables de modifier dynamiquement la direction, la phase ou l'amplitude des ondes qui les traversent ou les rencontrent. En intégrant divers matériaux ou éléments accordables dans la conception des métasurfaces, des métasurfaces reconfigurables et des méta-dispositifs associés, dont les fonctionnalités sont contrôlées par des stimuli externes, ont été réalisés.
- **Métasurfaces reconfigurables :** Les métasurfaces reconfigurables ont été développées en intégrant des matériaux ou des composants accordables pouvant être activement contrôlés par des stimuli externes. L'idée principale pour la réalisation des métasurfaces reconfigurables consiste en la co-conception des composants accordables et des structures résonnantes, où une variation des réglages externes entraîne une modification des composants accordables et, par conséquent, du comportement électromagnétique global des méta-atomes. Divers signaux de commande sont appliqués afin de former des métasurfaces inhomogènes présentant des profils de phase spécifiques, permettant ainsi des fonctionnalités de sortie reconfigurables.

- **Surfaces intelligentes reconfigurables (RIS) :** S'appuyant sur le concept des métasurfaces reconfigurables, Les surfaces intelligentes reconfigurables, connues sous l'acronyme RIS, sont des technologies émergentes capables de manipuler la propagation des ondes radio grâce à des éléments passifs ajustables. En modifiant dynamiquement la phase ou l'amplitude des signaux incident, ces surfaces permettent d'optimiser la direction du faisceau, d'améliorer la couverture, et de renforcer la QoS sans nécessiter d'émission active.

1.4.2 Classification des RIS

En examinant leurs structures, les RIS peuvent être mis en œuvre à l'aide de technologies basées sur les métamatériaux ou sur les réseaux de patchs. Les RIS basés sur les métamatériaux sont communément appelés métasurfaces d'après (Liu *et al.*, 2021). Positionnés à divers endroits, les RIS peuvent être spécialement conçus pour fonctionner comme des surfaces réfléchissantes ou réfractives entre la station de base (BS) et l'utilisateur, ou comme des surfaces de guidage d'ondes fonctionnant au niveau de la BS. Les RIS peuvent subir une reconfiguration électrique, mécanique ou thermique. Les RIS se répartissent en plusieurs catégories, telles que passives avec pertes, passives sans pertes ou actives, selon leurs profils énergétiques. Cette classification est illustrée dans le tableau 1.2 ci-dessous.

Tableau 1.2 Différents types de métasurfaces

RIS	Structure	Basé sur les métamatériaux Basé sur des réseaux de patchs
	Source d'alimentation	RIS réfléchissant/réfractant Guide d'ondes RIS
	Consommation d'énergie	Étirement mécanique Excitation électrique Excitation thermique
	Mécanismes de réglage	Passif avec perte
		Passif sans perte
		Actif

Selon (Das *et al.*, 2023), les RIS passifs sans perte ne consomment aucune énergie, tandis que les RIS passifs avec perte consomment de l'énergie mais ne comportent aucun composant actif. Les RIS actifs, en revanche, comportent des composants actifs (tels que les antennes ou chaînes RF) qui consomment de l'énergie et peuvent être utilisés pour amplifier ou moduler le signal incident.

1.4.3 Fonctionnement

Dans l'ensemble, le RIS agit comme une surface intelligente capable de contrôler dynamiquement l'environnement de propagation radio, avec des fonctions de réflexion, réfraction ou absorption du signal, améliorant ainsi les performances des systèmes de communication sans fil (Voir figure 1.7 pour illustration de comparatif avec des technologies conventionnelles).

Un RIS se compose de nombreux composants passifs, stratégiquement configurés pour moduler le déphasage de chaque élément réfléchissant. Cette capacité de reconfiguration distingue les RIS des méthodes de relais conventionnelles telles que decode-and-forward (DF) et amplify-and-forward (AF), ce qui se traduit par un système plus écologique et plus économique en énergie.

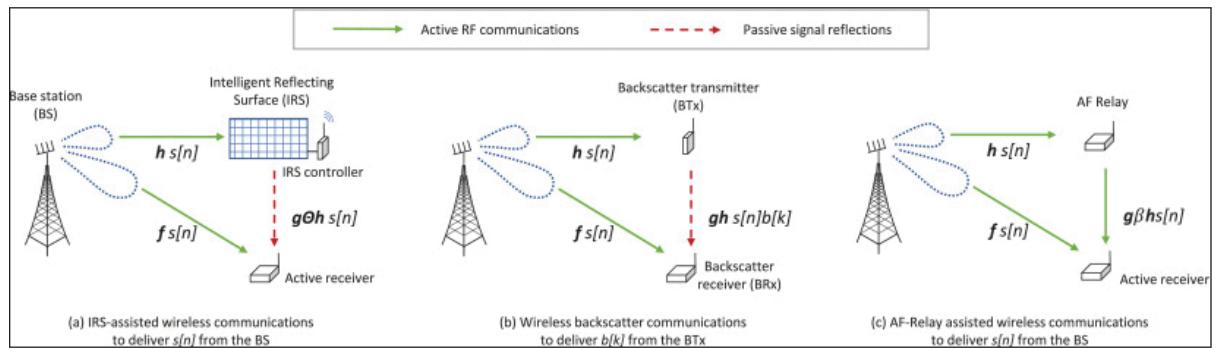


Figure 1.7 (a) Communication sans fil assistée par RIS/IRS vs. (b) Communication par rétrodiffusion vs. (c) Communication assistée par relai AF
Adaptée de (Gong *et al.*, 2020, p. 2)

D'un point de vue stratégique, le RIS peut être configuré pour réfléchir les ondes électromagnétiques incidentes dans des directions spécifiques, améliorant ainsi la puissance du signal et minimisant les interférences. De plus, il peut réfracter les ondes incidentes pour les concentrer sur des zones

ciblées ou les diriger dans des directions particulières. En outre, le RIS peut absorber les ondes incidentes, atténuant ainsi les interférences et améliorant la qualité du signal (Voir figure 1.8).

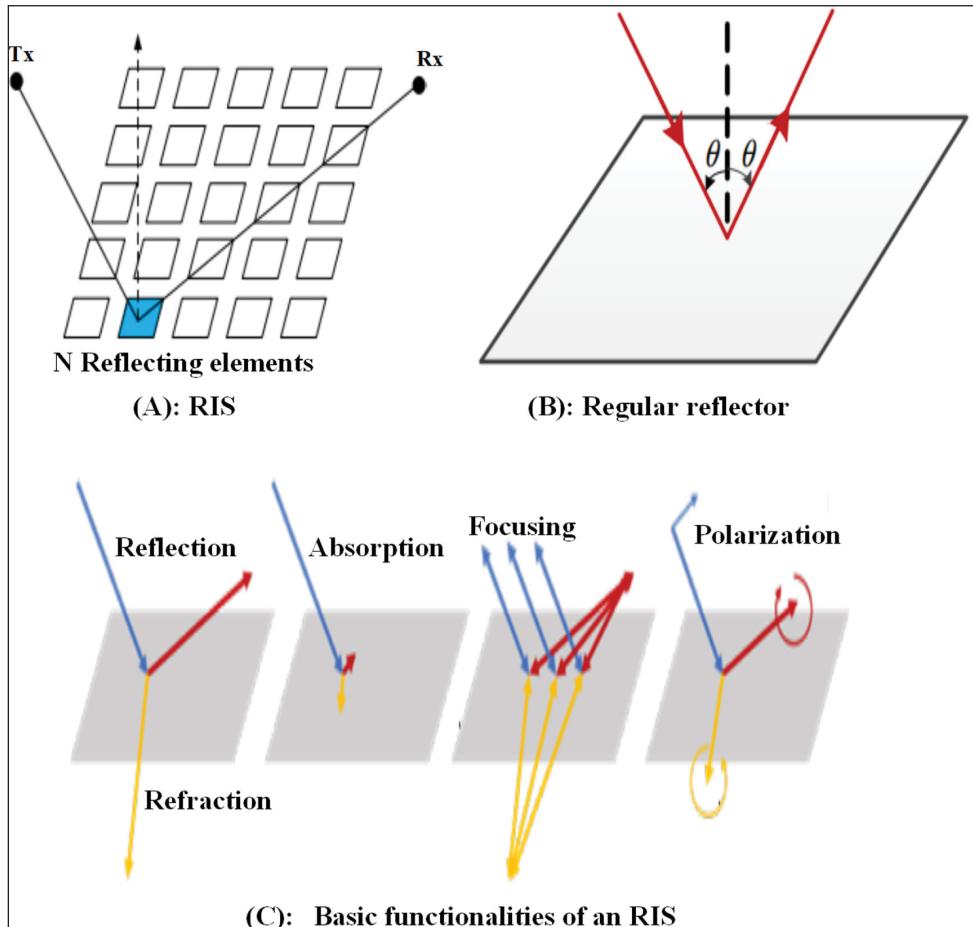


Figure 1.8 Principe de fonctionnement du RIS
 Adaptée de (Das *et al.*, 2023, p. 8)

1.4.4 Modélisation des communications assistées par RIS

La modélisation des liens de communication via RIS repose sur la représentation du canal réfléchi, le contrôle des déphasages des éléments, et le calcul des performances résultantes telles que le rapport signal-à-bruit (Signal-to-Noise Ratio -SNR) ou le débit de transmission.

Pour mieux comprendre la manière dont une communication via RIS est modélisée, nous présentons ici un cadre analytique issu de (Zhang, Yang, Wang & Zhang, 2022), qui illustre

clairement les expressions typiques utilisées dans la littérature pour une transmission entre une station de base (Base Station -BS) et un utilisateur via un RIS de taille N éléments, dans un environnement où le lien directe entre la BS et l'utilisateur est absent (bloqué).

Pour le lien BS-utilisateur assité par RIS, le signal reçu peut s'écrire comme

$$y_I = \sqrt{P_t} \mathbf{g}^T \mathbf{\Phi} \mathbf{h}_I x_I + w_I, \quad (1.9)$$

où $\mathbf{g}^T = [g_1, \dots, g_N]^T$ (de taille $1 \times N$) et $\mathbf{h}_I = [h_{I,1}, \dots, h_{I,N}]$ (de taille $N \times 1$) désignent respectivement les vecteurs des coefficients des canaux BS-RIS et RIS-utilisateur. $\mathbf{\Phi} = \text{diag}(\phi_1, \dots, \phi_N)$ est la matrice diagonale des déphasages des éléments du RIS, et w_I est le bruit additif Gaussien. Le SNR correspondant s'écrit alors

$$\gamma_0 = \frac{P_t}{N_0} \left| \sum_{n=1}^N g_n h_{I,n} e^{j\phi_n} \right|^2, \quad (1.10)$$

où N_0 est la densité du bruit. Étant donné que les auteurs de (Zhang *et al.*, 2022) supposent un canal à évanouissement par blocs qui consiste en une perte de trajet dépendante de la distance et un évanouissement à petite échelle, on considère que $g_n = g'_n d_{SR}^{-\alpha/2}$ et $h_{I,n} = h'_{I,n} d_0^{-\alpha/2}$, où $g'_n \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ et $h'_{I,n} \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ représentent les coefficients de fading de Rayleigh à petite échelle, respectivement, $\forall n \in \{1, \dots, N\}$, avec d_{SR} la distance entre BS et RIS et d_0 la distance entre le RIS et l'utilisateur. Enfin, α est l'exposant de perte de propagation.

En choisissant les phases ϕ_n de manière à aligner constructivement les signaux au RIS, on obtient un SNR maximal

$$\gamma_0 = \frac{P_t}{N_0} d_{SR}^{-\alpha} d_0^{-\alpha} \left(\sum_{n=1}^N |g'_n| \cdot |h'_{I,n}| \right)^2. \quad (1.11)$$

Enfin, le débit résultant est donné par

$$R_0 = \log_2(1 + \gamma_0). \quad (1.12)$$

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'évolution des générations de réseaux mobiles, en mettant l'accent sur les limites de la 5G et la nécessité de passer à la 6G. Nous avons identifié les principaux objectifs et technologies qui dessinent cette nouvelle génération, notamment les HAPS et les RIS, qui permettent de réinventer l'environnement de propagation des signaux. Une attention particulière a été accordée aux plateformes HAPS, qui représentent une solution prometteuse pour offrir une connectivité étendue, flexible et adaptée aux contraintes géographiques et logistiques. Le prochain chapitre sera consacré à l'état de l'art détaillant les travaux sur les communications HAPS, les communications assistées par RIS, ainsi que les possibilités d'intégration entre HAPS et RIS dans la littérature.

CHAPITRE 2

ÉTAT DE L'ART

Dans le contexte de l'évolution vers les réseaux 6G, les plateformes à haute altitude (HAPS) et les surfaces intelligentes reconfigurables (RIS) émergent comme des technologies fondamentales pour répondre aux défis de couverture, de fiabilité et de capacité des futurs réseaux sans fil.

Ce chapitre présente une revue de littérature approfondie sur les travaux récents concernant ces deux technologies, en mettant l'accent sur leurs principes, leurs architectures et leur intégration potentielle dans des scénarios de communication avancés.

2.1 Revue de littérature sur les communications HAPS : La liaison descendante

Plusieurs se sont intéressés à l'analyse et l'optimisation de la communication entre HAPS et utilisateurs terrestres. Par exemple, les auteurs de (Acharya, Abhilash, Ghosh & Chandra, 2024) ont évalué la fiabilité du lien backhaul entre des BSs terrestres et le HAPS, c-à-d la probabilité qu'un utilisateur atteigne un certain débit. Pour cela, ils ont fait appel à la géométrie stochastique (pour modéliser la répartition aléatoire des BSs) et le modèle 3D VHNet du 3GPP, afin de dériver des expressions exactes de la probabilité de couverture, puis ils ont validé les résultats obtenus par ces expressions par simulation Monte Carlo. Cependant, l'étude se limite à un scénario statique rural, intégrant un seul HAPS, et sans variation réelle du trafic.

Dans (Harinitha, Zakia, Kurniawan *et al.*, 2022), les auteurs visait à résoudre le problème du placement optimal d'un HAPS opérant dans la bande des fréquences millimétrique pour maximiser la somme des débits vers les utilisateurs (en liaison descendante) sous contraintes de capacité backhaul limitée et de QoS. La méthode proposée consiste en une recherche exhaustive de position du HAPS sur une grille $100 \times 100 \text{ km}^2$, avec allocation uniforme de puissance aux utilisateurs. Cette démarche a permis d'identifier la meilleure position géographique du HAPS pour un service donné. En revanche, la recherche exhaustive est très coûteuse en calcul, suppose des utilisateurs stationnaires, et une puissance uniforme sous-optimale.

Dans (Jang & Choi, 2025), l'impact de l'angle d'élévation sur l'atténuation du lien descendant (downlink) HAPS–utilisateur est étudié. Les auteurs ont formulé un modèle basé sur l'expression du SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio), puis mené une analyse ergodique de la capacité et de la probabilité de couverture, en utilisant un processus Poisson par point (PPP) pour décrire la distribution des utilisateurs. Cette approche a permis d'ajuster l'altitude du HAPS pour optimiser simultanément la couverture et la capacité du lien descendant.

Faisant appel aux RIS avec les HAPS, (Alfattani, Jaafar, Hmamouche, Yanikomeroglu & Yongaçoglu, 2021) ont examiné le bilan de liaison des communications descendantes assistées par un HAPS équipé de RIS. En s'appuyant sur des modèles de canal issues de l'optique géométrique et de la théorie de la diffusion, et en respectant les recommandations de 3GPP, ils ont quantifié et comparé les gains de liens offerts par différents scénarios impliquant des plateformes aériennes.

Dans la même logique, (Shaik *et al.*, 2024) ont évalué les performances en liaison descendante d'un système intégré satellite–HAPS–sol en comparant les performances de communications dans deux scénarios différents, le premier avec RIS embarqué sur une plateforme aérienne, et le second avec RIS déployé au niveau du sol. Ils ont dérivé des expressions fermées de la probabilité de coupure (outage probability) et du débit ergodique (ergodic rate) sous divers modèles d'atténuation du canal (shadowed Rician, Rician, Nakagami- m , etc.), puis ont analysé le taux d'erreur moyen symbolique (Average Symbol Error Rate -ASER) pour différents schémas de modulation QAM (Quadrature Amplitude Modulation). Cette étude présente des limites puisqu'une connaissance parfaite du canal (Channel State Information -CSI) est considérée, ainsi qu'un lien point-à-point statique.

Le Tableau 2.1 ci-dessous présente une synthèse des principales études réalisées, en détaillant le problème visé, la méthodologie employée et les limites clés.

2.2 Revue de littérature sur les communications HAPS : La liaison montante

Très peu de travaux se sont intéressés à l'analyse et l'optimisation de la liaison montante entre utilisateurs au sol et le HAPS. PArmi eux, (Konishi *et al.*, 2020) ont étudié la partage de

Tableau 2.1 Synthèse des travaux en liaison descendante pour HAPS

Référence	Problème visé	Méthodologie et atouts	Limites clés
(Acharya <i>et al.</i> , 2024)	Fiabilité (Probabilité de couverture) d'un lien backhaul BSs vers HAPS en environnement rural	Combinaison de géométrie stochastique et du modèle 3D VHNet 3GPP, validées par simulations Monte Carlo.	Scénario rural statique, partition spectrale fixe, backhaul à deux sauts, pas de coordination multi-HAPS ni support de trafic dynamique.
(Harinitha <i>et al.</i> , 2022)	Placement optimal d'un HAPS opérant en ondes millimétriques pour maximiser la somme des débits en lien descendant	Recherche exhaustive sur une zone de $100 \times 100 \text{ km}^2$ avec allocation uniforme de puissance, identification de la meilleure position du HAPS.	Méthode très coûteuse en calcul, utilisateurs immobiles, puissance uniforme sous-optimale, variations atmosphériques ignorées.
(Jang & Choi, 2025)	Réduction de l'atténuation du lien (path-loss) liée à l'angle d'élévation pour optimiser la capacité descendante	Analyse ergodique de la capacité et de la probabilité de couverture pour une distribution des utilisateurs.	Position horizontale du HAPS fixée, pas de scénarios multi-HAPS, trafic statique.
(Alfattani <i>et al.</i> , 2021)	Bilan de liaison des communications assistées par plateformes aériennes équipées de RIS	Formules analytiques issues de l'optique géométrique et de la théorie de la diffusion, sous le cadre des modèles de canal 3GPP	Étude théorique, sans validation terrain, pertes réelles et erreurs de phase non prises en compte.
(Shaik <i>et al.</i> , 2024)	Performances de la liaison descendante assistée par un RIS aérien ou un RIS terrestre dans un système intégré satellite-HAPS-sol	Dérivation des expressions fermées de la probabilité de coupure et du débit ergodique, analyse du ASER pour différentes modulations.	CSI parfait et RIS idéalisé, lien point-à-point statique, pas de support d'utilisateurs multiple.

spectre co-canal entre un HAPS et des BSs LTE/5G terrestres. Leur objectif était de quantifier la puissance d'interférence issue des terminaux utilisateurs (UEs) vers un HAPS à 20 km d'altitude, afin de déterminer les distances minimales ou configurations de partage garantissant une réception viable au HAPS. Pour cela, ils ont combinés des mesures aéroportées à 2 GHz en milieux urbain

et rural avec des tests en laboratoire caractérisant les émissions réelles des UEs, puis ils ont évalué empiriquement les niveaux d’interférence en scénario extrême. Cependant, leur approche reste purement empirique puisqu’aucun algorithme adaptatif d’évitement d’interférences n’est proposé, et les mesures se sont limitées à une seule zone géographique et à des modèles de UEs particuliers.

Dans (Odeyemi, Owolawi & Olakanmi, 2022), les auteurs ont proposé une analyse de performance pour un système de communication intégrant un HAPS relai opérant avec le protocole amplify-and-forward (AF), un RIS, et plusieurs utilisateurs. Leur objectif est de dériver des expressions fermées pour la probabilité de coupure (outage probability), le taux d’erreur binaire (Bit Error Rate -BER) moyen et la capacité ergodique dans la chaîne de communications BS → RIS → HAPS → UE. Ils ont modélisé les liaisons RIS → HAPS et HAPS → UE par des distributions d’évanouissement K-généralisé (Generalized-K distribution) et Rician ombragé (Shadowed-Rician), puis ont utilisé des fonctions spéciales pour obtenir les statistiques du SNR de bout-en-bout, validées par simulation Monte Carlo. Toutefois, seul le relai AF est considéré, le CSI est supposé parfait, et la topologie statique.

Enfin, (Zhou, Meng & Wang, 2023) ont examiné l’impact de l’échelle des réseaux MIMO embarqués sur l’efficacité spectrale (Spectral Efficiency -SE) du lien montant lorsque le HAPS agit en tant que BS aérienne. Leur objectif était de comparer trois configurations : Une antenne unique, une antenne MIMO 2×2 et 2×4 , et une antenne MIMO 4×4 et 4×8 , en s’appuyant sur les modèles d’antenne ITU-R M.2101. À l’aide de simulations Monte Carlo, ils ont générés les fonctions de distribution cumulatives (Cumulative Distribution Function -CDF) et moyennes de SE pour chaque configuration.

Le Tableau 2.2 ci-dessous présente une synthèse des principales études réalisées, en détaillant le problème visé, la méthodologie employée et leurs limites clés.

Tableau 2.2 Synthèse des travaux en liaison montante pour HAPS

Référence	Problème visé	Méthodologie	Limites clés
(Konishi <i>et al.</i> , 2020)	Mesurer l'interférence UE → HAPS	Mesures aéroportées à la fréquence 2 GHz + tests UE en laboratoire	Pas d'algorithme adaptatif, cas de zone particulière, trafic statique.
(Odeyemi <i>et al.</i> , 2022)	Probabilité de panne/BER/capacité ergodique, pour système avec RIS et HAPS relai	Modèle de relayage AF à deux sauts avec modèles de canaux généralisé-K et Rician ombragé, validation par simulations Monte Carlo	AF seulement, CSI parfait, pas de modélisation de la consommation d'énergie.
(Zhou <i>et al.</i> , 2023)	SE du lien montant en utilisant des antennes MIMO	Simulations réalisées avec modèles d'antennes ITU-R M.2101	Aucune optimisation du système.

2.3 Différences et enjeux entre la liaison montante et la liaison descendante

La distinction entre la liaison montante (uplink) et la liaison descendante (downlink) est fondamentale dans la conception et l'optimisation des réseaux HAPS-terrestres.

Sur le plan **fonctionnel**, la liaison montante correspond à la transmission des signaux des utilisateurs vers la station de base ou la plateforme HAPS, tandis que la liaison descendante correspond à la transmission inverse, de la plateforme vers les utilisateurs. Cette différence entraîne des contraintes technologiques spécifiques. Dans la liaison montante, la puissance d'émission des terminaux est fortement limitée par la capacité des batteries et la faible puissance des modules RF, ce qui rend le signal reçu au HAPS plus faible et plus sensible au bruit. À l'inverse, dans le downlink, la puissance disponible au niveau du HAPS est plus importante, ce qui confère une meilleure marge de SNR et facilite la couverture des utilisateurs Khalaf & Zekavat (2007); Tabassum, Ali, Hossain, Hossain & Kim (2017).

En matière de **gestion des interférences**, l'uplink est affecté par les émissions simultanées de plusieurs utilisateurs, ce qui provoque des interférences multi-utilisateurs et des pertes

d'orthogonalité, particulièrement marquées dans des schémas comme le MC-CDMA Khalaf & Zekavat (2007); Tabassum *et al.* (2017). À l'inverse, dans la liaison descendante, les interférences proviennent principalement de la forte puissance de transmission et du recouvrement des faisceaux. Dans les systèmes NOMA, la complexité d'implémentation diffère également : l'annulation successive des interférences est plus aisée au niveau de la station de base en uplink, alors qu'elle est plus délicate côté utilisateurs en liaison descendante Tabassum *et al.* (2017). De plus, en localisation 5G mmWave, l'uplink est sensible à l'orientation de l'équipement utilisateur, contrairement à la liaison descendante qui bénéficie d'une plus grande stabilité Abu-Shaban, Zhou, Abhayapala, Seco-Granados & Wymeersch (2018). Enfin, dans les réseaux Full Duplex, la liaison descendante est avantagé par une meilleure performance globale, tandis que la liaison montante souffre fortement des interférences résiduelles générées par les transmissions descendantes simultanées Kundu, Pal, Kumar & Sreejith (2020).

En termes de recherche universitaire, et comme le prouvent les travaux étudiés précédemment, il existe historiquement davantage de littérature sur le côté descendant. Ce déséquilibre peut s'expliquer par plusieurs raisons : la consommation de données (streaming, cloud gaming, vidéos) est l'utilisation dominante dans les réseaux 5G/6G, ce qui a favorisé l'optimisation de la liaison descendante, la modélisation est plus simple, car un seul émetteur (HAPS ou station de base) dessert plusieurs utilisateurs, ce qui permet d'obtenir des performances idéales, telles que le seuil d'erreur zéro dans le MC-CDMA. Les technologies de beamforming, de précodage et d'intégration RIS ont d'abord été développées pour la liaison descendante avant d'être adaptées à la liaison montante et les expériences industrielles (Softbank, Airbus, Sceye) se sont concentrées sur la fourniture de services en aval (connectivité Internet, télévision, IoT) plutôt que sur la collecte de données en amont Khalaf & Zekavat (2007); Kurt *et al.* (2021).

Néanmoins, un focus sur la liaison montante est aujourd'hui crucial. D'une part, il présente des défis intrinsèques tels que les interférences inter-systèmes et les plafonds d'erreur non nuls Khalaf & Zekavat (2007); Kundu *et al.* (2020), qui nécessitent des stratégies spécifiques d'allocation de puissance et de contrôle de phase RIS. D'autre part, dans les systèmes HAPS intégrés, améliorer la capacité limitée de l'uplink est essentiel pour garantir la connectivité dans

les zones isolées Huang, Wang & Ferng (2007). Enfin, l'uplink revêt une pertinence stratégique pour les applications IoT et 6G : capteurs médicaux, objets connectés pour les smart cities, véhicules autonomes, tous reposent sur la remontée d'information vers le réseau. Ce travail s'inscrit donc dans un axe original, en mettant l'accent sur l'optimisation conjointe puissance et phase dans la liaison montante, complémentaire aux études abondantes menées côté downlink.

Les travaux étudiés démontrent le potentiel significatif des HAPS pour étendre la couverture et améliorer les performances des communications sans fil. Cependant, les performances de ces systèmes peuvent être encore améliorées en intégrant une nouvelle technologie : les RIS. Dans la section suivante, nous allons étudier l'impact de la mise en œuvre des RIS dans les systèmes de communication.

2.4 Revue de littérature sur les communications avec RIS

Les auteurs de (Alfattani *et al.*, 2021) cherchaient à maximiser la puissance reçue dans les liaisons assistées par RIS en dérivant l'altitude et le nombre de réflecteurs optimaux pour des plateformes aériennes (incluant le HAPS) équipés de RIS. Ils ont établi pour cela un modèle analytique de bilan de liaison couvrant les régimes de réflexion spéculaire et diffuse et en ont tirés des expressions fermées avant de réaliser une étude paramétrique complète. Cependant, leur analyse reposait sur la présence d'un canal LoS idéal, ignorant les atténuations sporadiques, la communication multi-utilisateur et les contraintes matérielles.

L'étude de (Rivera, Jaafar & Yanikomeroglu, 2023) s'est intéressée à la maximisation de la somme des débits pondérés d'un système de communication piloté par un drone aérien sans pilote avec câble (Tethered Unmanned Aerial Vehicle -TUAV) comme BS, utilisant la technique d'accès multiple par répartition du débit (Rate Splitting Multiple Access -RSMA) pour servir les UEs, et assisté par un RIS installé sur la façade d'un bâtiment. La solution proposée combine une recherche exhaustive de la position 3D du TUAV avec une optimisation alternée (Alternating Optimization -AO) des phases RIS, du pré-codage RSMA et du partage de débit, démontrant des gains notables sur un système avec deux utilisateurs.

Le travail de (Hu *et al.*, 2024) a présenté un prototype matériel de RIS passif (256/1024 éléments) destiné à rétablir un lien de communication en fréquence millimétrique NLoS. Pour ce faire, l'angle de réflexion est optimisé hors-ligne via un algorithme d'optimisation par essaim de particules (Particle Swarm Optimization -PSO) qui commute l'état ON/OFF d'une diode PIN par élément, et l'expérience rapporte une EVM (Error Vector Magnitude) entre 3,25 et 3,6 %. Cependant, la résolution 1-bit, l'optimisation non-temps réel, le scénario en intérieur unique et l'absence de modélisation de canal limitent la généralisation aux environnements HAPS ou multi-utilisateur.

Dans (Kim, Choi & Chung, 2024), les auteurs ont investigué l'usage de RIS mobiles embarqués sur trains à grande vitesse pour accroître le SNR et le débit en fréquence millimétrique. Après avoir défini l'architecture de leur système, les auteurs ont validé par simulation les gains obtenus en comparaison avec un système à un relai à la place de RIS.

Enfin, (Li *et al.*, 2024) ont cherché à maximiser la somme des débits du lien montant, basé sur OFDMA, d'un système reposant sur un transcepteur RIS transmissif. Le problème formulé est non-convexe. Il a été résolu en adoptant une approche AO. En particulier, une décomposition duale de Lagrange pour l'allocation de la puissance et des sous-porteuses, puis une approche combinée de Programmation Semi-Définie (Semi-Definite Programming) et Différence de Convexes (DC) a été développées pour obtenir la configuration optimale du RIS.

Le Tableau 2.3 ci-dessous présente une synthèse de ces études, en détaillant le problème visé, la méthodologie employée et les limites clés.

En résumé, les travaux récents démontrent le fort potentiel des RIS pour reconfigurer dynamiquement l'environnement radio et améliorer la couverture, le débit et l'efficacité énergétique des réseaux sans fil. Toutefois, ces études se concentrent majoritairement sur des scénarios purement terrestres ou à l'intérieur. Afin d'étendre ces bénéfices à de vastes zones géographiques et de répondre aux exigences d'accessibilité universelle visées par la 6G, il devient naturel d'envisager l'intégration des RIS au sein de plateformes aériennes à haute altitude. La section suivante discute donc les

Tableau 2.3 Synthèse des travaux sur communiquiations avec RIS

Référence	Problème visé	Méthodologie	Limites clés
(Alfattani <i>et al.</i> , 2021)	Maximiser la puissance reçue en dérivant l'altitude et la taille de la surface RIS optimales sur une plateforme aérienne.	Modèle analytique “specular / scattering” + paramètres 3GPP; expressions fermées, étude paramétrique.	Hypothèses LoS, pas d'atténuation temps réel, ni support multi-utilisateur; phases du RIS idéales, et pas de validation expérimentale.
(Rivera <i>et al.</i> , 2023)	Maximiser la somme des débits des UEs dans un système TUAV-RSMA assisté par RIS.	Boucle “recherche exhaustive + AO” : Grille 3D TUAV, WMMSE RSMA, SCA pour les phases RIS.	Petite cellule (2 UEs seulement), CSI parfait, solution sous-optimale.
(Hu <i>et al.</i> , 2024)	Améliorer le SNR d'un lien NLoS en fréquence millimétrique via un RIS passif 256/1024 éléments.	Prototype matériel FR-4 1-bit; Optimisation hors-ligne par approche PSO des états ON/OFF des éléments RIS; mesures EVM à la fréquence 28 GHz.	Résolution 1-bit, environnement intérieur seulement, pas de temps réel ni support multi-utilisateur.
(Li <i>et al.</i> , 2024)	Maximiser la somme des débits en lien montant OFDMA via allocation de sous-porteuses, puissances, et configuration des phases RIS.	Cadre AO : dualité de Lagrange (A,P) + SDR + SCA pour la configuration RIS; Preuve de convergence.	Complexité SDP élevée, CSI parfait.
(Kim <i>et al.</i> , 2024)	Doubler le SNR/débit en fréquence millimétrique d'un train à grande vitesse grâce à des RIS mobiles embarqués.	Architecture mobile + simulations couverture/SNR, comparaison à un système avec un relai.	Étude conceptuelle; Modèle de communication free-space, contrôle non précisé, aucune optimisation.

déploiements conjoints HAPS–RIS, en identifiant les motivations, architectures proposées, et les défis à relever.

2.5 Déploiements conjoints HAPS – RIS

Les HAPS offrent une couverture étendue, une latence plus faible que les satellites, et une capacité de déploiement rapide, ce qui en fait un élément clé de l'architecture réseau en couches envisagée pour la 6G. Des travaux qui ont intégrés les RIS afin de renforcer le scénario de communication HAPS vers le UEs terrestres ont également été étudiés et analysés. Toutefois, la majorité de ces travaux se sont focalisés sur la communication descendante (downlink) dans les systèmes HAPS-RIS, en tirant parti de techniques d'optimisation classiques ou d'algorithmes basés sur l'apprentissage machine (ML) ou l'apprentissage par renforcement (RL) (Kurt *et al.*, 2021).

À l'inverse, la liaison montante (uplink), dans laquelle les utilisateurs transmettent leurs données vers la HAPS directement ou via RIS, reste encore peu explorée, en raison de sa complexité, notamment liée à la faible puissance d'émission des terminaux UEs. En effet, la communication directe entre l'UE terrestre et le HAPS (liaison montante) n'est généralement pas possible ou peu fiable, car elle souffre d'un manque de ligne de vue directe (NLoS) ainsi que de fortes pertes dues à la distance et aux obstacles physiques. Cette contrainte rend l'utilisation de relais attractives, en particulier des relais passifs et intelligents, tels que les RIS.

Contrairement aux approches classiques, où chaque utilisateur disposerait de ressources dédiées, ce mémoire explore une configuration plus réaliste où tous les utilisateurs exploitent collectivement la même surface RIS ainsi que les antennes du HAPS. Cette configuration pose des défis particuliers en matière d'allocation de ressources et d'optimisation conjointe. En particulier, il est nécessaire d'optimiser simultanément la puissance d'émission des utilisateurs et les déphasages des éléments RIS.

2.6 Modélisation des communications HAPS assitées par RIS

L'intégration des surfaces intelligentes reconfigurables (RIS) aux plateformes à haute altitude (HAPS) constitue une approche prometteuse pour améliorer la couverture, la fiabilité et l'efficacité énergétique des communications sans fil dans les environnements complexes. Cette section

présente un aperçu des modèles de communication HAPS assistées par RIS issus de la littérature récente, avec un accent particulier sur les équations clés décrivant les performances du lien de communication.

Modèle de communication HAPS → RIS → UE

Dans (Tanash, Dwivedi & Riihonen, 2024), le système est modélisé par deux processus de Poisson homogènes représentés par les densités λ_{HAP} et λ_{RIS} . L'utilisateur reçoit la combinaison cohérente du signal émis par le HAPS et réfléchi via le RIS et, éventuellement, du signal reçu directement du HAPS. Il est exprimé par

$$y = As + w = \left(\sum_{l=1}^L \frac{q_l g_l e^{j\theta_l}}{R_q^{\epsilon_q/2} R_g^{\epsilon_g/2}} + \frac{u}{R_u^{\epsilon_u/2}} \right) s + w, \quad (2.1)$$

où q_l (Rician fading) et g_l (shadowed–Rician) représentent respectivement les liens HAPS–RIS et RIS–UE. $R_q^{\epsilon_q/2}$ et $R_g^{\epsilon_g/2}$ représentant les distances HAPS–RIS et RIS–UE. u est un coefficient Rayleigh pour le lien direct HAPS–UE, tandis que ϵ_q , ϵ_g , ϵ_u sont les exposants de perte de trajet (path-loss). Le bruit blanc gaussien additif w a une moyenne nulle et une variance $N_0 = E[|w|^2]$. Enfin, θ_l ($l = 1, \dots, L$) est la phase du $l^{\text{ème}}$ élément du RIS.

Après alignement des phases $\theta_l = \angle u - (\angle q_l + \angle g_l)$, le SNR, noté par ρ , peut être exprimé par

$$\rho = \rho_0 |A|^2 = \rho_0 \left(\frac{\sum_{l=1}^L |q_l g_l|}{R_q^{\epsilon_q/2} R_g^{\epsilon_q/2}} + \frac{|u|}{R_u^{\epsilon_u/2}} \right)^2, \quad (2.2)$$

où $\rho_0 = E_s/N_0$ est le rapport signal-sur-bruit (SNR), avec $E_s = \mathbb{E}[|s|^2]$.

Modèle de communication BS → RIS → HAPS

Considérant maintenant la communication du sol vers le HAPS via un RIS de taille N , le signal reçu au HAPS peut être exprimé par (Odeyemi *et al.*, 2022)

$$y_1 = \left[\sum_{n=1}^N \alpha_n e^{j\phi_n} \beta_n \right] x_s + z_1, \quad (2.3)$$

et le SNR reçu au HAPS déduit comme étant

$$\gamma_1 = \frac{(\sum_{n=1}^N g_n \nu_n)^2 P_s}{N_0 (D_1)^\sigma}, \quad (2.4)$$

où g_n et ν_n sont les enveloppes des variables aléatoires α_n et β_n , avec ses derniers les coefficients des canaux BS-RIS (Rayleigh) et RIS-HAPS (Rician), respectivement. x_s est le signal transmis par BS, z_1 désigne le bruit blanc gaussien additif avec une puissance N_0 , et ϕ_n désigne le déphasage utilisé par le n -ième élément du RIS. Enfin, $D_1 = d_{SR} d_{RH}$, avec d_{SR} (resp. d_{RH}) est la distance BS-RIS (resp. RIS-HAPS), et σ est le coefficient d'atténuation avec la distance.

2.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté une revue de littérature portant sur les technologies HAPS et RIS, avec une discussion sur le déploiement du RIS avec HAPS. L'intégration de ces deux approches ouvre la voie à des systèmes de communication innovants, performants et économies en énergie.

Le chapitre suivant s'appuie sur ces fondations pour proposer une modélisation détaillée de la liaison montante dans un système de communication multi-utilisateur vers HAPS, assisté par RIS.

CHAPITRE 3

ÉTUDE DE LA LIAISON MONTANTE D'UN SYSTÈME MULTI-UTILISATEUR ASSISTÉ PAR RIS VERS HAPS

Pour améliorer la façon dont les utilisateurs communiquent avec une station située en haute altitude (HAPS) en utilisant des surfaces intelligentes reconfigurables, nous devons d'abord établir clairement le cadre physique et mathématique de notre système. Ce chapitre explique l'architecture du réseau que nous étudions, en présentant les éléments principaux qui le compose : les utilisateurs, la surface intelligente reconfigurable (RIS), et la plateforme HAPS. Aussi, nous aborderons les modèles de canaux de communication que nous utiliserons, ainsi que nos hypothèses sur la répartition des ressources.

Une fois ces bases posées, nous présenterons la formulation mathématique de notre problème d'optimisation. Ces fondements soutiendront les algorithmes que nous développerons et discuterons dans le chapitre suivant.

3.1 Modèle du système

Le système étudié dans ce mémoire repose sur une architecture de communication sans fil en liaison montante orthogonale, dans laquelle plusieurs utilisateurs terrestres envoient simultanément leurs signaux vers une station stratosphérique de type HAPS, en s'appuyant sur l'aide d'une RIS placée sur la façade d'un bâtiment. Cette configuration a été choisie pour répondre aux limites des environnements urbains : obstacles physiques, absence de ligne de vue directe entre les utilisateurs et le HAPS, et contraintes de puissance des équipements mobiles.

Les symboles utilisés dans ce travail sont récapitulés dans le tableau 3.1.

Trois composantes principales interviennent dans ce système :

Les utilisateurs : K utilisateurs sont répartis au sol sur une zone géographique délimitée. Chacun est équipé d'une antenne omnidirectionnelle et transmet ses données en liaison montante,

Tableau 3.1 Tableau des symboles et leur description

Symbol	Description
K	Nombre total d'utilisateurs
k	Indice de l'utilisateur ($k=1, \dots, K$)
N_R	Nombre d'éléments réflecteurs au niveau des RIS
N_R^k	Nombre d'éléments réflecteurs au niveau des RIS par utilisateur k
N_H	Nombre des antennes au niveau de HAPS
N_H^k	Nombre des antennes réflecteurs par utilisateur k au niveau de HAPS
N_0	Puissance spectrale du bruit (en dBm/Hz)
Θ_k	Vecteur de phases des éléments RIS affectés à l'utilisateur k
L	le nombre de chemins entre chaque utilisateur et le RIS
P_k	Puissance d'émission de l'utilisateur k
P_{max}	Puissance maximale autorisée par utilisateur
α_l	le canal de fading Nakagami- m indépendant et identiquement distribué (i.i.d.) correspondant avec les paramètres m
ϕ_{AR}^k	L'angle d'arrivée (AoA) au RIS pour le k -ième utilisateur
ϕ_{DR}^k	L'angle de départ (AoD) des UEs pour le k -ième utilisateur
ϕ_{AH}	L'angle d'arrivée (AoA) du HAPS
ϕ_{DR}	L'angle de départ (AoD) du RIS
P_L	La perte de chemin en espace libre
G_H	Le gain de l'antenne du HAPS
c	La vitesse de la lumière
d_{RH}	La distance entre le RIS et le HAPS
f_c	La fréquence porteuse
B	La bande passante totale disponible
B_k	La bande passante par utilisateur
n_H	Le bruit blanc gaussien additif (AWGN) reçu au HAPS et à une puissance unitaire N_0
$g(x, \phi)$	vecteur de canal
\mathbf{h}_{UR}^k	Canal entre l'utilisateur k et les éléments RIS attribués
\mathbf{H}_{RH}^k	le RIS et les antennes HAPS associées à l'utilisateur k
R_k	Débit de données obtenu par l'utilisateur k
R_{th}	Débit minimal requis par utilisateur (QoS)

de manière orthogonale aux autres utilisateurs, c-à-d sans causé d'interférence sur les autres communications.

Le RIS : Il installé sur la façade d'un bâtiment, et comprend N_R éléments réfléchissants passifs. Contrairement à certaines approches où un utilisateur utilise toute la surface, ici, tous

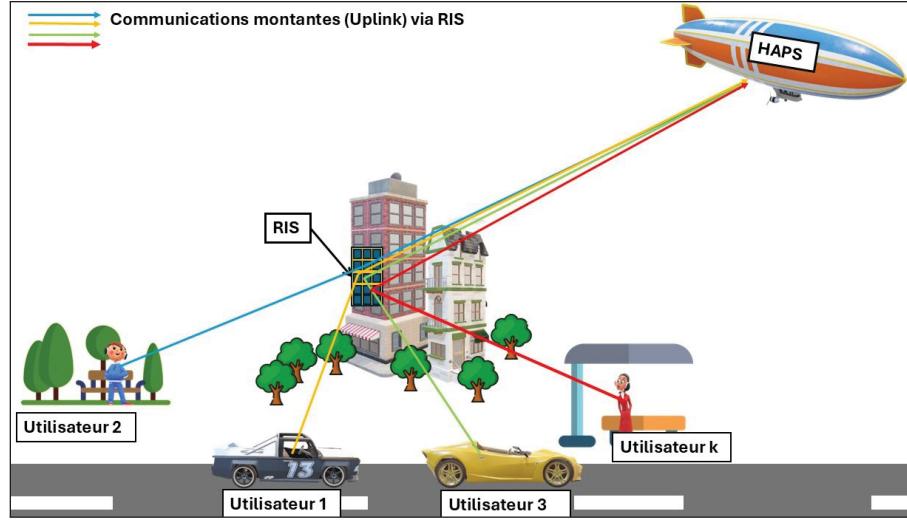


Figure 3.1 Modèle de communication UEs-HAPS assisté par RIS

les utilisateurs peuvent se partager les éléments du RIS entre eux pour des communications concurrentes.

Le HAPS : Il est quasi-stationnaire, situé à 20 km d'altitude dans la stratosphère, est équipé de N_H antennes. Les antennes ne sont pas dédiées individuellement à chaque utilisateur, mais réparties dynamiquement entre eux, en fonction des conditions du canal et des objectifs d'optimisation.

3.2 Modèle de canal

Dans ce système, une communication est établie comme suit : UE → RIS → HAPS. Le lien direct entre les UEs et le HAPS n'est pas pris en compte, car il est considéré inexistant ou fortement atténué.

Le canal entre l'utilisateur k et le RIS peut être modélisé par un vecteur \mathbf{h}_{UR}^k de taille $N_R^k \times 1$, exprimé par

$$\mathbf{h}_{UR}^k = \sqrt{\frac{N_R^k}{L}} \sum_{l=1}^L \frac{\alpha_l}{d_{UR}^k} \mathbf{g}\left(N_k^R, \phi_{AR,k}\right) \left[\mathbf{g}\left(1, \phi_{DU,k}\right)\right]^T, \quad \forall k = 1, \dots, K, \quad (3.1)$$

où N_R^k est le nombre d'éléments RIS alloué à la communication de l'utilisateur k , L est le nombre de trajets entre l'utilisateur et le RIS, α_l est le coefficient de canal suivant le modèle de fading Nakagami- m indépendant et identiquement distribué (i.i.d.) avec les paramètres m et Ω pour le même trajet, m étant le paramètre de forme et Ω la puissance moyenne de l'enveloppe du signal. d_{UR}^k est la distance entre l'utilisateur k et le RIS, tandis que $\phi_{AR,l}$ et $\phi_{DU,l}$ sont respectivement l'angle d'arrivée (Angle-of-Arrival -AoA) du RIS et l'angle de départ (Angle-of-Departure -AoD) de l'utilisateur sur le même chemin. Enfin, le vecteur de canal $\mathbf{g}(x, \phi)$ de taille $x \times 1$, $x \in \mathbb{N}^*$, peut être exprimé comme suit :

$$\mathbf{g}(x, \phi) = \frac{1}{\sqrt{x}} [1, e^{j\pi \cos \phi}, e^{2j\pi \cos \phi}, \dots, e^{(x-1)j\pi \cos \phi}]^T, \quad (3.2)$$

où $[\cdot]^T$ est l'opération de transposition.

De plus, le canal RIS-HAPS, noté \mathbf{H}_{RH} de taille $N_H \times N_R$, est décomposé en K termes de telle sorte que le canal RIS-HAPS correspondant à la transmission de l'utilisateur k , noté \mathbf{H}_{RH}^k , ait une taille de $N_k^H \times N_R^k$ et s'écrit comme suit

$$\mathbf{H}_{RH}^k = \sqrt{N_k^R N_k^H PL} \mathbf{g}(N_k^H, \phi_{AH}) [\mathbf{g}(N_k^R, \phi_{DR})]^T, \quad (3.3)$$

où N_k^H est le nombre d'antennes du HAPS utilisées pour recevoir le signal de l'utilisateur k transmis via le RIS, et ϕ_{AH} et ϕ_{DR} sont respectivement l'AoA du HAPS et l'AoD du RIS. En supposant que la liaison entre le RIS et le HAPS est dominée par la ligne de visée (LoS), son atténuation à grande échelle, notée PL , suit la perte de trajet en espace libre et s'exprime par $PL = G_H (c/(4\pi d_{RH} f_c))^2$, où G_H est le gain d'antenne du HAPS, c est la vitesse de la lumière, d_{RH} est la distance RIS-HAPS et f_c est la fréquence porteuse comme mentionné dans (Alsharoa & Alouini, 2020) .

3.3 Modèle de communication

Chaque UE k transmet un signal s_k avec une puissance unitaire $\mathbb{E}(|s_k|^2) = 1, \forall k = 1, \dots, K$, sur un canal indépendant. Chaque signal transmis se propage vers le HAPS via le RIS, en ajustant les phases de ses éléments réfléchissants en conséquence.

Soit $\Theta = \text{diag}(e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_{N_R}})$ la matrice diagonale de configuration de déphasage du RIS, où $\theta = [\theta_1, \dots, \theta_{N_R}]$ est le vecteur des déphasages appliqués. Comme les signaux des UEs sont transmis sur des canaux orthogonaux, nous supposons que le RIS est subdivisé en K zones, chaque zone traitant le signal provenant d'un UE spécifique. Nous définissons donc par $\Theta_k = \text{diag}(e^{j\theta_{k,1}}, \dots, e^{j\theta_{k,N_R^k}})$ la matrice de déphasage de la $k^{\text{ième}}$ zone du RIS. De plus, nous supposons que le HAPS répartit ses antennes entre les K signaux afin de les recevoir indépendamment, c'est-à-dire que N_k^H antennes sont réservées à la réception du $k^{\text{ième}}$ signal, $\forall k = 1, \dots, K$.

Par conséquent, le $k^{\text{ième}}$ signal reçu au niveau des N_k^H antennes peut être écrit comme suit

$$\mathbf{y}_k = \sqrt{P_k} \mathbf{H}_{RH}^k \Theta_k \mathbf{h}_{UR}^k s_k + \mathbf{n}_k^H, \quad \forall k = 1, \dots, K, \quad (3.4)$$

où P_k est la puissance d'émission de l'UE k , tandis que Θ_k de taille $N_k^R \times N_k^R$ est la matrice de configuration de déphasage pour le signal de l'UE k . Enfin, \mathbf{n}_k^H de taille $N_k^H \times 1$ est le bruit AWGN reçu au niveau du HAPS et a une puissance unitaire N_0 . Par conséquent, le SNR reçu du $k^{\text{ième}}$ signal au niveau du HAPS est donné par

$$\gamma_k = \frac{P_k \|\mathbf{H}_{RH}^k \Theta_k \mathbf{h}_{UR}^k\|^2}{B_k N_0}, \quad \forall k = 1, \dots, K, \quad (3.5)$$

où B_k est la bande passante du $k^{\text{ième}}$ signal et $\|\cdot\|$ est l'opérateur norme-2. Le débit de données correspondant peut s'écrire par

$$R_k = B_k \log_2 (1 + \gamma_k), \quad \forall k = 1, \dots, K. \quad (3.6)$$

3.4 Formulation du problème

Dans ce travail, nous visons à maximiser le débit de données total (somme) des communications montantes, tout en satisfaisant à une exigence minimale de qualité de service et en respectant les puissances d'émission des UEs et les limitations de déphasage du RIS. Les paramètres d'optimisation sont principalement les configurations de déphasage pour chaque UE k Θ_k , organisées dans $\Theta = [\Theta_1, \dots, \Theta_K]$, le nombre d'éléments réfléchissants attribués à l'UE k , noté N_k^R , et organisés dans le vecteur $\mathbf{N}^R = [N_1^R, \dots, N_K^R]$, le nombre correspondant d'antennes attribuées N_k^H au niveau du HAPS, alignées sous la forme $\mathbf{N}^H = [N_1^H, \dots, N_K^H]$, et les valeurs de puissance attribuées à chaque UE, P_k , organisées dans un vecteur $\mathbf{P} = [P_1, \dots, P_K]$. Le problème peut être formulé comme étant

$$\underset{\Theta, N^R, N^H, P}{\text{maximiser}} \quad R = \sum_{k=1}^K R_k \quad (3.7)$$

sous contrainte

$$R_k \geq R_{\text{th}}, \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (3.8)$$

$$\sum_{k=1}^K N_R^k \leq N_R \quad (3.9)$$

$$\sum_{k=1}^K N_H^k \leq N_H \quad (3.10)$$

$$0 \leq P_k \leq P_k^{\max}, \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (3.11)$$

$$\theta_i \in [0, 2\pi], \quad \forall i = 1, \dots, N^R \quad (3.12)$$

Dans (3.7), R est le débit de données total, R_{th} est le débit de données minimal pour un UE, et P_k^{\max} est la puissance d'émission maximale de l'UE k . La contrainte (3.8) garantit la qualité de service minimale, tandis que (3.9)–(3.10) garantissent que l'attribution des éléments RIS et des antennes HAPS reste dans les limites. La contrainte (3.11) respecte la limite de puissance d'émission maximale, et enfin (3.12) représente la plage de déphasage pour les éléments RIS.

Compte tenu de la complexité du problème (due à la non-linéarité de la fonction objectif), nous optons dans la section suivante pour plusieurs approches de solution basées sur l'optimisation aléatoire, basée sur WOA (Mirjalili & Lewis, 2016), basée sur PSO (Kennedy & Eberhart, 1995) et une proposition de solution basée sur AO.

3.5 Méthodes d'optimisation et configuration des simulations

La figure 3.2 présente toutes les méthodes développées, visant à maximiser le débit somme total tout en respectant les contraintes de puissance et de QoS. Les méthodes étudiées sont : optimisation de base (Baseline) développée à partir de l'optimisation aléatoire, optimisation des baleines (WOA), optimisation par essaim particulaire (PSO), et optimisation alternée proposée (AO).

Un résumé de leur fonctionnement et de leurs caractéristiques est présenté ci-dessous.

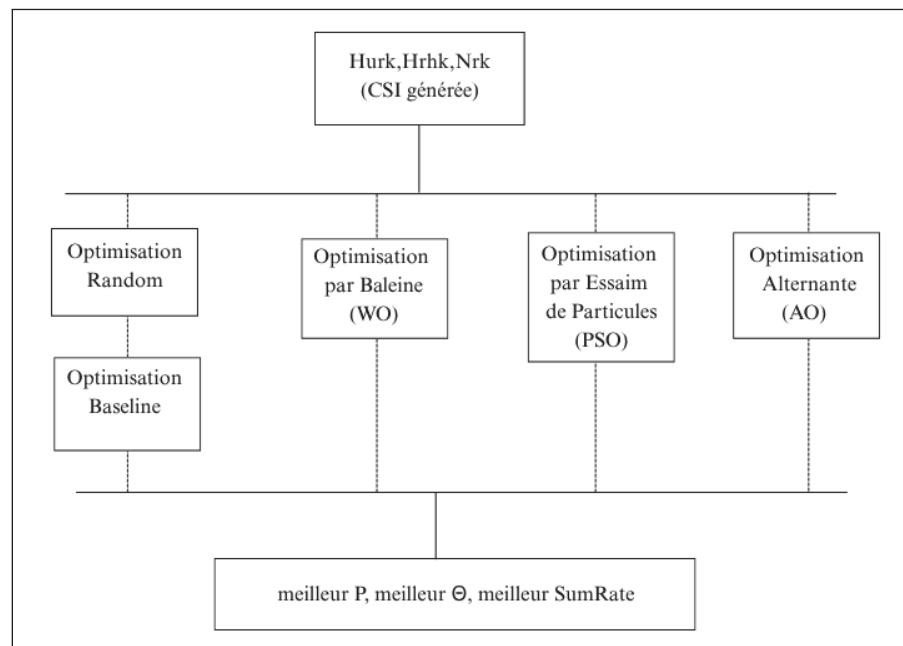


Figure 3.2 Méthodes d'optimisation développées

3.5.1 Optimisation de base

Comme étape de validation, nous avons d'abord implémenté une exploration entièrement aléatoire de P et Θ , décrite dans l'algorithme 14.

Algorithme 3.1 Optimisation aléatoire (Random)

Input : $N_R, N_H, K, P_{\max}, R_{\text{th}}, B, N_0, V_{\text{itérations}}, V_{\text{réalisations}}$

Output : Moyenne du sum data rate sur plusieurs réalisations de CSI

```

1 Initialiser  $R \leftarrow 0$  ;
2 for  $i \leftarrow 1$  to  $V_{\text{réalisations}}$  do
3   Générer  $H_{UR_k}$  et  $H_{RH_k}$  pour  $k = 1, \dots, K$  ;
4   for  $j \leftarrow 1$  to  $V_{\text{itérations}}$  do
5     Générer un vecteur de phases aléatoires  $\Theta_k \in [0, 2\pi]^{N_{Rk}}$  pour chaque  $k$  ;
6     Générer un vecteur de puissances aléatoires  $P_k \in [0, P_{\max}]$  pour chaque  $k$  ;
7     Calculer  $R_k$  pour chaque utilisateur ;
8     if  $R_k \geq R_{\text{th}}$  pour tout  $k$  then
9       |    $R \leftarrow R + R_k$  ;
10      end if
11    end for
12  end for
13  $R \leftarrow R/V_{\text{réalisations}}$  ;
14 return  $R$ 
```

Cette optimisation aléatoire (Random) sert uniquement à vérifier la cohérence de la chaîne de simulation, ou les meilleurs débits qu'elle atteint demeurent systématiquement inférieurs à ceux des méta-heuristiques étudiées.

Afin d'éviter de surcharger le chapitre 4, ses résultats numériques ne sont pas présentés.

La configuration quantifiée constitue la méthode de référence pour toutes les comparaisons. Bien que l'optimisation de référence repose également sur une approche aléatoire, elle diffère considérablement des optimisations aléatoires précédentes à plusieurs égards.

Pour une réalisation de canal pour les utilisateurs dans la zone définie, les phases du RIS sont quantifiées à un ensemble de valeurs prises entre 0 et 2π , spécifiquement $\theta_{k,l} \in \{0, 2\pi/J, 2\pi/2J, \dots, 2\pi(J-1)/J, 2\pi\}$, $\forall k = 1, \dots, K$ and $\forall l = 1, \dots, N_R^k$, avec J le nombre

de niveaux de quantification de la phase. Similairement, les niveaux de puissance P_k est quantifié parmi un ensemble de valeurs entre 0 et P_{\max} , en particulier $P_k \in \{0, P_{\max}/J', \dots, P_{\max}(J' - 1)/J', P_{\max}\}$, avec J' le nombre de niveaux de quantification de la puissance. Dans cette méthode, $\theta_{k,l}$ et P_k sont choisis aléatoirement parmi les niveaux de quantification disponibles. La démarche pour cette méthode est présentée dans l'algorithme 14.

Algorithme 3.2 Optimisation de base (Baseline)

Input : $N_R, N_H, K, P_{\max}, R_{\text{th}}, B, N_0, V_{\text{itérations}}, V_{\text{réalisations}}$
Output : Moyenne du sum data rate sur plusieurs réalisations de CSI

```

1 Initialiser  $R \leftarrow 0$  ;
2 for  $i \leftarrow 1$  to  $V_{\text{réalisations}}$  do
3   Générer  $H_{UR_k}$  et  $H_{RH_k}$  pour  $k = 1, \dots, K$  ;
4   for  $j \leftarrow 1$  to  $V_{\text{itérations}}$  do
5     Fixer  $\Theta_k$  avec des phases quantifiées sur  $[0, 2\pi[$  pour chaque  $k$  ;
6     Fixer  $P_k$  avec des puissances quantifiées sur  $[0, P_{\max}]$  pour chaque  $k$  ;
7     Calculer  $R_k$  pour chaque utilisateur ;
8     if  $R_k \geq R_{\text{th}}$  pour tout  $k$  then
9        $| R \leftarrow R + R_k$  ;
10      end if
11    end for
12  end for
13  $R \leftarrow R/V_{\text{réalisations}}$  ;
14 return  $R$ 
```

3.5.2 Optimisation des baleines

L'algorithme WOA s'inspire du comportement de chasse des baleines à bosse, notamment leur technique de “spirale en bulles” utilisée pour capturer des proies. Dans notre contexte, cet algorithme est adapté à l'optimisation conjointe des puissances d'émission des utilisateurs et des phases des éléments RIS, afin de maximiser le débit montant total du système (Mirjalili & Lewis, 2016). Son fonctionnement est illustré dans la figure 3.3.

Tel que décrit dans l'algorithme 23 ci-bas, chaque solution candidate, appelée “baleine”, représente un vecteur de puissance $\mathbf{P} = [P_1, \dots, P_K]$ et une configuration des phases du RIS $\Theta = [\Theta_1, \dots, \Theta_K]$. L'algorithme évolue en plusieurs itérations, au cours desquelles les

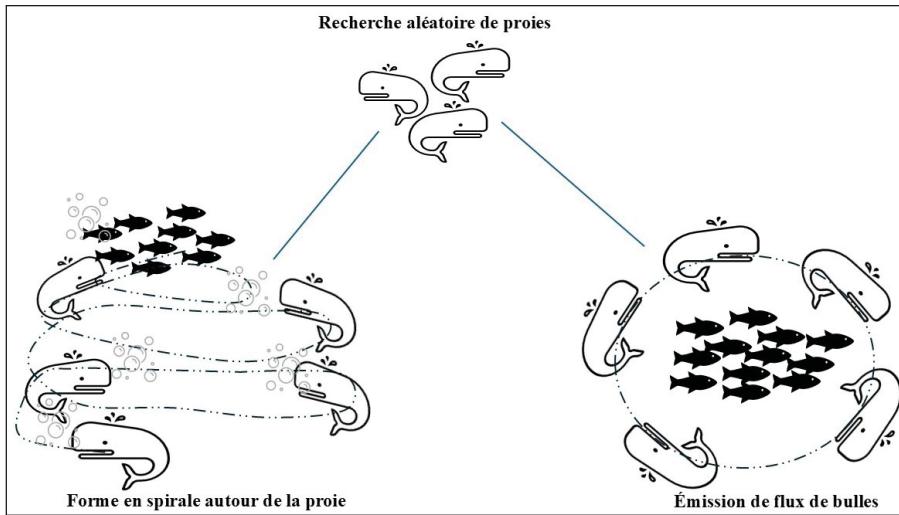


Figure 3.3 Comportements des baleines à bosse pour chasser.

baleines ajustent leur position selon deux stratégies : attraction vers la meilleure solution connue (exploitation) ou exploration de nouvelles régions de l'espace de recherche.

À chaque itération, les solutions sont évaluées selon la somme des débits utilisateurs obtenus sous contrainte de QoS. La meilleure baleine est mise à jour dynamiquement, et l'ensemble converge vers du configuration optimale qui satisfait à la fois les exigences de performance et de QoS.

3.5.3 Optimisation par essaim de particules

La méthode d'optimisation par essaim de particules (PSO) est une technique métahéuristique inspirée des comportements collectifs observés dans la nature, tels que les nuées d'oiseaux ou les bancs de poissons. Dans un espace de recherche, chaque solution possible est représentée par une "particule", qui ajuste sa position en fonction de son expérience personnelle (meilleure position visitée, appelée *pbest*) et de l'expérience collective de l'essaim (meilleure position globale, appelée *gbest*). Les mouvements des particules sont régis par des règles simples de mise à jour de vitesse et de position, intégrant des composantes d'exploration (aléatoire) et d'exploitation (mémorisation des meilleures solutions).

Algorithme 3.3 Optimisation des baleines (WOA)

```

Input :  $\mathbf{H}_{UR}, \mathbf{H}_{RH}, K, N_R, N_H$ , nombre de baleines  $Q, V_{\text{itérations}}$ 
Output : Vecteur de puissance optimale  $P^*$ ,  $\Theta^*$  et  $R^*$ 
1 Initialiser aléatoirement les puissances  $P_i$  et phases  $\Theta_i$  pour chaque baleine  $i \in [1, Q]$  ;
2 Calculer la valeur de fitness (débit total) de chaque baleine ;
3 Déterminer la meilleure baleine comme solution de référence  $(P^*, \Theta^*)$  ;
4 for  $v = 1$  to  $V_{\text{itérations}}$  do
5   Mettre à jour le coefficient  $a = 2 - \frac{2t}{T}$  ;
6   for chaque baleine  $i$  do
7     Générer aléatoirement  $r_1, r_2, p, l$  ;
8     if  $p < 0.5$  then
9       if  $|A| < 1$  then
10         Exploitation vers la meilleure baleine :Mettre à jour  $P_i$  et  $\Theta_i$  selon la
11           distance à la meilleure solution
12       else
13         Exploration autour d'une baleine aléatoire :Mettre à jour  $P_i$  et  $\Theta_i$ 
14           autour d'une baleine aléatoire
15       end if
16     end if
17     else
18       Spirale logarithmique :Mettre à jour  $P_i$  et  $\Theta_i$  selon un modèle en spirale
19     end if
20   end if
21   Appliquer les bornes :  $0 \leq P_i \leq P_{\max}$ ,  $0 \leq \theta \leq 2\pi$  ;
22   Calculer la nouvelle fitness et mettre à jour la meilleure baleine si besoin ;
23 end for
24 Enregistrer le meilleur score pour la courbe de convergence ;
25 end for
26 return  $P^*, \Theta^*$ , et  $R^*$  ;

```

La méthode d'optimisation par essaim de particules suit les étapes présentées dans l'algorithme 19.

3.5.4 Optimisation alternée (Solution proposée)

La méthode d'optimisation alternée (AO) est une technique d'optimisation itérative utile lorsque le problème global est difficile à résoudre directement, mais devient plus tractable lorsqu'on optimise alternativement sur des sous-ensembles de variables. Cette approche consiste à fixer un

Algorithme 3.4 Optimisation par essaim de particules (PSO)

Input : $\mathbf{H}_{UR}, \mathbf{H}_{RH}, N_R^k, N_H^k, K, P_{\max}, B, N_0, Q, T$
Output : $P_g^{best}, \Theta_g^{best}$ et R_g^{best}

```

1 Initialiser aléatoirement  $Q$  particules : puissances  $P^{(i)} \in [0, P_{\max}]^K$ , phases
 $\Theta^{(i)} \in [0, 2\pi]^{\sum N_R k}$  et vitesses  $V_P^{(i)}, V_{\Theta}^{(i)}$  ;
2 Initialiser les meilleurs scores personnels et globaux ;
3 for  $i \leftarrow 1$  to  $Q$  do
4   Calculer les taux  $R_k$  pour chaque utilisateur ;
5   if  $R_k \geq R_{th}, \forall k$  then
6      $| R_g^{best} \leftarrow R_g^{best} + R_k$  ;
7   end if
8 end for
9 for  $t \leftarrow 1$  to  $T$  do
10  for  $i \leftarrow 1$  to  $Q$  do
11    Générer  $r_1, r_2, r_3, r_4$  (vecteurs aléatoires) ;
12    Mettre à jour les vitesses :
13       $V_P^{(i)} \leftarrow wV_P^{(i)} + c_1r_1(P^{best(i)} - P^{(i)}) + c_2r_2(P^g - P^{(i)})$  ;
14       $V_{\Theta}^{(i)} \leftarrow wV_{\Theta}^{(i)} + c_1r_3(\Theta^{best(i)} - \Theta^{(i)}) + c_2r_4(\Theta^g - \Theta^{(i)})$  ;
15    Mettre à jour positions :  $P^{(i)} \leftarrow \text{clip}(P^{(i)} + V_P^{(i)}, 0, P_{\max})$  ;
16     $\Theta^{(i)} \leftarrow \text{quantification}(\Theta^{(i)} + V_{\Theta}^{(i)})$  ;
17    Calculer  $R_k$  et score  $S^{(i)}$  ;
18    Mettre à jour les meilleurs personnels et globaux si améliorées ;
19 end for
20 end for
21 return  $P_g^{best}, \Theta_g^{best}$  et  $R_g^{best}$ 
```

groupe de variables pendant que l'on optimise l'autre groupe de variables, puis inversement, jusqu'à atteindre la convergence (Bezdek & Hathaway, 2002).

Dans notre cas, cette méthode est appliquée à l'optimisation du débit total dans un système de communication montante assisté par une surface RIS et vers une plateforme HAPS, où les antennes HAPS et les éléments RIS sont partagés entre plusieurs utilisateurs. Plus précisément, l'optimisation s'effectue alternativement sur la puissance d'émission des utilisateurs et sur les phases des éléments RIS.

Principe de fonctionnement

- On initialise les phases RIS (Θ) suivant un motif cyclique ou aléatoire, et les puissances utilisateurs (P) de manière aléatoire dans l'intervalle des valeurs permises $[0, P_{\max}^k]$.
- À chaque itération :
 - On optimise le vecteur de puissances $\mathbf{P} = [P_1, \dots, P_K]$, en considérant les phases du RIS $\Theta = \{\theta_1^{(1)}, \dots, \theta_{N_{R_1}}^{(1)}, \dots, \theta_1^{(K)}, \dots, \theta_{N_{R_K}}^{(K)}\}$ fixées.
 - On optimise ensuite la configuration du RIS Θ , en considérant le vecteur de puissance \mathbf{P} fixée.
- Les étapes ci-haut continuent itérativement jusqu'à ce que la variation du débit total entre deux itérations successives devienne négligeable, c-à-d inférieur à une valeur de convergence ϵ .

Ces étapes sont mieux détaillées dans l'algorithme 13 ci-bas.

Algorithme 3.5 Optimisation par alternance (AO)

Input : $\mathbf{H}_{UR}, \mathbf{H}_{RH}, N_H^k, N_R^k, P_{\max}, V_{\text{itérations}}$

Output : puissance optimale P^* , déphasage optimale Θ^* , somme de débit de données $R^{(t)}$

```

1 Initialiser les puissances  $P^{(0)}$  et les phases  $\Theta^{(0)}$  et calculer  $R^{(0)}$  ;
2 for  $t = 1$  to  $V_{\text{itérations}}$  do
3   Optimiser  $\mathbf{P}^{(t)}$  en fixant  $\Theta^{(t-1)}$  ;
4   Optimiser  $\Theta^{(t)}$  en fixant  $\mathbf{P}^{(t)}$  ;
5   Calculer  $R^{(t)}$  ;
6   if  $R^{(t)} \geq R_{th}$  pour tout  $k$  then
7      $R \leftarrow R + R^{(t)}$  ;
8     if  $|R^{(t)} - R^{(t-1)}| < \epsilon$ , %  $\epsilon$  est le seuil de convergence then
9       Quitter la boucle ;
10      end if
11    end if
12  end for
13 return  $P^{(t)}, \Theta^{(0)}$  et  $R^{(t)}$ 
```

3.5.5 Charge de calcul des méthodes

Avant d'analyser les performances numériques, il convient d'estimer la charge computationnelle de chacune des méthodes, comme indiqué dans le tableau 3.2 qui suit

Tableau 3.2 Nombre d'évaluations du débit

Méthode	Réglages internes	Évaluations
Baseline	100 tirages aléatoires	100
PSO	100 particules \times 100 itérations	10 000
WOA	500 baleines \times 100 itérations	50 000
AO	100 itérations, 2 optimisations par itération (PetTheta)	20 000

On constate ainsi une hiérarchie claire : Baseline ne requiert qu'une dizaine d'évaluations par canal, PSO et WOA en effectuent de l'ordre de 1×10^4 et 5×10^4 , tandis que AO se situe entre les deux, autour de 2×10^4 . Cette différence de charge se répercute directement sur les temps d'exécution mesurés présentées dans la figure 3.4 Ou Baseline < PSO < WOA < AO, AO reste toutefois le meilleur compromis, car c'est la seule qui combine haute performance et temps de calcul encore compatible avec une exécution hors ligne.

3.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté et implémenté plusieurs techniques d'optimisation visant à maximiser le débit montant dans un système RIS-HAPS, allant des méthodes de référence *Baseline* aux approches avancées comme *WOA*, *PSO*, et *AO*. Dans le chapitre suivant, nous exposerons les résultats de simulation obtenus en utilisant ces approches de solutions.

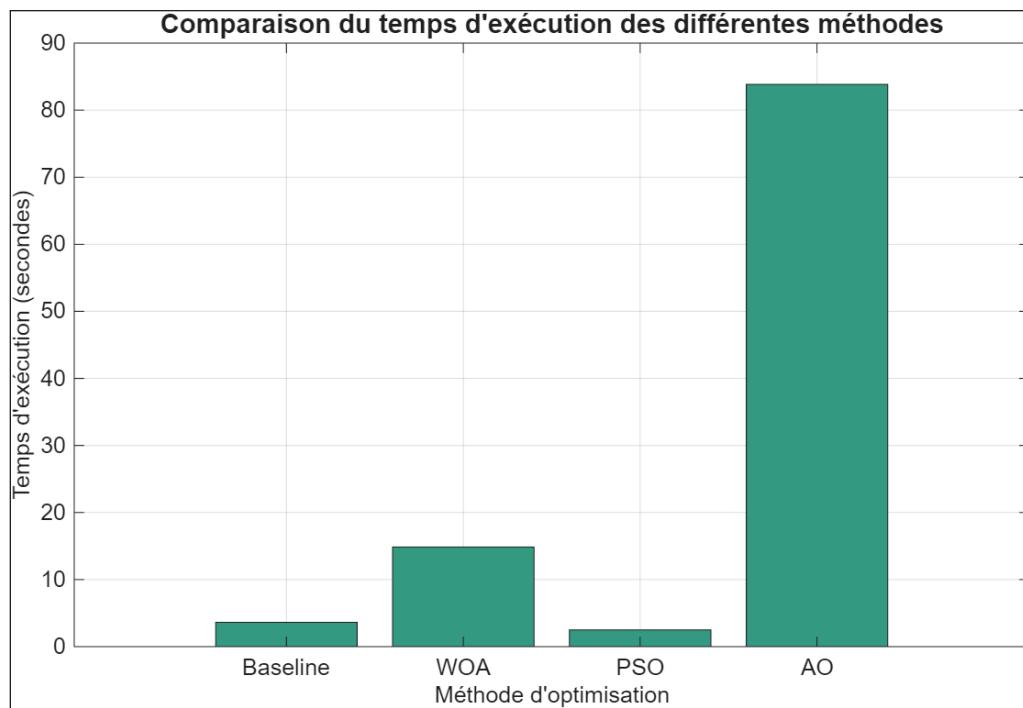


Figure 3.4 Temps d'exécution moyen par méthode (100 réalisations de canaux, $N_R = N_H = 16$)

CHAPITRE 4

RÉSULTATS NUMÉRIQUES ET DISCUSSION

4.1 Paramètres de simulation et environnement

Pour nos simulations, nous avons considéré un système de liaison montante avec $K = 4$ utilisateurs au sol situés dans une zone de 1 km^2 , localisés aux coordonnées cartésiennes 3D suivantes : UE 1 se trouve à la position $(250, 250, 0)$ mètres, UE 2 à $(750, 250, 0)$ mètres, UE 3 à $(250, 750, 0)$ mètres et UE 4 à $(750, 750, 0)$ mètres. Le RIS est situé sur la façade d'un bâtiment aux coordonnées $(30, 30, 100)$ mètres, et un HAPS est situé aux coordonnées $(0, 0, 20000)$ mètres. Sauf indication contraire, nous supposons que $P_k^{\max} = P_{\max} = 40 \text{ dBm}$, $\forall k = 1, \dots, K$, et que le HAPS est équipé de $N_H = 16$ antennes, tandis que le RIS dispose de $N_R = 16$ éléments réfléchissants. Ces positions sont illustrées à la Figure 4.1.

Le système fonctionne sur une bande passante de 20 MHz , ce qui signifie qu'une bande passante $B = 5 \text{ MHz}$ est réservé par utilisateur, et la puissance du bruit unitaire est fixée à $N_0 = -174 \text{ dBm/Hz}$. Le débit minimal de la QoS est fixée à $R_{th} = 1 \text{ Mbps}$ et le seuil de convergence des algorithmes métaheuristiques et AO est $\epsilon = 10^{-2}$.

Pour les canaux de communication, l'évanouissement à petite échelle est modélisé à l'aide d'une distribution Nakagami- m avec un facteur de forme $m = 1,5$ et un gain d'antenne HAPS $G_H = 17 \text{ dBi}$ (Ren, Abbasi, Kurt, Yanikomeroglu & Chen, 2023). De plus, la fréquence d'opération est $f_c = 2 \text{ GHz}$, tandis que la vitesse de la lumière $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

4.2 Assignation de N_R et N_H

Afin d'identifier la répartition la plus performante des éléments du RIS N_R et des antennes du HAPS N_H entre les $K = 4$ utilisateurs, nous évaluons quatre scénarios d'assignation. L'allocation offrant le meilleur débit total moyen sera retenue pour les études paramétriques ultérieures.

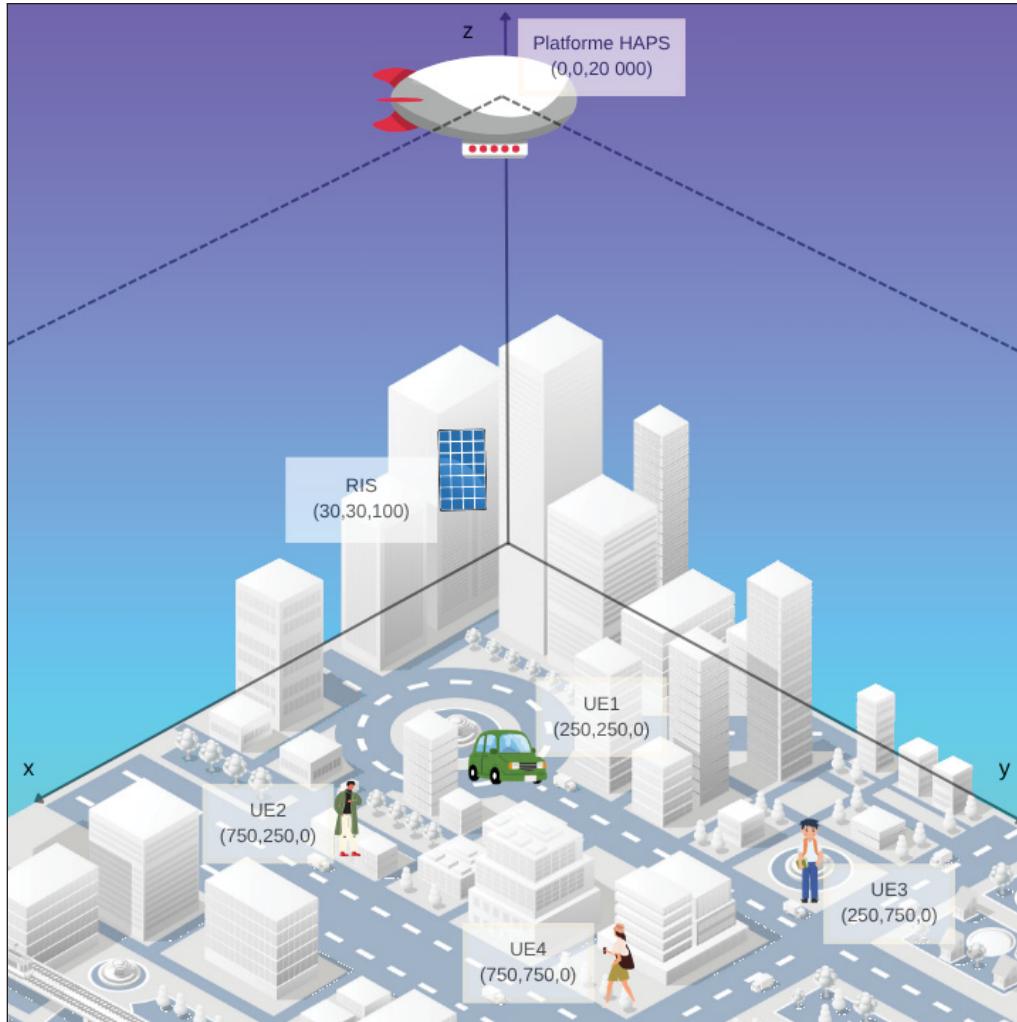


Figure 4.1 Disposition spatiale du système : Coordonnées des utilisateurs (UE1–UE4), du RIS et du HAPS.

4.2.1 Allocation proportionnelle au gain de canal

L'idée est de privilégier les utilisateurs disposant du canal le plus favorable au moment de l'allocation. Pour chaque utilisateur k , on calcule d'abord un poids $w_k = \|\mathbf{H}_{UR}^k\| / \sum_{i=1}^K \|\mathbf{H}_{UR}^i\|$, où $\|\mathbf{H}_{UR}^k\|$ est la norme (instantanée) du canal UE_k -RIS.

Les ressources sont ensuite distribuées proportionnellement à ces poids, avec un ajustement final pour satisfaire les contraintes (3.9)-(3.10). Selon un exemple d'expérimentation, nous avons

trouvé $w_1 > w_2 \approx w_3 > w_4$. Par conséquent, voici la stratégie d'assignation des éléments RIS et des antennes HAPS aux utilisateurs correspondante :

Tableau 4.1 Assignation proportionnelle au gain de canal ($K = 4, N_R = N_H = 16$)

UE	N_R^k	N_H^k
1	7	5
2	4	4
3	4	4
4	1	3

4.2.2 Allocation proportionnelle à la distance UE-RIS et UE-HAPS

Cette stratégie cherche à compenser l'atténuation du trajet pour les utilisateurs les plus éloignés du RIS, c-à-d, plus un UE est éloigné, il sera assigné plus d'éléments RIS et antennes au HAPS, pour sa communication. Pour ce faire, on définit les poids $w_k^R = d_{UR}^k / \sum_{i=1}^K d_{UR}^i$ et $w_k^H = d_{UH}^k / \sum_{i=1}^K d_{UH}^i$.

Les ressources sont ensuite attribuées proportionnellement comme étant $N_R^k = \lceil w_R^k N_R \rceil$ et $N_H^k = \lceil w_H^k N_H \rceil$, puis ajustées d'une unité au besoin pour respecter les contraintes (3.9)-(3.10). Dans nos simulations, $w_R^1 < w_R^2 \approx w_R^3 < w_R^4$ et $w_H^1 < w_H^2 \approx w_H^3 < w_H^4$, impliquant une stratégie d'assignation comme présenté au tableau 4.2. Ainsi, les utilisateurs les plus éloignés reçoivent davantage d'éléments RIS et d'antennes HAPS, compensant en partie la perte de puissance liée à la distance.

Tableau 4.2 Allocation proportionnelle à la distance UE-RIS et UE-HAPS ($K = 4, N_R = N_H = 16$)

UE	$N_{R,k}$	$N_{H,k}$
1	2	3
2	3	4
3	3	4
4	8	5

4.2.3 Allocation de type Max–Min

L'objectif est d'augmenter le rapport SNR le plus faible parmi les utilisateurs, c-à-d allouer N_R^k et N_H^k afin de résoudre le problème

$$\max_{\mathbf{N}_R, \mathbf{N}_H} \min_{k=1, \dots, K} \gamma_k. \quad (4.1)$$

Des ressources supplémentaires (en terme de nombre d'éléments RIS et d'antennes HAPS) sont donc allouées à l'UE ayant le SNR le plus faible. Cette opération est répétée jusqu'à ce que tous les éléments N_R et toutes les antennes N_H aient été assignées à tous les utilisateurs. Dans le tableau 4.3, nous présentons un exemple d'assignation qui suit celle logique, où UE 4 est assigné le plus d'éléments RIS et antennes HAPS puisqu'il dispose du SNR le plus faible initialement, tandis que UE 1 est assigné les plus petits nombres d'éléments RIS et d'antennes. Cette approche garantit généralement une forte équité en terme de performances entre les utilisateurs.

Tableau 4.3 Allocation de type Max–Min ($K = 4, N_R = N_H = 16$)

Utilisateur k	N_R^k	N_H^k
1	1	3
2	4	3
3	4	3
4	7	7

4.2.4 Allocation égalitaire

Dans ce scénario, chaque utilisateur reçoit exactement la même part de ressources, quel que soit son canal ou sa position, en respectant les contraintes (3.9)-(3.10). Explicitement, ceci revient à adopter l'assignation suivante :

4.3 Étude des performances pour différentes stratégies d'assignation de \mathbf{N}_R et \mathbf{N}_H

La figure 4.2 met en évidence l'impact de la stratégie d'allocation des éléments RIS et antennes HAPS sur les performances de la méthode Baseline. On constate d'abord que la répartition

Tableau 4.4 Allocation égalitaire ($K = 4$, $N_R = N_H = 16$)

Utilisateur k	$N_{R,k}$	$N_{H,k}$
1	4	4
2	4	4
3	4	4
4	4	4

égalitaire domine nettement avec un débit moyen de 106 Mbps, devançant de près de 10 Mbps l’assignation basée sur la distance, et de plus de 15 Mbps celle proportionnelle au gain de canal RIS, tandis que l’assignation basée sur le gain du canal offre le résultat le plus faible. Ainsi, parmi les quatre répartitions étudiées, la répartition égale des éléments RIS et des antennes HAPS fournit la meilleure performance globale.

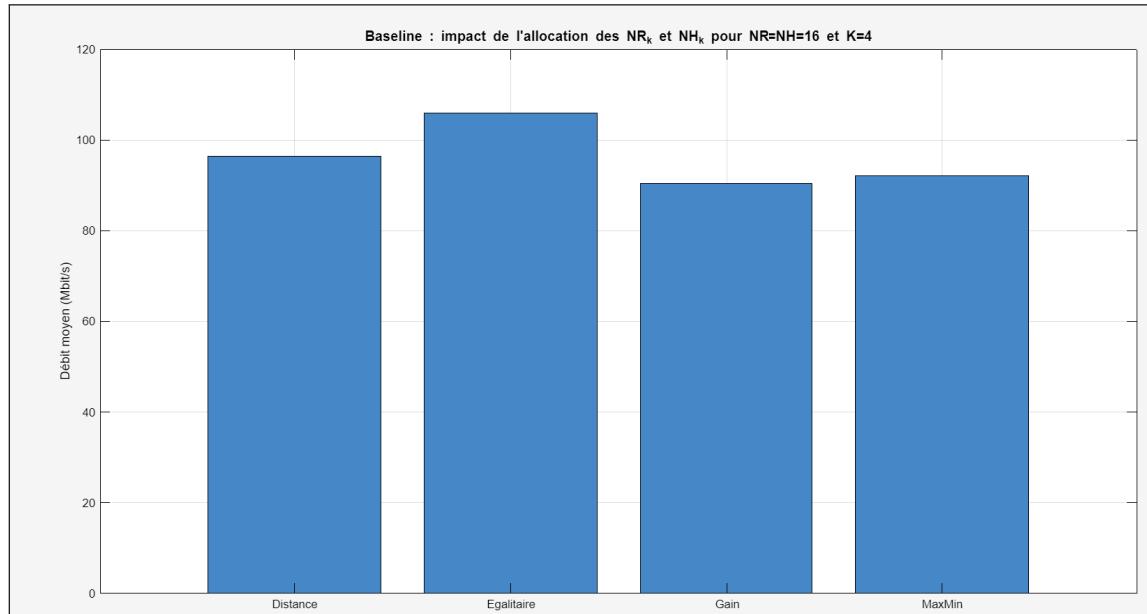


Figure 4.2 Débit total moyen vs. stratégie d’assignation des éléments RIS et antennes HAPS (Méthode Baseline).

Dans la figure 4.3, qui rassemble les résultats obtenus avec l’algorithme PSO, on constate à nouveau que l’allocation égalitaire fournit le débit montant moyen le plus élevé égal à 136 Mbps. Elle précède les autres stratégies par au moins 10 Mbps. L’allocation Max-Min arrive en dernière position avec un peu plus de 120 Mbps. Ainsi, même après l’optimisation par essaim de

particules, la répartition uniforme des éléments RIS et des antennes HAPS demeure la stratégie la plus performante. Enfin, on constate que la performance établie par PSO est supérieure à celle de Baseline, et ce pour n'importe quelle stratégie d'assignation.

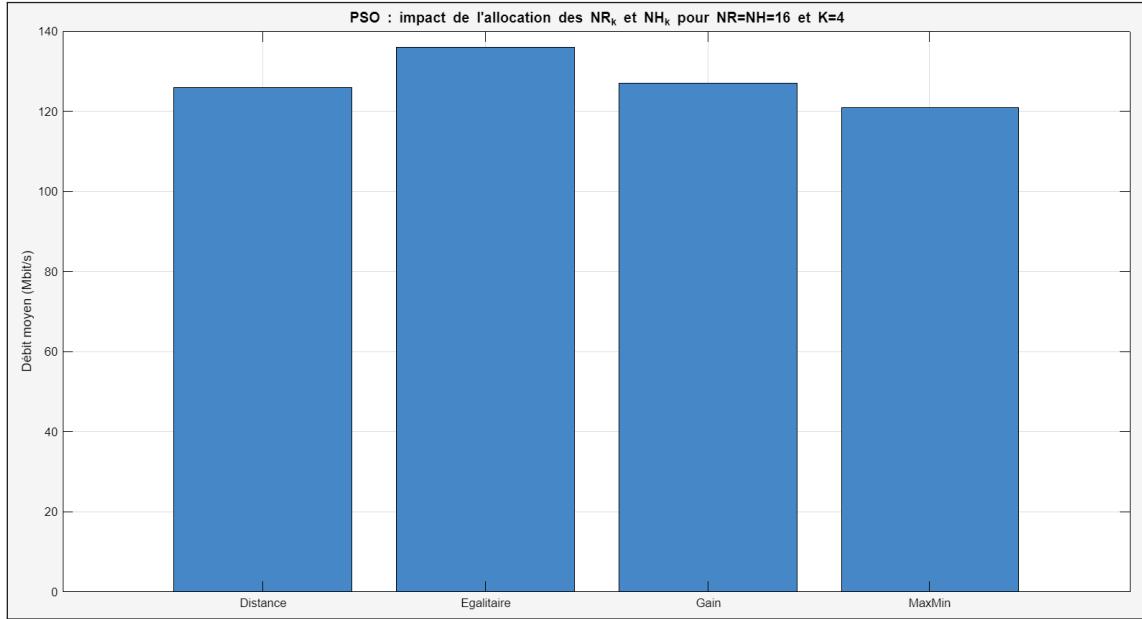


Figure 4.3 Débit total moyen vs. stratégie d'assignation des éléments RIS et antennes HAPS (Méthode PSO).

La figure 4.4 confirme la tendance observée avec sous WOA, où l'allocation égalitaire demeure la plus performante avec un débit moyen d'environ 145 Mbps. Les stratégies d'assignation basées sur le gain de canal et la distance suivent, autour de 135 Mbps, tandis que l'allocation Max–Min est la moins performante avec 129 Mbps. Comparés à PSO et Baseline, les performances de WOA sont meilleures pour n'importe quelle stratégie d'assignation.

Enfin, la figure 4.5 présente les débits moyens obtenus avec l'algorithme AO. Le classement reste identique où l'allocation égalitaire arrive en tête avec un débit égal à 143 Mbps. Elle devance les stratégies basées sur le gain de canal (139 Mbps) et sur la distance (138 Mbps), alors que le mode Max–Min réalise une performance de seulement 132 Mbps. En comparaison avec WOA, PSO, et Baseline, on voit que pour une stratégie d'assignation donnée, AO soit dépassé les autres méthodes (ex : pour stratégies basées sur la distance ou le gain de canal), ou

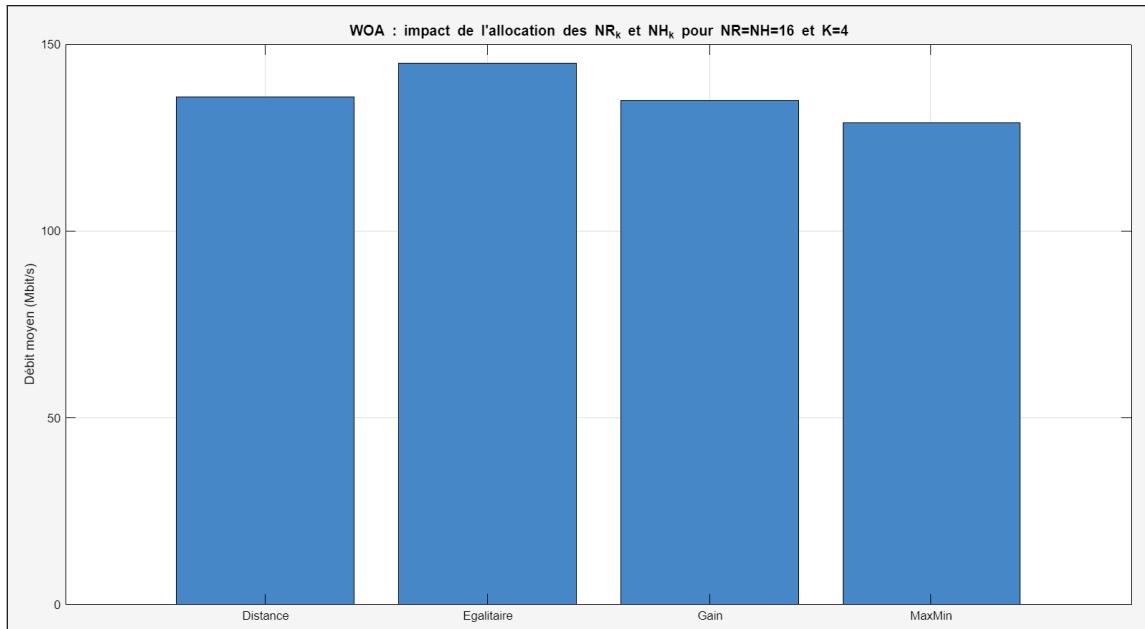


Figure 4.4 Débit total moyen vs. stratégie d’assignation des éléments RIS et antennes HAPS (Méthode WOA).

similaire à WOA (ex : pour l’assignation égalitaire). Ceci démontre que AO et WOA, combinés à l’assignation égalitaire des éléments RIS et antennes HAPS, sont potentiellement les meilleures techniques pour la résolution du problème formulé.

Dans ce qui suit, les résultats seront présentés pour les méthodes Baseline, PSO, WOA, et AO, combinés à l’assignation égalitaire des éléments RIS et antennes HAPS.

4.4 Étude de convergence des méthodes métahéuristiques

Il est essentiel d’examiner le comportement de convergence des différentes méthodes d’optimisation étudiées. L’objectif est de comparer leur stabilité, leur vitesse de convergence, ainsi que les performances atteintes en terme de débit total sur le lien montant. Pour cela, nous avons exécuté chaque algorithme sur une même réalisation de canal, avec un nombre d’éléments fixé à $N_R = N_H = 16$ et une puissance de transmission $P_k = P_{\max} = 40$ dBm.

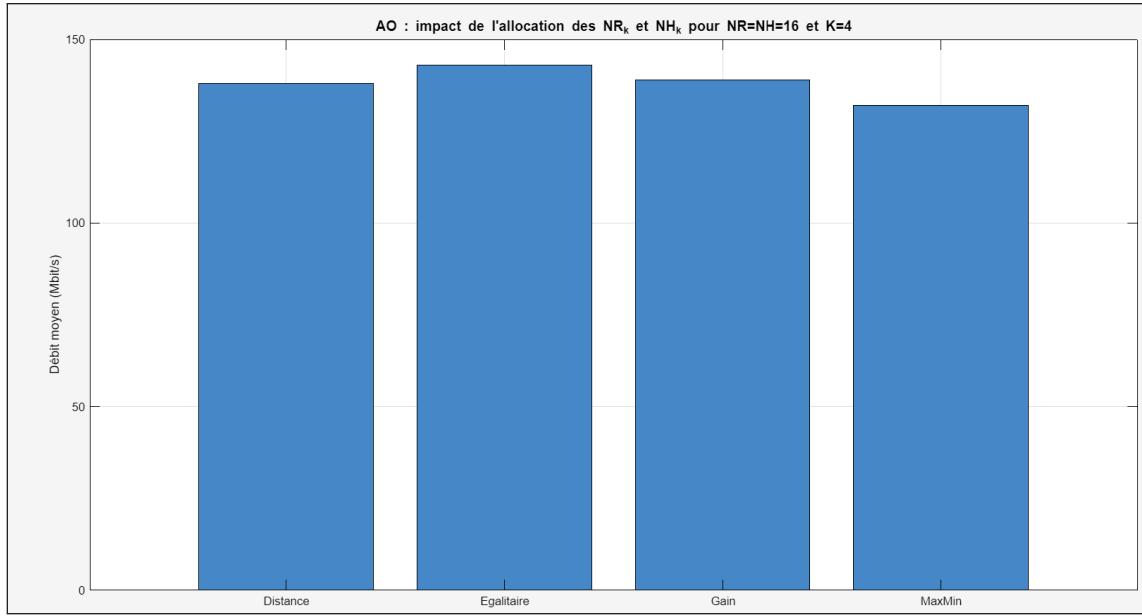


Figure 4.5 Débit total moyen vs. stratégie d'assignation des éléments RIS et antennes HAPS (Méthode AO).

La figure 4.6 illustre l'évolution du débit total (en Mbps) en fonction du nombre d'itérations pour les différentes méthodes d'optimisation. On note d'abord que la méthode WOA (en violet) converge vers une valeur stable de 18976,0771095 Mbps, atteinte dès la 1472^{ème} itération. Malgré des fluctuations importantes en début d'exécution, elle parvient à stabiliser sa performance, ce qui reflète une capacité correcte d'exploitation de l'espace de recherche dans notre scénario.

La méthode PSO (en rouge) se distingue par une convergence extrêmement rapide, atteignant un débit de 17765,12369 Mbps dès la 65^{ème} itération. Ce comportement témoigne d'une efficacité remarquable à identifier des configurations quasi-optimales en très peu de cycles, grâce à l'exploitation efficace des vitesses individuelles et globales des particules.

En revanche, la méthode AO (en noir) montre une augmentation rapide du débit de données total au cours des premières itérations, suivie d'une stabilisation à mesure qu'elle se rapproche de la solution optimale dépassant les 190 Mbps, précisément 191,470 Mbps à la 87^{ème} itération. Ce comportement confirme le modèle de convergence attendu de l'AO, qui résulte de l'optimisation séquentielle de la répartition de la puissance d'émission et des déphasages RIS. Les résultats

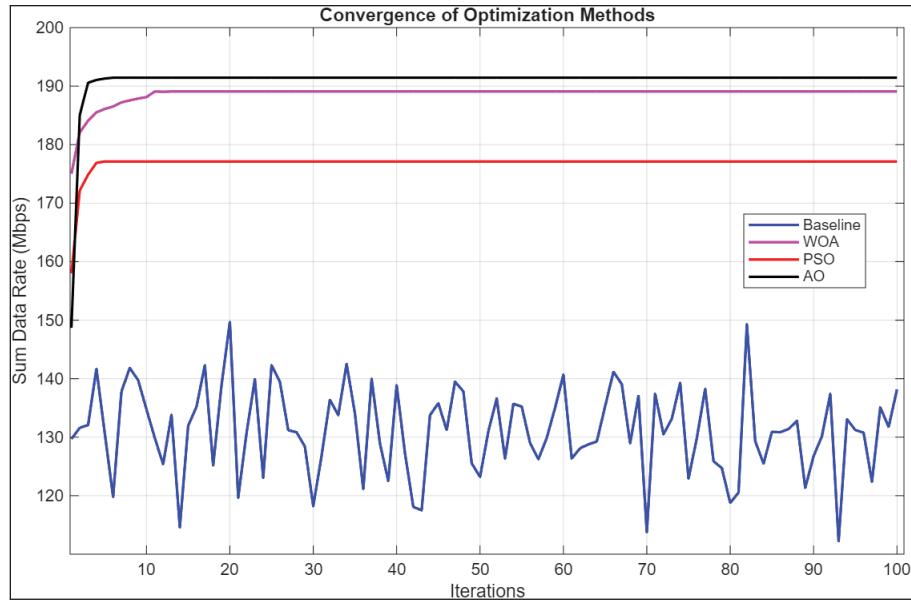


Figure 4.6 Courbes de convergence des méthodes d’optimisation ($N_H = N_R = 16$ et $P_{\max} = 40$ dBm).

actualisés montrent que l’AO surpassé les méthodes de référence, PSO et WOA, tant en termes de vitesse de convergence que de débit de données total final, soulignant son efficacité dans ce scénario de liaison montante HAPS assistée par RIS.

En ce qui concerne la méthode Baseline (en bleu), elle présente une forte instabilité au cours des itérations, avec des fluctuations aléatoires de somme de débits. Cela s’explique par sa nature non itérative, puisqu’à chaque itération, une nouvelle configuration aléatoire des phases RIS et des puissances est générée, sans mécanisme d’apprentissage ou de mémorisation. Par conséquent, la méthode n’affiche aucune tendance claire de convergence et reste significativement inférieure en performance comparée aux autres techniques. Elle sert principalement de point de référence pour évaluer les gains des autres algorithmes.

4.5 Analyse de l’impact des paramètres système

Nous analysons ic l’évolution de la somme des débits obtenue par chaque méthode en faisant varier certains paramètres clés du système. Plus précisément, nous étudions l’impact du nombre

d'éléments du RIS (N_R), du nombre d'antennes du HAPS (N_H), ainsi que de la puissance maximale de transmission (P_{\max}) sur les performances globales.

4.5.1 Variation du nombre d'éléments RIS

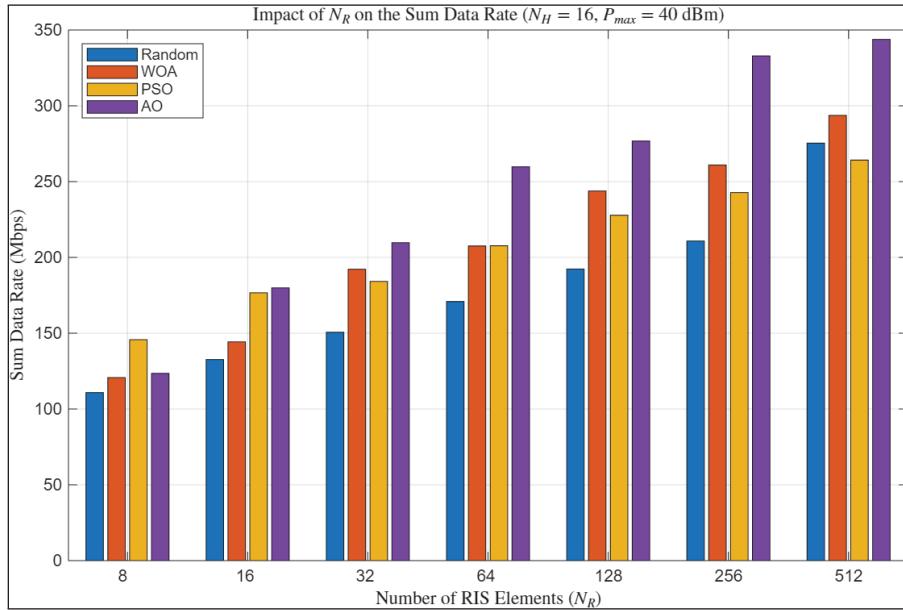


Figure 4.7 Débit total moyen vs. N_R (différentes méthodes).

La figure 4.7 présente l'impact de variation du nombre d'éléments RIS N_R sur l'évolution de la somme des débits pour les méthodes Baseline, AO, WOA et PSO pour N_H fixé à 16 antennes et $P = P_{\max} = 40 \text{ dBm}$. Dans notre configuration, ces éléments sont partagés équitablement entre les utilisateurs, de sorte que chaque utilisateur dispose de $N_R^k = N_R/4$.

Selon la figure 4.7, on observe une nette amélioration du débit avec l'accroissement de N_R , confirmant l'intérêt d'un RIS plus dense pour une réflexion plus fine et efficace des signaux. En particulier, l'algorithme AO atteint des performances remarquables dès $N_R = 16$ avec un débit de 179,912 Mbps, pour atteindre 343,83 Mbps à $N_R = 512$. La méthode WOA suit une évolution similaire et relativement proche, atteignant 329,697 Mbps pour $N_R = 512$. La méthode PSO, bien qu'ayant une croissance significative de 145,745 ($N_R = 8$) à 264,187 Mbps ($N_R = 512$), semble un peu plus affectée par l'augmentation de la dimension du problème,

possiblement en raison d'un équilibre moins optimal entre exploration et exploitation, elle prend toutefois la tête au point $N_R = 8$ car l'espace discret des phases est alors suffisamment réduit pour qu'une particule explore quasi-exhaustivement les combinaisons et tombe rapidement sur la configuration optimale, tandis que l'optimisation locale d'AO peut rester bloquée sur un optimum voisin. Quant à la méthode Baseline, elle présente une légère oscillation du débit total des données autour d'une valeur moyenne, traduisant une sensibilité à l'initialisation. De plus, bien qu'une augmentation du nombre d'éléments RIS N_R améliore globalement le résultat, elle ne parvient pas à exploiter pleinement le potentiel du système. En d'autres termes, elle bénéficie marginalement de l'augmentation de N_R .

4.5.2 Variation du nombre d'antennes HAPS

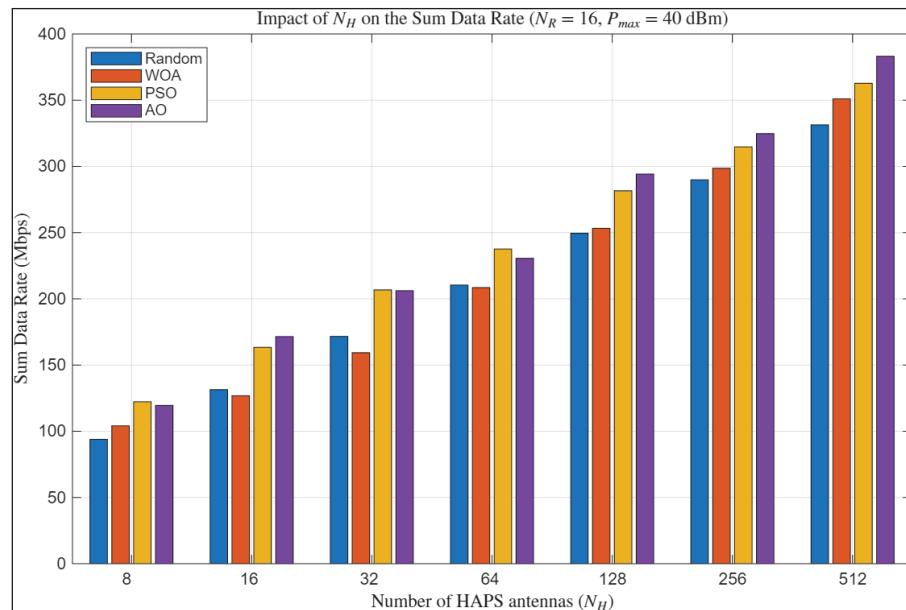


Figure 4.8 Débit total moyen vs. N_H (différentes méthodes).

La figure 4.8 ci-dessus illustre l'évolution du débit total en fonction du nombre d'antennes du HAPS, N_H , en maintenant $N_R = 16$ et $P = P_{\max} = 40 \text{ dBm}$. Toutes les méthodes bénéficient de l'augmentation de N_H , ce qui est attendu puisque davantage d'antennes au HAPS permettent une amélioration du SNR reçu sur la liaison montante.

On observe une progression quasi-linéaire du débit pour toutes les méthodes, bien que leurs performances respectives varient sensiblement. La méthode AO surpassé systématiquement toutes les autres, atteignant jusqu'à 383,186 Mbps pour $N_H = 512$, confirmant ainsi sa capacité à optimiser conjointement les phases du RIS et les puissances de transmission des utilisateurs. Les résultats de PSO suivent de près AO (avec préférence à certaines valeurs N_H comme $N_H = 8$ et $N_H = 64$). À $N_H = 8$, l'espace discret des phases reste assez réduit ; le nuage de particules explore rapidement presque toutes les combinaisons possibles et peut tomber sur le réglage optimal avant que AO, qui progresse élément par élément, n'y parvienne. À l'autre extrémité, lorsque $N_H = 64$, le lien HAPS-RIS devient très directif d'où une configuration de phases "rare" suffit alors à concentrer encore davantage l'énergie, et la recherche globale de PSO a davantage de chances de découvrir cette combinaison précise, tandis que l'ajustement local de AO se stabilise sur un optimum voisin. La méthode WOA présente des performances moins bonnes, mais tout de même proches de celles de PSO et AO, surtout pour des valeurs de N_H élevées. Enfin, la méthode Baseline, bien qu'elle montre aussi une amélioration progressive du débit avec N_H de 93.925 Mbps ($N_H = 8$) à 331.403 Mbps ($N_H = 512$), reste significativement en retrait par rapport aux autres méthodes. Notons que dans cette étude, le nombre d'antennes HAPS attribuées par utilisateur N_H^k augmente proportionnellement à N_H en adoptant l'assignation égalitaire. Cela permet à chaque utilisateur de bénéficier d'un lien HAPS-RIS plus performant, ce qui se reflète dans l'augmentation des performances observées.

4.5.3 Variation de la puissance de transmission

La figure 4.9 présente le débit total en fonction de la puissance maximale P_{\max} assignée à chaque utilisateur, en considérant $N_R = N_H = 16$. Il est clair que l'augmentation de la puissance maximale P_{\max} a un effet positif sur la somme des débits pour l'ensemble des méthodes étudiées pour N_R et N_H fixé à 16 éléments et 16 antennes.

On observe que la méthode AO réalise les meilleurs débits pour quasiment toutes les valeurs de P_{\max} , tandis que PSO et WOA suivent de près pour atteindre à $P_{\max} = 60$ dBm, 177 Mbps et 173 Mbps, respectivement. Une légère inversion apparaît toutefois à $P_{\max} = 40$ dBm de sorte

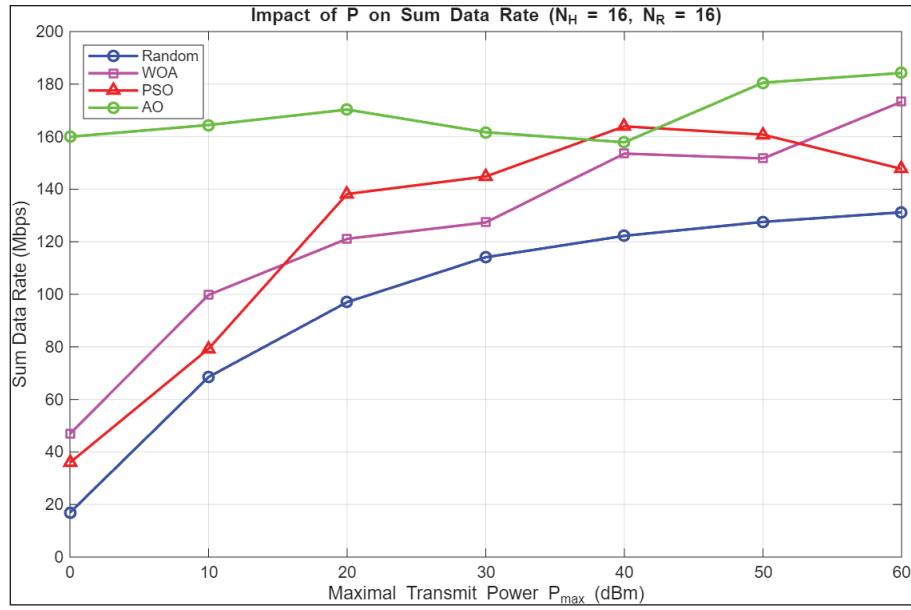


Figure 4.9 Débit total moyen vs. P_{\max} (différentes méthodes).

qu PSO dépasse AO, car le bruit est déjà faible sans que le système soit encore saturé, la recherche globale de PSO explore d'un seul coup l'espace discret des phases RIS et a ainsi plus de chances de trouver la combinaison rare qui procure encore quelques Mbps supplémentaires, tandis que AO, plus local, se stabilise sur un optimum voisin. En dehors de ce point, WOA reste systématiquement la méthode la plus proche de AO puisque son équilibre exploration lui permet de suivre la tendance de AO sans toutefois le dépasser. En revanche, la méthode Baseline s'améliore également avec la puissance, mais reste significativement en retrait par rapport aux autres approches. Elle passe d'environ 17 Mbps à plus de 131 Mbps, ce qui montre qu'un simple tirage aléatoire peut bénéficier d'un gain de puissance, sans pour autant rivaliser avec des stratégies d'optimisation ciblée. Enfin, pour toutes les méthodes, un niveau de saturation de performances est atteint suggérant que la limitation de P_{\max} à 40 ou 50 dBm est suffisant.

4.6 Discussion

L'analyse des résultats met en évidence les atouts et limites spécifiques de chaque méthode d'optimisation testée dans notre système RIS–HAPS. Le débit total en liaison montante reste une

métrique centrale, mais ne peut être interprété indépendamment de la dynamique de convergence, du coût computationnel ou de la robustesse des algorithmes.

La méthode AO se distingue par ses performances, affichant les meilleurs débits dans la majorité des scénarios. Toutefois, contrairement à PSO et WOA, elle ne montre pas une convergence stricte dans la courbe de performance. Ce comportement peut sembler déroutant, mais il est en réalité cohérent avec la nature même de l'approche AO, qui repose sur l'optimisation alternée de sous-problèmes non convexes (puissances et phases RIS). L'absence d'un critère global unique et la dépendance à l'initialisation induisent des oscillations naturelles entre deux solutions localement optimales. Ces variations ne traduisent pas un échec de la méthode, mais plutôt une dynamique propre à des problèmes complexes, où une convergence stricte est rarement garantie sans relaxation des contraintes ou simplification du modèle.

À l'inverse, la méthode PSO montre une convergence rapide vers un plateau de performance dès les premières itérations, ce qui en fait un excellent choix dans des contextes où la rapidité de décision est primordiale. Cependant, sa solution finale demeure légèrement inférieure à celle de l'AO, et sa sensibilité à la configuration des particules reste un point de vigilance.

La méthode WOA, quant à elle, offre un équilibre intéressant entre stabilité et efficacité. Sa montée progressive vers un débit total élevé reflète sa capacité à explorer efficacement l'espace de recherche tout en maintenant une dynamique convergente. Son compromis entre performance et stabilité la rend adaptée à des contextes nécessitant des résultats robustes sans surcoût computationnel excessif.

Enfin, la méthode Baseline, fondée sur une allocation aléatoire des ressources, reste utile comme point de référence. Bien qu'elle bénéficie de l'augmentation des ressources système, ses résultats restent nettement en dessous des approches optimisées, confirmant qu'une stratégie non guidée ne permet pas de tirer parti du potentiel offert par les RIS et le HAPS.

En conclusion, AO constitue une solution puissante malgré une convergence fluctuante, WOA apporte une stabilité appréciée, PSO se démarque par sa rapidité, et la méthode Baseline sert

de référence de comparaison. Le choix final dépendra donc du compromis visé entre précision, vitesse d'exécution et robustesse.

4.7 Conclusion

Ce chapitre a permis d'évaluer de manière approfondie les performances des différentes méthodes d'optimisation implémentées pour améliorer la somme des débits sur la liaison montante d'un système RIS-HAPS supportant des utilisateurs multiples.

À travers des analyses variées, nous avons examiné l'impact de plusieurs paramètres système tels que le nombre d'éléments RIS, le nombre d'antennes HAPS et la puissance maximale. Les résultats montrent clairement la supériorité des approches optimisées, en particulier AO.

Chaque méthode présente des avantages distincts en termes de performance, de rapidité de convergence et de coût computationnel, soulignant ainsi l'importance de choisir une stratégie adaptée au contexte opérationnel.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Dans ce mémoire, nous avons étudié un système de communication combinant station stratosphérique (HAPS) et surface intelligente reconfigurable (RIS), dans un contexte multi-utilisateur avec partage des ressources RIS et HAPS. Après avoir modélisé le canal selon une distribution Nakagami- m , plusieurs stratégies d'optimisation ont été développées et comparées. Les méthodes méta-heuristique (WOA et PSO) ont montré des performances intéressantes, bien que parfois coûteuses en temps de calcul. L'algorithme AO se distingue comme un bon compromis entre efficacité et temps d'exécution, tandis que la méthode Baseline a servi de point de référence. Les simulations ont permis d'évaluer l'impact de divers paramètres sur les performances du système. Ce travail ouvre la voie à des perspectives d'amélioration, notamment via l'intégration de techniques d'optimisation hybrides ou adaptatives tenant compte de la dynamique du canal de communication montant en temps réel et à l'exploitation d'algorithmes plus avancés pour trouver l'allocation optimale des ressources, ce qui pourrait conduire à des résultats améliorés.

LISTE DE RÉFÉRENCES

- Abu-Shaban, Z., Zhou, X., Abhayapala, T., Seco-Granados, G. & Wymeersch, H. (2018). Performance of location and orientation estimation in 5G mmWave systems : Uplink vs downlink. *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 1-6. doi : 10.1109/WCNC.2018.8376990.
- Acharya, T., Abhilash, S., Ghosh, S. & Chandra, T. (2024). Downlink Rate Coverage Probability Analysis for HAP Assisted Backhauling of Small Cells Using 3GPP 3D Channel Models. *2024 International Conference on Signal Processing and Communications (SPCOM)*, pp. 1–5.
- Ahmadi, H., Katzis, K. & Shakir, M. Z. (2017). A novel airborne self-organising architecture for 5G+ networks. *2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, pp. 1–5.
- Airbus. (2024). Zephyr : The world's leading solar-electric stratospheric UAV. Repéré à <https://www.airbus.com/en/products-services/defence/uas/zephyr>.
- Albagory, Y., Nofal, M. & Ghoneim, A. (2015). Handover performance of unstable-yaw stratospheric high-altitude stations. *Wireless Personal Communications*, 84, 2651–2663.
- Alfattani, S., Jaafar, W., Hmamouche, Y., Yanikomeroglu, H. & Yongaçoglu, A. (2021). Link budget analysis for reconfigurable smart surfaces in aerial platforms. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2, 1980–1995.
- Alsamhi, S. H. & Rajput, N. (2015). An intelligent hand-off algorithm to enhance quality of service in high altitude platforms using neural network. *Wireless Personal Communications*, 82, 2059–2073.
- Alsharoa, A. & Alouini, M.-S. (2020). Improvement of the global connectivity using integrated satellite-airborne-terrestrial networks with resource optimization. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 19(8), 5088–5100.
- Anicho, O., Charlesworth, P. B., Baicher, G. S., Nagar, A. & Buckley, N. (2019). Comparative study for coordinating multiple unmanned HAPS for communications area coverage. *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 467–474.
- Assembly, I. R. (2015). F1500 : Preferred characteristics of systems in the fixed service using high altitude platforms operating in the bands 47.2-47.5 GHz and 47.9-48.2 GHz. *ITU-R F*, 1500, 1–12.
- Belmekki, B. E. Y., Trichili, A., Ooi, B. S. & Alouini, M.-S. (2023). Harnessing the potential of optical communications for the metaverse. *arXiv preprint arXiv :2306.12822*, 1–11.

Belmekki, B. E. Y., Aljohani, A. J., Althubaity, S. A., Harthi, A. A., Bean, K., Aijaz, A. & Alouini, M.-S. (2024). Cellular Network From the Sky : Toward People-Centered Smart Communities. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 5, 1916-1936. doi : 10.1109/OJCOMS.2024.3378297.

Bensoussan, D. & Le Mouroux, A. (2026). *Réseaux mobiles et satellitaires : principes, calculs et simulations*. PUQ.

Bezdek, J. C. & Hathaway, R. J. (2002). Some notes on alternating optimization. *Advances in Soft Computing—AFSS 2002 : 2002 AFSS International Conference on Fuzzy Systems Calcutta, India, February 3–6, 2002 Proceedings*, pp. 288–300.

Burns, A. J., Johnson, M., Jung, J. & Fladeland, M. (2023). *High Altitude Platform System (HAPS) Communication Support for Wildland Firefighting Annual Estimates and Considerations* (Rapport n°NASA/TM-20230018267). Repéré à <https://ntrs.nasa.gov/citations/20230018267>.

Chen, K., Zhao, S., Lv, N., Gao, W., Wang, X. & Zou, X. (2019). Segment routing based traffic scheduling for the software-defined airborne backbone network. *IEEE Access*, 7, 106162–106178.

Dang, S., Amin, O., Shihada, B. & Alouini, M.-S. (2020). What should 6G be ? *Nature Electronics*, 3(1), 20–29.

Das, S. K., Benkhelifa, F., Sun, Y., Abumarshoud, H., Abbasi, Q. H., Imran, M. A. & Mohjazi, L. (2023). Comprehensive review on ML-based RIS-enhanced IoT systems : basics, research progress and future challenges. *Computer Networks*, 224, 109581. doi : <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109581>.

Di Renzo, M., Zappone, A., Debbah, M., Alouini, M.-S., Yuen, C., de Rosny, J. & Tretyakov, S. (2020). 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(11), 2450-2525. doi : 10.1109/JSAC.2020.3007211.

Feng, Y., Hu, Q., Qu, K., Yang, W., Zheng, Y. & Chen, K. (2023). Reconfigurable Intelligent Surfaces : Design, Implementation, and Practical Demonstration. *Electromagnetic Science*, 1(2), 1-21. doi : 10.23919/emsci.2022.0011.

Gong, S., Lu, X., Hoang, D. T., Niyato, D., Shu, L., Kim, D. I. & Liang, Y.-C. (2020). Toward Smart Wireless Communications via Intelligent Reflecting Surfaces : A Contemporary Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(4), 2283-2314. doi : 10.1109/COMST.2020.3004197.

- Google. (2021). Loon : Beaming the internet with stratospheric balloons. Repéré le 2025-05-30 à <https://x.company/projects/loon/>.
- Harinitha, D., Zakia, I., Kurniawan, A. et al. (2022). Effect of Different Locations of Millimeter Wave HAPS on the Downlink Sum Rate. *2022 16th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA)*, pp. 1–5.
- Hoshino, K., Sudo, S. & Ohta, Y. (2019). A study on antenna beamforming method considering movement of solar plane in HAPS system. *2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*, pp. 1–5.
- Hu, C.-N., Li, Q.-C., Ho, P.-Y., Hsu, F.-S., Chou, K.-C., Cheng, W.-J., Chang, C.-H. & Wan, P.-S. (2024). Passive Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) for Enhanced Wireless Communications. *2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, pp. 1-4. doi : 10.1109/PIERS62282.2024.10618377.
- Huang, J.-j., Wang, W.-t. & Ferng, H.-w. (2007). Uplink capacity enhancement for an integrated HAPS-terrestrial CDMA system. *IEEE Communications Letters*, 11(1), 10-12. doi : 10.1109/LCOMM.2007.316209.
- InceptiveMind. (2020). HAPSMobile's Sunglider reaches stratospheric altitude, demos broadband connectivity. Repéré à <https://www.inceptivemind.com/hapsmobiles-sunglider-reaches-stratospheric-altitude-demos-broadband-connectivity/15662/>.
- Jang, G. & Choi, J. P. (2025). HAPS altitude optimization for downlink communications : Alleviating the effect of channel elevation angles. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1-11.
- Jiang, W., Han, B., Habibi, M. A. & Schotten, H. D. (2021). The Road Towards 6G : A Comprehensive Survey. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2, 334-366. doi : 10.1109/OJCOMS.2021.3057679.
- Kaur, J. & Khan, M. A. (2022). Sixth generation (6G) wireless technology : An overview, vision, challenges and use cases. *2022 IEEE region 10 symposium (TENSYMP)*, pp. 1–6.
- Kennedy, J. & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*, 4, 1942–1948.
- Khala, T. A. & Zekavat, S. A. (2007). On the Error Floor of MC-CDMA Systems over Rayleigh Fading Channels : Uplink vs. Downlink. *2007 IEEE International Conference on Signal Processing and Communications*, pp. 476-479. doi : 10.1109/ICSPC.2007.4728359.

- Kim, J., Choi, S. & Chung, H. (2024). Moving Reconfigurable Intelligent Surfaces : A Promising Frontier for 6G Communications. *2024 Fifteenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, pp. 233-237. doi : 10.1109/ICUFN61752.2024.10624985.
- Konishi, M., Nishimaki, T., Shibata, Y., Nabatame, S. & Nagate, A. (2020). An experimental study of uplink co-channel spectrum-sharing system between HAPS and terrestrial mobile communication networks. *2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall)*, pp. 1-5.
- Kundu, A. M., Pal, R., Kumar, M. & Sreejith, T. (2020). Uplink and Downlink Performance Bounds for Full Duplex Cellular Networks. *2020 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, pp. 1-6. doi : 10.1109/BlackSeaCom48709.2020.9235024.
- Kurt, G. K., Khoshkholgh, M. G., Alfattani, S., Ibrahim, A., Darwish, T. S., Alam, M. S., Yanikomeroglu, H. & Yongacoglu, A. (2021). A vision and framework for the high altitude platform station (HAPS) networks of the future. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23(2), 729–779.
- Li, Z., Chen, W., Wu, Q., Zhu, X., Qin, H., Wang, K. & Li, J. (2024). Toward Transmissive RIS Transceiver Enabled Uplink Communication Systems : Design and Optimization. *IEEE Internet of Things Journal*, 11(4), 6788-6801. doi : 10.1109/JIOT.2023.3312776.
- Liaskos, C., Nie, S., Tsioliaridou, A., Pitsillides, A., Ioannidis, S. & Akyildiz, I. (2018). A new wireless communication paradigm through software-controlled metasurfaces. *IEEE communications magazine*, 56(9), 162–169.
- LinkedIn. [Accessed : 2025-06-18]. (2025). HAPS-RIS : Empowering the Next Wave of 6G Innovation. Repéré à <https://www.linkedin.com/pulse/haps-ris-empowering-next-wave-6g-innovation-arman-azizi-syhve/>.
- Liu, Y., Liu, X., Mu, X., Hou, T., Xu, J., Di Renzo, M. & Al-Dhahir, N. (2021). Reconfigurable Intelligent Surfaces : Principles and Opportunities. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23(3), 1546-1577. doi : 10.1109/COMST.2021.3077737.
- Lou, Z., Belmekki, B. E. Y. & Alouini, M.-S. (2023). HAPS in the non-terrestrial network nexus : Prospective architectures and performance insights. *IEEE Wireless Communications*, 30(6), 52–58.
- Mihret, E. & Haile, G. (2021). 4G, 5G, 6G, 7G and Future Mobile Technologies. *J Comp Sci Info Technol*, 9(2), 75.

- Mirjalili, S. & Lewis, A. (2016). The whale optimization algorithm. *Advances in engineering software*, 95, 51–67.
- NASA. (1993). Dirigible Returns to Moffett as People Watch (1933). Repéré à <https://images.nasa.gov/details/ARC-1993-A83-0499-24>.
- NASA. (2013). A high altitude balloon is prepared for launch at NASA's Columbia Scientific Balloon Facility. Repéré à <https://images.nasa.gov/details/KSC-2013-3113>.
- Odeyemi, K. O., Owolawi, P. A. & Olakanmi, O. O. (2022). Reconfigurable intelligent surface-assisted HAPS relaying communication networks for multiusers under AF protocol : A performance analysis. *IEEE Access*, 10, 14857–14869.
- Ren, Q., Abbasi, O., Kurt, G. K., Yanikomeroglu, H. & Chen, J. (2023). Handoff-aware distributed computing in high altitude platform station (HAPS)-assisted vehicular networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 22(12), 8814–8827.
- Rivera, M., Jaafar, W. & Yanikomeroglu, H. (2023). Optimization of RIS-Assisted RSMA-Enabled Tethered-UAV Communications. *2023 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp. 227-232. doi : 10.1109/GCWkshps58843.2023.10464977.
- Saad, W., Bennis, M. & Chen, M. (2020). A Vision of 6G Wireless Systems : Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems. *IEEE Network*, 34(3), 134-142. doi : 10.1109/MNET.001.1900287.
- Shafi, M., Jha, R. K. & Jain, S. (2024). 6G : Technology evolution in future wireless networks. *IEEE Access*, 57548–57573.
- Shah, A. S. (2022). A survey from 1G to 5G including the advent of 6G : Architectures, multiple access techniques, and emerging technologies. *2022 IEEE 12th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, pp. 1117–1123.
- Shaik, P., Garg, K. K., Singya, P. K., Bhatia, V., Krejcar, O. & Alouini, M.-S. (2024). On performance of integrated satellite HAPS ground communication : Aerial IRS node vs terrestrial IRS node. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 3775-3791.
- SoftBank Group Corp. (2025). SoftBank and Sceye to Launch HAPS-based Connectivity Service in 2025. Repéré à https://www.softbank.jp/en/corp/news/press/sbkk/2025/20250626_01/.
- Solyman, A. A. A. & Yahya, K. (2022). Evolution of wireless communication networks : from 1G to 6G and future perspective. *International journal of electrical and computer engineering*, 12(4), 3943–3950.

- Tabassum, H., Ali, M. S., Hossain, E., Hossain, M. J. & Kim, D. I. (2017). Uplink Vs. Downlink NOMA in Cellular Networks : Challenges and Research Directions. *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp. 1-7. doi : 10.1109/VTCSpring.2017.8108691.
- Tanash, I. M., Dwivedi, A. K. & Riihonen, T. (2024). Integrating RIS into HAP Networks for Improved Connectivity. *2024 6th International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT)*, pp. 1–6.
- Thales Alenia Space. (2024). Observe & Protect. Repéré à <https://www.thalesaleniaspace.com/en/what-we-do/observe-protect>.
- Tozer, T. C. & Grace, D. (2001). High-altitude platforms for wireless communications. *Electronics & communication engineering journal*, 13(3), 127–137.
- Yilmaz, A., Yilmaz, N., Kalem, G. & Durmaz, M. A. (2023). Path Gain and Channel Capacity for HAP-to-HAP Communications. *2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 305-312. doi : 10.1109/ICUAS57906.2023.10155817.
- Zhang, B., Yang, K., Wang, K. & Zhang, G. (2022). Performance analysis of RIS-assisted wireless communications with energy harvesting. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 72(1), 1325–1330.
- Zhou, Y., Meng, X. & Wang, J. (2023). Downlink performance enhancement of MIMO aid HAPS as IMT base station. *2023 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, pp. 1–6.