

Coordination des ressources radio dans les réseaux multi-UAV directionnels avec réutilisation spectrale

par

Eya KHOUALDIA

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

MONTREAL, LE 14 JUILLET 2026

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Eya Khoualdia, 2026



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. Kim Khoa Nguyen, directeur de mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Mohamed Cheriet, codirecteur
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

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

M. Aris Leivadeas, 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 3 JUILLET 2026

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de recherche, M. Kim Khoa Nguyen, pour la qualité de son encadrement, sa disponibilité constante ainsi que ses conseils avisés tout au long de la réalisation de ce mémoire. Ses orientations, ses remarques constructives et son exigence scientifique ont grandement contribué à l'amélioration de ce travail.

J'adresse également mes sincères remerciements à mon codirecteur, M. Mohamed Cheriet, pour son accompagnement précieux, ses remarques pertinentes, sa disponibilité ainsi que son soutien tout au long de ce travail. Son aide et ses conseils ont été très importants dans l'avancement et l'amélioration de ce mémoire.

Je remercie du fond du cœur mes premiers supporteurs, mes parents, dont l'amour, les sacrifices, la confiance et les encouragements m'ont permis d'arriver à cette étape importante de mon parcours. Je leur dois une grande partie de ce que je suis aujourd'hui.

J'adresse aussi mes chaleureux remerciements à mes frères, pour leur soutien, leur présence et leurs encouragements constants tout au long de ce chemin.

Je tiens également à remercier mon fiancé pour sa patience, son soutien, sa compréhension et ses encouragements précieux durant cette période.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Coordination des ressources radio dans les réseaux multi-UAV directionnels 5G avec réutilisation spectrale

Eya KHOUALDIA

RÉSUMÉ

Les véhicules aériens sans pilote (UAV) apparaissent aujourd'hui comme une solution prometteuse pour renforcer la couverture et la capacité des réseaux sans fil de nouvelle génération. Cependant, dans un environnement multi-UAV partageant une même bande de fréquences, la réutilisation des ressources radio, l'orientation directionnelle des faisceaux et le contrôle de puissance génèrent une forte interdépendance entre les liaisons et rendent la gestion des interférences particulièrement complexe.

Bien que la coordination des ressources radio ait été largement étudiée dans les réseaux sans fil, les approches existantes reposent souvent sur des hypothèses simplifiées ou sur des conceptions partiellement découplées, ce qui limite leur capacité à représenter explicitement le couplage entre orientation des faisceaux, allocation des ressources, contrôle de puissance et interférences dans les scénarios multi-UAV directionnels.

Ce travail étudie la coordination radio dans un réseau multi-UAV directionnel en liaison descendante, dans un cadre quasi-statique où les positions des UAV sont supposées données. Un modèle système intégrant la propagation tridimensionnelle, le gain directionnel des antennes, la réutilisation spectrale structurée des ressources radio, ainsi que le calcul du SINR, est d'abord développé.

Afin de traiter ce problème dans le scénario considéré, une procédure de coordination radio par blocs avec acceptation sous contraintes est proposée. Cette procédure met successivement à jour l'orientation des faisceaux, l'allocation des ressources radio et les puissances de transmission. À chaque étape, une configuration candidate est évaluée à partir du SINR, des contraintes du problème et du débit total. Elle est retenue uniquement si elle respecte les contraintes et si elle

améliore ou conserve la performance courante. L'objectif est ainsi d'obtenir une configuration radio faisable et non dégradante dans un scénario contrôlé, sans revendiquer l'optimalité globale du problème général.

Les résultats numériques obtenus dans un scénario contrôlé suggèrent une meilleure gestion effective des interférences inter-UAV et une amélioration du débit global par rapport à des stratégies partiellement découplées. Le comportement itératif observé montre une réduction progressive des variations du débit dans le scénario étudié, ce qui traduit une stabilisation numérique de la procédure sans constituer une preuve d'optimalité globale.

Mots-clés : UAV, SINR, beam steering, contrôle de puissance, allocation des ressources, réutilisation spectrale, coordination radio, réseaux sans fil

Radio Resource Coordination in Directional Multi-UAV Networks with Spectrum Reuse

Eya KHOUALDIA

ABSTRACT

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have recently emerged as a promising solution for enhancing the coverage and capacity of next-generation wireless networks. However, in multi-UAV environments operating over a shared frequency band, radio resource reuse, directional beam steering, and transmit power control create strong interdependencies among communication links, making interference management particularly challenging.

Although radio resource coordination has been widely investigated in wireless networks, existing approaches often rely on simplified assumptions or partially decoupled designs, which limit their ability to explicitly represent the coupling between beam steering, resource allocation, power control, and interference in directional multi-UAV scenarios.

This work studies radio coordination in a directional multi-UAV downlink network within a quasi-static framework, where UAV positions are assumed to be given. A system model integrating three-dimensional propagation, directional antenna gain, structured spectrum reuse of radio resources, and SINR evaluation is first developed.

To address this problem in the considered scenario, a block-based radio coordination procedure with constraint-aware acceptance is proposed. The procedure successively updates beam steering, radio resource allocation, and transmit power decisions. At each step, a candidate configuration is evaluated based on the SINR, the problem constraints, and the total throughput. The candidate configuration is retained only if it satisfies the constraints and improves or preserves the current performance. The objective is therefore to obtain a feasible and non-degrading radio configuration in a controlled scenario, without claiming global optimality for the general problem.

Numerical results obtained in a controlled scenario suggest improved effective inter-UAV interference management and increased overall throughput compared with partially decoupled strategies. The observed iterative behavior shows a progressive reduction of throughput variations in the considered scenario, reflecting numerical stabilization of the procedure without constituting a proof of global optimality.

Keywords : UAV, SINR, beam steering, power control, resource allocation, spectrum reuse, radio coordination, wireless networks.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 CONTEXTE GÉNÉRAL ET NOTIONS DE BASE	3
1.1 Présentation du chapitre	3
1.2 Définitions et notions de base	3
1.2.1 Réseaux 5G et exigences radio	3
1.2.2 UAV comme stations de base aériennes	4
1.2.3 Beam steering et antennes directionnelles	5
1.2.4 Réutilisation des ressources radio	6
1.2.5 SINR comme métrique de qualité de liaison	7
1.3 Contexte général	7
1.3.1 Réutilisation des ressources et efficacité spectrale	7
1.3.2 Interférences dans les réseaux multi-UAV directionnels	8
1.3.3 Couplage entre beam steering, allocation et puissance	8
1.3.4 Motivation de la coordination radio proposée	8
1.4 Problématique	9
1.5 Questions de recherche	10
1.6 Objectifs du mémoire	11
1.7 Contributions principales	12
1.8 Organisation du mémoire	14
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	15
2.1 Optimisation du beam steering	17
2.2 Réutilisation spectrale et allocation des ressources	18
2.3 Contrôle de puissance et optimisation monotone	20
2.4 Méthodes de décomposition et coordination	21
2.5 Synthèse et positionnement	22
CHAPITRE 3 CONTEXTE TECHNIQUE ET MODÉLISATION DU SYSTÈME	27
3.1 Architecture UAV-Assisted 5G	27
3.2 Hypothèses système	29
3.2.1 Hypothèses spatiales	30
3.2.2 Hypothèses temporelles	30
3.2.3 Hypothèses d'accès au spectre	31
3.2.4 Hypothèses antenne et orientation	31
3.2.5 Hypothèses de propagation	32
3.2.6 Hypothèses d'interférence	32
3.3 Modèle d'antenne directionnelle	32
3.3.1 Définition des offsets angulaires	33
3.3.2 Modèle de gain directionnel	33

3.3.3	Gain maximal et HPBW	35
3.3.4	Ensemble des angles admissibles	36
3.4	Modèle de propagation tridimensionnelle	37
3.4.1	Distance 3D UAV–utilisateur	37
3.4.2	Gain de canal	38
3.5	Allocation structurée des ressources radio avec réutilisation spectrale	38
3.5.1	Découpage spectral	39
3.5.2	Variable d'allocation	39
3.5.3	Contraintes d'allocation	40
3.5.4	Association UAV–utilisateur induite par l'allocation	40
3.5.5	Impact sur la structure du problème	41
3.6	Modèle d'interférence et formulation du SINR	41
3.6.1	Puissance utile reçue	42
3.6.2	Interférences inter-UAV	42
3.6.3	Interférence totale	42
3.6.4	Formulation du SINR	43
3.6.5	Débit atteignable	43
CHAPITRE 4 APPROCHE PROPOSÉE		45
4.1	Formulation du problème de coordination radio	45
4.2	Difficulté du problème et justification de l'approche	48
4.3	Procédure de coordination radio par blocs	49
4.4	Coordination de l'orientation des faisceaux	50
4.5	Contrôle de puissance	51
4.6	Algorithme global	52
4.7	Résolution des sous-problèmes de la procédure de coordination	54
4.7.1	Génération locale de configurations angulaires candidates	54
4.7.2	Allocation structurée des ressources radio	55
4.7.3	Contrôle de puissance par optimisation monotone	56
CHAPITRE 5 ÉVALUATION ET RÉSULTATS		59
5.1	Cadre de simulation	59
5.2	Paramètres système	60
5.3	Métriques d'évaluation	61
5.4	Analyse des performances	62
5.4.1	Débit total et distribution par utilisateur	62
5.4.2	Analyse du SINR	64
5.4.3	Impact de la coordination radio proposée	66
5.4.4	Comportement itératif du système	66
5.4.5	Analyse du comportement itératif de l'algorithme	66
5.5	Comparaison avec les approches de référence	67
5.5.1	Approche sans coordination radio proposée	68
5.5.2	Optimisation partielle	68
5.5.3	Discussion des résultats	68

5.5.4	Limites de l'évaluation expérimentale	69
CONCLUSION		71
LIST OF REFERENCES		75

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Synthèse comparative des travaux de référence 24
Tableau 4.1	Variables de décision 46
Tableau 5.1	Paramètres de simulation 60
Tableau 5.2	Performances comparées à $\text{SNR} = 10 \text{ dB}$ 64

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Principaux cas d'utilisation des UAV dans les réseaux sans fil 5
Figure 1.2	Signaux utiles et interférences dans un réseau sans fil assisté par UAV ... 6
Figure 3.1	Modèle système UAV-assisted illustrant la géométrie 3D, les faisceaux directionnels et les interférences inter-UAV 29
Figure 5.1	Distribution du débit par utilisateur et somme des débits par UAV pour les approches Baseline, MFG et Coordination proposée (BRM) à SNR = 10 dB 63
Figure 5.2	SINR équivalent estimé à partir du débit par utilisateur 65
Figure 5.3	Évolution du débit total en fonction du nombre d'itérations 67

LISTE DES ALGORITHMES

	Page
Algorithme 4.1	Algorithme global de coordination radio par blocs 53
Algorithme 4.2	Sous-algorithme d'allocation des ressources 55
Algorithme 4.3	Sous-algorithme de contrôle de puissance par optimisation monotone 57

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

UAV	Unmanned Aerial Vehicle
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio
PDMA	Pattern Division Multiple Access
IoT	Internet of Things
5G	Fifth Generation Mobile Network
mmWave	Millimeter Wave
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
AWGN	Additive White Gaussian Noise
HPBW	Half-Power BeamWidth
MFG	Mean-Field Game

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

K	Nombre de UAV
M	Nombre d'utilisateurs
N	Nombre d'éléments de ressource
$d_{k,m}$	Distance 3D entre le UAV k et l'utilisateur m
$g_{k,m}$	Gain de canal entre le UAV k et l'utilisateur m
β_0	Gain de référence du canal
α	Exposant de perte en distance
$P_{k,m}$	Puissance de transmission du UAV k
$P_{\max}$	Puissance maximale de transmission
σ^2	Puissance du bruit
G_k	Gain directionnel de l'antenne
G_0	Gain maximal
ψ_k^{elev}	Angle d'élévation
ψ_k^{azim}	Angle d'azimut
$\Delta\psi_{k,m}$	Offset angulaire
$HPBW$	Largeur à mi-puissance
$b_{k \rightarrow m}^n$	Variable d'allocation des ressources
$\mathcal{N}$	Ensemble des ressources
$SINR_{k,m}$	Rapport signal-à-interférence-plus-bruit
$\gamma_{\min}$	Seuil minimal de SINR
$R_{k,m}$	Débit de la liaison
R_{sum}	Débit total du réseau
$I_{\max}$	Nombre maximal d'itérations

INTRODUCTION

Les réseaux sans fil de nouvelle génération doivent répondre à des besoins croissants en matière de couverture, de capacité et de gestion efficace des ressources radio. Dans ce contexte, les véhicules aériens sans pilote, ou UAV, représentent une solution prometteuse pour soutenir les infrastructures terrestres, notamment dans les scénarios où le déploiement fixe est difficile, coûteux ou insuffisant.

Cependant, l'utilisation de plusieurs UAV dans un même environnement radio soulève plusieurs défis techniques. Le partage des ressources spectrales, l'orientation des faisceaux directionnels, le contrôle de puissance et la gestion des interférences créent une forte interdépendance entre les liaisons de communication. Ces interactions rendent la coordination radio plus complexe, en particulier lorsque plusieurs UAV desservent simultanément des utilisateurs au sol.

Ce mémoire s'intéresse à la coordination des ressources radio dans un réseau multi-UAV directionnel avec réutilisation spectrale. L'objectif est de proposer une procédure de coordination permettant d'obtenir une configuration faisable et performante dans un scénario contrôlé, en tenant compte du couplage entre l'orientation des faisceaux, l'allocation des ressources radio, le contrôle de puissance et le SINR.

Le reste du mémoire est organisé comme suit. Le premier chapitre présente le contexte général du projet ainsi que les notions de base nécessaires à la compréhension du problème étudié. Le deuxième chapitre présente une revue de littérature des travaux liés à l'optimisation du beam steering, à l'allocation des ressources, au contrôle de puissance et aux méthodes de coordination. Le troisième chapitre décrit le modèle système considéré. Le quatrième chapitre présente la formulation du problème et la procédure de coordination proposée. Le cinquième chapitre expose les résultats numériques obtenus. Enfin, la conclusion résume les principaux apports du mémoire et présente les perspectives de recherche.

CHAPITRE 1

CONTEXTE GÉNÉRAL ET NOTIONS DE BASE

1.1 Présentation du chapitre

Ce chapitre présente le cadre général de ce mémoire et introduit les notions nécessaires à la compréhension du problème étudié. Il commence par définir les concepts de base liés aux réseaux 5G, aux UAV, aux antennes directionnelles, à la réutilisation des ressources radio et au SINR. Il expose ensuite le contexte général des réseaux multi-UAV directionnels et précise le cadre quasi-statique adopté dans ce travail, où les positions des UAV sont considérées comme données. Enfin, le chapitre présente la motivation, la problématique, les questions de recherche, les objectifs, les contributions principales et l'organisation du mémoire.

1.2 Définitions et notions de base

Cette section introduit les principales notions utilisées dans ce mémoire. Elle vise à clarifier les concepts liés aux réseaux 5G, aux UAV, aux antennes directionnelles, à la réutilisation des ressources radio et au SINR avant de présenter la problématique d'optimisation. Les définitions données ici restent générales ; les modèles mathématiques détaillés seront présentés dans le chapitre consacré à la modélisation du système.

1.2.1 Réseaux 5G et exigences radio

Les réseaux de cinquième génération ont été conçus pour répondre à des besoins de communication plus exigeants que ceux des générations précédentes. Ils doivent supporter un nombre croissant d'utilisateurs, des services à haut débit, certaines applications sensibles à la latence ainsi qu'une utilisation plus efficace du spectre radio. Ces exigences rendent la gestion des ressources radio plus complexe, en particulier lorsque plusieurs transmissions partagent des ressources limitées.

Dans ce mémoire, l'accent est toutefois mis sur la coordination radio dans un cadre quasi-statique, et non sur une implémentation temps réel à très faible latence.

Dans ce contexte, l'amélioration de la couverture et de la capacité ne dépend pas uniquement de l'ajout d'infrastructures terrestres. Elle nécessite également des mécanismes capables de mieux exploiter les ressources disponibles, de limiter les interférences et de maintenir une qualité de liaison suffisante pour les utilisateurs actifs.

1.2.2 UAV comme stations de base aériennes

Les véhicules aériens sans pilote (UAV) peuvent être utilisés comme stations de base aériennes afin de compléter l'infrastructure terrestre dans les réseaux sans fil. Leur intérêt réside notamment dans leur capacité à être déployés rapidement afin de renforcer temporairement la couverture ou la capacité radio dans des zones où le réseau au sol est insuffisant, saturé ou difficile à déployer.

Dans ce mémoire, cette flexibilité est considérée au niveau du déploiement initial des UAV, et non au niveau de l'optimisation dynamique de leurs trajectoires. Une fois déployés, les UAV sont supposés occuper des positions et altitudes données pendant chaque intervalle d'analyse, conformément au cadre quasi-statique adopté dans ce travail.

Dans ce cadre, l'analyse porte sur un réseau multi-UAV déjà déployé, dans lequel l'objectif est de coordonner les décisions radio, à savoir l'orientation des faisceaux, l'allocation des ressources et le contrôle de puissance. Ces décisions influencent directement le niveau d'interférence entre UAV et la qualité des liaisons, mesurée notamment par le SINR.

Plusieurs usages des UAV dans les communications sans fil sont illustrés à la Figure 1.1, notamment l'extension de couverture, le relais de communication et la collecte de données.

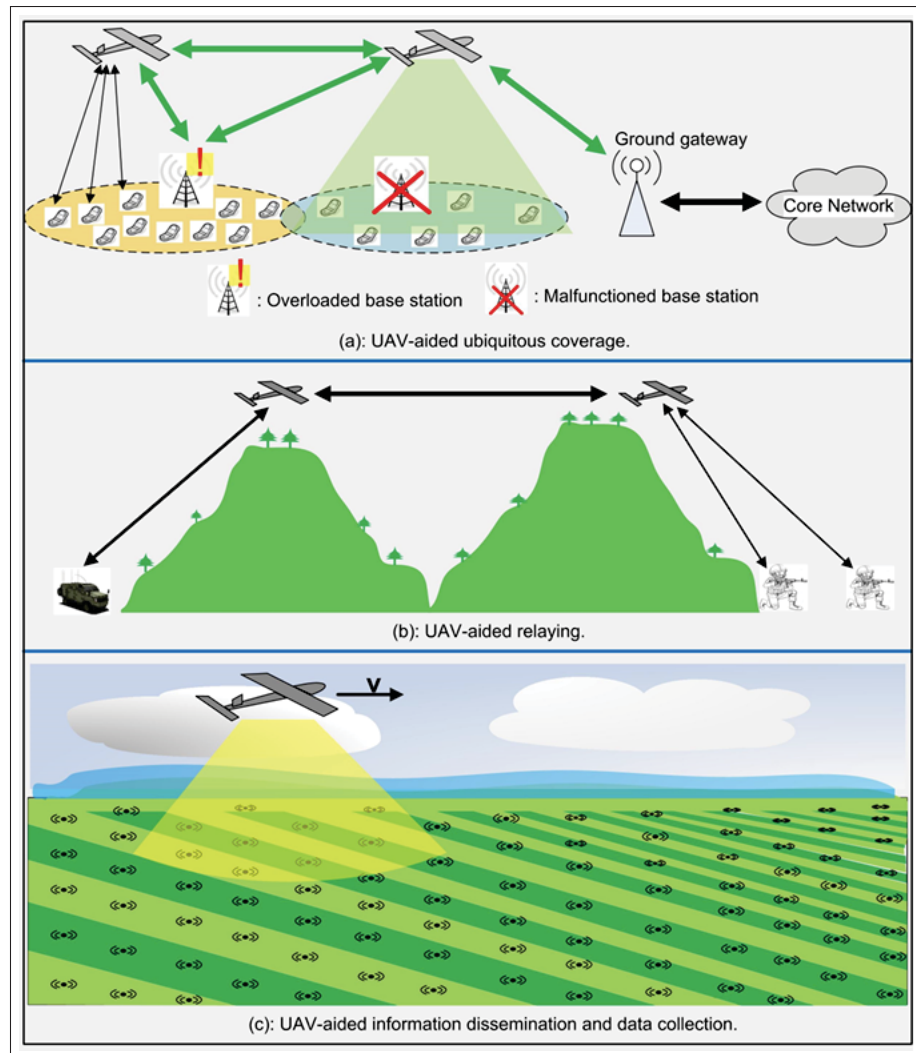


Figure 1.1 Principaux cas d'utilisation des UAV dans les réseaux sans fil : extension de couverture, relais de communication et collecte de données
Adapté de Zeng, Zhang et Lim (2016)

1.2.3 Beam steering et antennes directionnelles

Dans les réseaux sans fil directionnels, le *beam steering* permet d'orienter l'énergie radio vers une direction privilégiée afin d'améliorer le gain utile d'une liaison. Dans un réseau multi-UAV, cette orientation influence également la distribution spatiale des interférences lorsque plusieurs UAV transmettent simultanément ou réutilisent les mêmes ressources radio.

La Figure 1.2 illustre la coexistence de signaux utiles et de signaux d'interférence dans un réseau sans fil assisté par UAV. Elle met en évidence que la qualité d'une liaison dépend non seulement du signal désiré, mais aussi des interférences générées par les autres transmissions présentes dans l'environnement.

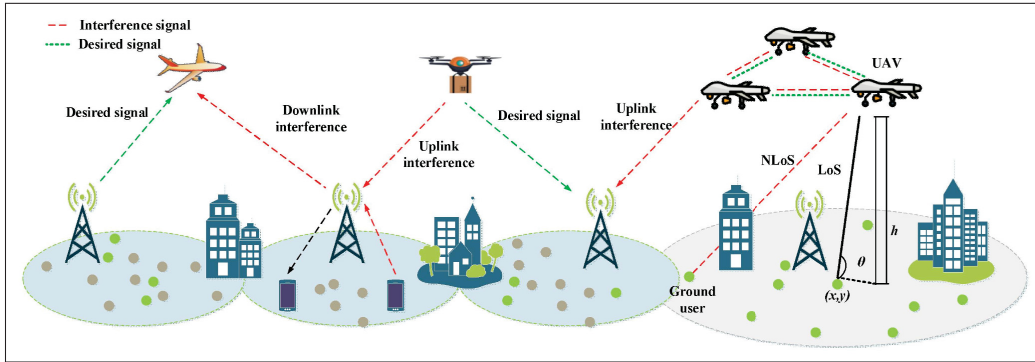


Figure 1.2 Signaux utiles et interférences dans un réseau sans fil assisté par UAV
Adapté de Shaya et al. (2022)

Dans ce mémoire, l'orientation des faisceaux est étudiée conjointement avec l'allocation des ressources radio et le contrôle de puissance. Ces trois décisions influencent ensemble le niveau d'interférence, le SINR et les performances du réseau.

1.2.4 Réutilisation des ressources radio

La réutilisation des ressources radio permet à plusieurs UAV d'exploiter des éléments de ressource communs afin d'améliorer l'efficacité spectrale du réseau. Cependant, cette réutilisation peut générer des interférences inter-UAV lorsque plusieurs transmissions partagent une même ressource.

Dans ce mémoire, cette réutilisation est représentée par une allocation binaire structurée des éléments de ressource. Cette modélisation vise à analyser le couplage entre allocation radio, interférences, puissance transmise et qualité des liaisons, sans reproduire un schéma complet d'accès multiple non orthogonal.

1.2.5 SINR comme métrique de qualité de liaison

Le rapport signal-à-interférence-plus-bruit, ou SINR, est une métrique essentielle pour évaluer la qualité d'une liaison radio. Il compare la puissance du signal utile reçu par un utilisateur à la somme des interférences et du bruit présents sur la même ressource radio. Un SINR élevé indique généralement une liaison de meilleure qualité, tandis qu'un SINR faible traduit une liaison plus dégradée par les interférences ou par le bruit.

Dans un réseau multi-UAV avec réutilisation des ressources radio, le SINR dépend de plusieurs décisions prises simultanément par les UAV. L'orientation des faisceaux influence le gain du signal utile et les interférences générées vers les autres liaisons. L'allocation des ressources détermine quelles transmissions partagent les mêmes éléments radio. Le contrôle de puissance agit à la fois sur la puissance du signal utile et sur le niveau d'interférence imposé aux autres utilisateurs.

Ainsi, le SINR constitue le lien principal entre les décisions radio et les performances du réseau. Dans ce mémoire, il est utilisé pour mesurer la qualité des liaisons, imposer des contraintes minimales de service et guider la coordination radio proposée de l'orientation des faisceaux, de l'allocation des ressources et du contrôle de puissance.

1.3 Contexte général

1.3.1 Réutilisation des ressources et efficacité spectrale

Dans le cadre étudié, la réutilisation des ressources radio constitue un levier d'amélioration du débit global, mais elle introduit également des interférences lorsque plusieurs UAV exploitent les mêmes éléments de ressource. Cette tension entre efficacité spectrale et interférence motive l'étude d'une coordination conjointe entre l'allocation des ressources, l'orientation des faisceaux et le contrôle de puissance.

1.3.2 Interférences dans les réseaux multi-UAV directionnels

Lorsque plusieurs UAV opèrent dans une même bande de fréquences, les transmissions peuvent se perturber mutuellement. Dans un réseau directionnel, ces interférences dépendent non seulement de la distance et de la puissance transmise, mais aussi de l'orientation des faisceaux et de la réutilisation des ressources radio.

Ainsi, la gestion des interférences constitue une difficulté centrale du problème étudié, car elle influence directement le SINR, le débit atteignable et la qualité effective des liaisons.

1.3.3 Couplage entre beam steering, allocation et puissance

Dans le système étudié, les décisions radio ne peuvent pas être considérées indépendamment. L'orientation des faisceaux influence le gain du signal utile, mais aussi la répartition spatiale des interférences. L'allocation des ressources radio détermine quelles transmissions partagent les mêmes éléments de ressource. Le contrôle de puissance modifie, quant à lui, la puissance reçue par l'utilisateur servi, mais également le niveau d'interférence imposé aux autres liaisons.

1.3.4 Motivation de la coordination radio proposée

Le contexte étudié dans ce mémoire est celui d'un réseau multi-UAV directionnel partageant des ressources radio communes. Dans un tel environnement, le SINR dépend simultanément de l'orientation des faisceaux, de l'allocation des ressources et du contrôle de puissance. Une modification de l'un de ces paramètres peut améliorer une liaison donnée, mais aussi modifier les interférences subies par les autres utilisateurs.

Cette interdépendance motive le développement d'un cadre de coordination radio. L'objectif est de coordonner les décisions radio afin de mieux gérer les interférences, d'améliorer le débit global du réseau et de renforcer la qualité effective des liaisons actives.

Ainsi, l'approche étudiée ne vise pas à optimiser la trajectoire ou le placement dynamique des UAV. Elle se concentre sur la coordination des paramètres radio dans une configuration quasi-statique, où les positions et altitudes des UAV sont considérées comme données.

1.4 Problématique

Dans un réseau multi-UAV assisté 5G partageant une même bande de fréquences, la recherche d'une efficacité spectrale élevée impose la réutilisation des ressources radio. Cette réutilisation, bien qu'essentielle pour améliorer le débit global, introduit une interaction directe entre les transmissions concurrentes. Lorsque plusieurs UAV opèrent simultanément avec des antennes directionnelles, le recouvrement spatial des faisceaux modifie la distribution d'énergie dans l'espace et engendre des interférences inter-UAV dépendant de l'orientation des faisceaux, de la puissance transmise et des ressources allouées.

Dans ce contexte, la qualité d'une liaison ne dépend pas uniquement de la puissance du signal utile, mais du rapport signal-à-interférence-plus-bruit (SINR), qui intègre les contributions de l'ensemble des UAV partageant la même ressource. Toute modification d'un paramètre local, qu'il s'agisse d'un ajustement angulaire, d'une réaffectation de ressource ou d'une variation de puissance, peut modifier la structure globale d'interférence du réseau et affecter les performances des autres liaisons. Le système présente ainsi une forte interdépendance entre ses variables de décision, dans laquelle les décisions individuelles ne peuvent être prises indépendamment sans compromettre la cohérence globale.

D'un point de vue optimisation, cette interdépendance conduit à un problème fortement couplé. Les angles de faisceau influencent de manière non linéaire les gains directionnels, lesquels interviennent dans l'expression du SINR. Par ailleurs, l'allocation des ressources radio repose sur des variables binaires discrètes, tandis que les puissances et les orientations angulaires sont continues. Le problème étudié combine donc des variables discrètes et continues dans une fonction objectif non linéaire dépendant des termes d'interférence croisés, ce qui conduit à un problème d'optimisation mixte non convexe.

La difficulté provient moins de la taille du problème que du fort couplage entre ses variables. Une optimisation séquentielle des paramètres peut conduire à des configurations localement optimales mais globalement incohérentes, car chaque étape modifie la topologie d'interférence du réseau. De plus, l'imposition de contraintes minimales de SINR pour garantir la qualité de service renforce la complexité, puisque la faisabilité d'une liaison dépend des décisions prises pour l'ensemble des UAV.

Ainsi, le système étudié présente les caractéristiques suivantes :

- **Couplage interférence-dépendant** : les interférences résultent des interactions entre plusieurs UAV partageant les mêmes ressources radio.
- **Dépendance à la directionnalité** : l'orientation des faisceaux modifie la distribution spatiale de l'énergie et influence directement les niveaux d'interférence.
- **Couplage entre variables hétérogènes** :
 - variables continues : angles de faisceau, puissances de transmission,
 - variables discrètes : allocation des ressources.
- **Structure non convexe** : les termes d'interférence dans le SINR introduisent des dépendances non linéaires complexes entre les variables.

Dans ce contexte, le problème central peut être formulé comme suit :

Comment concevoir un cadre de coordination radio capable de coordonner l'orientation des faisceaux, la réutilisation et l'allocation des ressources radio, ainsi que le contrôle de puissance, afin d'augmenter le débit global du réseau tout en améliorant la qualité effective des liaisons dans un environnement interférence-couplé ?

1.5 Questions de recherche

À partir de la problématique exposée précédemment, ce mémoire s'articule autour des questions de recherche suivantes :

- **Q1.** Comment modéliser de manière cohérente les interactions interférence-couplées entre plusieurs UAV directionnels partageant une même bande de fréquences, en tenant compte simultanément des angles de faisceau, de l'allocation des ressources et du contrôle de puissance ?
- **Q2.** Comment formuler un cadre de coordination radio permettant d'évaluer conjointement l'effet de l'orientation des faisceaux, de l'allocation des ressources et du contrôle de puissance sur le SINR et le débit global du réseau ?
- **Q3.** Comment définir une procédure de coordination par blocs, avec vérification des contraintes et acceptation des configurations non dégradantes, adaptée à la nature mixte, non convexe et interférence-couplée du problème étudié ?
- **Q4.** La procédure de coordination proposée permet-elle d'obtenir, dans un scénario contrôlé, une configuration radio faisable améliorant le débit global et la qualité effective des liaisons par rapport à des stratégies partiellement découplées ?

1.6 Objectifs du mémoire

L'objectif principal de ce mémoire est de développer un cadre de coordination radio pour les réseaux multi-UAV directionnels partageant le spectre radio, visant à améliorer le débit global du réseau et la qualité effective des liaisons dans un environnement interférence-couplé.

Cet objectif principal se décline en plusieurs sous-objectifs scientifiques interdépendants :

- **Sous-objectif 1 : Modélisation du système** Développer un modèle cohérent intégrant :
 - la propagation tridimensionnelle,
 - le gain directionnel des antennes,
 - une réutilisation spectrale structurée des ressources radio,
 - et les interférences inter-UAV.
- **Sous-objectif 2 : Formulation du problème de coordination radio** Formaliser un problème de coordination radio :
 - intégrant des variables continues et discrètes,

- capturant explicitement le couplage interférence-dépendant,
- sous contraintes de SINR et de puissance.
- **Sous-objectif 3 : Conception d'une procédure de coordination par blocs** Développer une procédure permettant :
 - de mettre à jour successivement l'orientation des faisceaux, l'allocation des ressources et les puissances de transmission,
 - de vérifier la faisabilité des configurations candidates,
 - d'accepter uniquement les configurations respectant les contraintes et ne dégradant pas la performance courante.
- **Sous-objectif 4 : Évaluation des performances** Analyser l'impact de la procédure proposée sur :
 - le débit global,
 - la qualité effective des liaisons dépendantes du SINR,
 - et la robustesse face aux interférences dans un scénario contrôlé.

1.7 Contributions principales

Les contributions principales de ce mémoire sont organisées comme suit :

- **Contribution 1 – Modélisation interférence-couplée**

La première contribution de ce travail consiste à développer un modèle système intégrant :

- la géométrie tridimensionnelle,
- le gain directionnel des antennes,
- une réutilisation spectrale structurée des ressources radio,
- et les interférences inter-UAV dépendantes des décisions radio.

- **Contribution 2 – Formulation d'un problème de coordination radio mixte non convexe**

Définition d'un problème de coordination radio capturant explicitement le couplage entre :

- l'orientation des faisceaux,
- l'allocation des ressources,

- le contrôle de puissance,
sous contraintes de SINR et de puissance.
- **Contribution 3 – Procédure de coordination radio par blocs avec acceptation sous contraintes**
Développement d'une procédure de coordination radio par blocs permettant de :
 - générer des configurations candidates pour l'orientation des faisceaux, l'allocation des ressources et le contrôle de puissance,
 - évaluer ces configurations à partir du SINR, des contraintes du problème et du débit total,
 - accepter uniquement les configurations faisables qui améliorent ou conservent la performance courante.
- **Contribution 4 – Validation et analyse des performances**
Évaluation par simulation, dans un scénario contrôlé de petite taille, suggérant que la procédure proposée :
 - améliore le débit global dans le scénario étudié,
 - améliore la qualité effective des liaisons à travers les métriques de débit et le comportement itératif observé,
 - et obtient de meilleures performances que les stratégies partiellement découplées considérées.

Il convient de préciser que les motivations générales de ce mémoire s'inscrivent dans le contexte des réseaux multi-UAV directionnels et de la réutilisation spectrale. Toutefois, l'évaluation numérique présentée dans ce travail se limite à un scénario contrôlé de petite taille. Celui-ci vise principalement à analyser qualitativement le comportement de la procédure de coordination proposée et à illustrer les interactions entre les variables radio, plutôt qu'à démontrer l'optimalité globale ou la scalabilité de l'approche dans des déploiements multi-UAV denses.

1.8 Organisation du mémoire

Ce mémoire est structuré en cinq chapitres techniques, suivis d'un chapitre de conclusion générale et de perspectives.

Le Chapitre 2 présente l'état de l'art. Il analyse les travaux existants relatifs à l'optimisation du beam steering, à l'allocation des ressources, au contrôle de puissance et aux méthodes de décomposition. Il se conclut par une synthèse critique permettant de positionner clairement l'approche proposée.

Le Chapitre 3 présente le cadre technique et la modélisation du système étudié. Il introduit l'architecture UAV-assisted 5G considérée, les hypothèses système retenues, ainsi que les modèles de propagation tridimensionnelle et d'antennes directionnelles. Le mécanisme d'allocation structurée des ressources radio est ensuite détaillé, suivi de la formulation du modèle SINR. Le chapitre se conclut par une analyse structurelle du problème mettant en évidence le couplage interférence-dépendant et la nature mixte non convexe du problème étudié.

Le Chapitre 4 développe la procédure de coordination radio proposée. Il formalise le problème de coordination sous contraintes de SINR et de puissance, puis présente une procédure de coordination radio par blocs avec acceptation sous contraintes. Les trois blocs de décision, à savoir l'orientation des faisceaux, l'allocation des ressources radio et le contrôle de puissance, y sont détaillés, ainsi que l'algorithme global associé.

Le Chapitre 5 est consacré à l'évaluation des performances. Il décrit le cadre de simulation, les hypothèses retenues et les méthodes de comparaison. Les résultats obtenus sont analysés en termes de débit global, de qualité effective des liaisons, d'équité entre utilisateurs et de robustesse face aux interférences.

La conclusion générale résume les principaux résultats du mémoire, discute les limites de l'évaluation et présente plusieurs perspectives d'amélioration du modèle et de la procédure de coordination proposée.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre présente une analyse des travaux existants relatifs aux réseaux UAV assistés, aux communications directionnelles en bandes millimétriques (mmWave) ainsi qu'aux méthodes d'optimisation appliquées à la gestion des ressources radio. L'objectif est d'examiner les approches dominantes, d'en discuter les limites, puis de positionner la contribution proposée dans ce mémoire.

Plusieurs travaux de référence ont établi les bases des communications assistées par UAV. Mozaffari et al. présentent un tutoriel complet sur les applications, les défis et les problèmes ouverts des réseaux UAV, notamment le placement, la trajectoire, la gestion des interférences et l'allocation des ressources Mozaffari, Saad, Bennis, Nam & Debbah (2019). Zeng et al. analysent également les principales caractéristiques des communications UAV, en mettant en évidence le rôle de la propagation tridimensionnelle, des liens LoS/NLoS et de la mobilité aérienne dans la conception des réseaux sans fil Zeng, Zhang & Lim (2016). Plus récemment, plusieurs études de synthèse ont confirmé que la gestion conjointe des ressources radio, de la puissance et de la trajectoire reste un problème central dans les réseaux UAV assistés, en raison du couplage entre mobilité, interférences et qualité de service Mozaffari *et al.* (2019); Zeng *et al.* (2016).

L'intégration des véhicules aériens sans pilote (UAV) dans les réseaux cellulaires 5G et au-delà est aujourd'hui considérée comme une solution prometteuse pour améliorer la couverture et renforcer la capacité réseau dans des zones mal desservies ou temporairement congestionnées. Rolley *et al.* (2022) mettent en évidence le potentiel de ces plateformes aériennes pour les communications sans fil, tout en soulignant plusieurs défis techniques liés à la mobilité, à la consommation d'énergie et à la gestion des interférences.

Dans le contexte des communications en bandes millimétriques Rappaport *et al.* (2013) ont montré que les transmissions directionnelles à fort gain constituent un levier essentiel pour exploiter efficacement les larges bandes passantes offertes par la 5G. Toutefois, cette forte directionnalité rend les performances radio particulièrement sensibles à l'alignement angulaire des faisceaux

ainsi qu'aux variations de l'environnement de propagation, ce qui influence directement la stabilité du SINR. À cet égard, les modèles directionnels basés sur une approximation gaussienne du lobe principal, comme celui proposé par Buttazzoni, Babich, Pastore, Vatta & Comisso (2021), offrent un cadre pertinent pour modéliser le gain angulaire des antennes, sans toutefois traiter explicitement la coordination inter-UAV sous réutilisation spectrale.

Ces contributions constituent le socle des choix de modélisation retenus dans ce mémoire, notamment pour la représentation de la propagation tridimensionnelle, du gain directionnel des antennes et du rôle central du rapport signal-à-interférence-plus-bruit (SINR) comme métrique de performance.

Par ailleurs, plusieurs travaux récents ont étudié séparément ou partiellement l'optimisation du steering directionnel, de la réutilisation des ressources radio et du contrôle de puissance afin d'améliorer les performances réseau. Ces approches ont permis des avancées significatives, mais reposent souvent sur des hypothèses simplificatrices, telles qu'une structure d'interférence partiellement figée, des gains de canal supposés statiques ou un découplage entre les décisions angulaires, l'allocation radio et la puissance transmise.

Dans les réseaux multi-UAV directionnels, ces simplifications deviennent plus restrictives, car toute modification locale de l'orientation d'un faisceau, de l'allocation des ressources ou de la puissance d'émission peut modifier la structure globale d'interférence et influencer directement le SINR des autres liaisons.

C'est dans cette perspective que s'inscrit le présent travail, qui s'intéresse à une prise en compte explicite du couplage entre orientation des faisceaux, réutilisation des ressources radio, allocation spectrale et contrôle de puissance dans un cadre de coordination radio centré sur l'amélioration de la qualité effective des liaisons et du débit global.

2.1 Optimisation du beam steering

L'orientation directionnelle des faisceaux constitue un levier majeur d'amélioration des performances dans les communications mmWave. En concentrant l'énergie radio dans une direction privilégiée, le beam steering permet d'augmenter le gain d'antenne effectif, de compenser l'atténuation importante du canal en bandes millimétriques et d'améliorer la qualité des liaisons radio. Dans un tel contexte, l'angle d'orientation du faisceau influence directement le gain directionnel, ce qui impacte le canal effectif ainsi que le rapport signal-à-interférence-plus-bruit (SINR).

Dans cette perspective, Alkhateeb, Alex & Venkatesh (2020) ont proposé une approche basée sur l'optimisation bayésienne pour réaliser un alignement efficace des faisceaux dans les systèmes MIMO mmWave. Leur méthode s'appuie sur des processus gaussiens afin d'explorer l'espace angulaire de manière progressive et échantillonnée, ce qui permet d'identifier des configurations de faisceaux performantes tout en limitant le nombre de mesures nécessaires. Cette approche montre l'intérêt des méthodes d'optimisation avancées pour traiter des variables angulaires lorsque l'espace de recherche devient élevé.

Cependant, l'optimisation bayésienne est considérée ici comme une référence de la littérature pour l'exploration de configurations angulaires, et non comme la méthode retenue dans ce mémoire. En effet, le problème étudié ne concerne pas uniquement l'alignement de faisceaux, mais la coordination conjointe de l'orientation, de l'allocation des ressources et du contrôle de puissance sous contraintes de SINR. Le présent travail retient donc une génération locale de configurations angulaires candidates, intégrée à une procédure heuristique de coordination radio par blocs avec acceptation sous contraintes.

Les travaux de Rappaport et al. ont également montré que les communications millimétriques reposent fortement sur l'utilisation de faisceaux directionnels à fort gain afin de compenser les pertes de propagation importantes dans ces bandes de fréquences Rappaport *et al.* (2013). Cette caractéristique rend l'orientation des faisceaux particulièrement importante, mais aussi sensible aux erreurs d'alignement et aux variations géométriques du lien radio.

Dans un contexte multi-UAV, Xie *et al.* (2021) ont étudié l'optimisation distribuée des directions de faisceaux en formulant le problème dans un cadre de type Mean-Field Game (MFG). Leur modèle vise à capturer l'interaction entre un grand nombre de nœuds aériens partageant le même environnement radio, afin de mieux répartir spatialement les transmissions directionnelles et de limiter les situations de forte interférence.

Ces travaux confirment que l'orientation des faisceaux constitue une variable radio déterminante dans les réseaux directionnels. Toutefois, l'optimisation angulaire y demeure généralement étudiée de manière partiellement découplée des autres décisions radio. Or, dans un réseau multi-UAV, une modification de l'orientation d'un faisceau modifie le gain directionnel, influence la puissance d'interférence reçue par les liaisons voisines et peut transformer la structure globale du SINR dans le réseau. L'optimisation du steering ne peut donc être considérée isolément lorsqu'elle interagit fortement avec l'allocation des ressources radio et le contrôle de puissance.

2.2 Réutilisation spectrale et allocation des ressources

L'amélioration de l'efficacité spectrale dans les réseaux 5G a favorisé l'étude de mécanismes permettant une utilisation plus dense des ressources radio disponibles. Dans le contexte général des accès non orthogonaux, Ding *et al.* ont montré que les techniques NOMA peuvent améliorer l'efficacité spectrale des réseaux 5G, mais qu'elles introduisent également des défis importants liés à l'allocation de puissance, à l'ordonnancement des utilisateurs et à la gestion des interférences Ding *et al.* (2017).

Dans cette perspective, Jiang *et al.* ont introduit le Pattern Division Multiple Access (PDMA) comme une alternative flexible aux schémas d'accès orthogonaux classiques Jiang, Zhang & Hanzo (2018). Le principe du PDMA repose sur l'utilisation de motifs d'allocation permettant une superposition structurée des utilisateurs sur les ressources radio, associée à des mécanismes spécifiques de séparation et de décodage multi-utilisateur.

Le PDMA constitue ainsi un exemple représentatif des approches d'accès multiple non orthogonal visant à accroître l'efficacité spectrale par une utilisation plus dense des ressources. Toutefois, une

mise en œuvre complète du PDMA nécessite de modéliser explicitement les motifs d'allocation, la superposition des transmissions, les contraintes associées et le mécanisme de décodage multi-utilisateur.

Dans ce mémoire, l'objectif n'est pas de proposer ni d'implémenter un schéma PDMA complet. L'allocation des ressources est plutôt modélisée à l'aide de variables binaires indiquant l'utilisation des éléments de ressource par les UAV et les utilisateurs. Cette formulation permet d'étudier une réutilisation spectrale structurée entre UAV, ainsi que son interaction avec l'orientation des faisceaux, le contrôle de puissance, les interférences et le SINR.

Le schéma proposé présente néanmoins certaines similitudes conceptuelles avec les approches d'allocation structurée de type PDMA, dans la mesure où il repose sur une réutilisation contrôlée des ressources radio et sur une représentation binaire des affectations. Toutefois, ces similitudes restent limitées au niveau de l'organisation des ressources, sans inclure la superposition non orthogonale ni le décodage multi-utilisateur propres à un cadre PDMA complet.

D'un point de vue système, la réutilisation spectrale considérée dans ce mémoire est représentée par des variables binaires d'affectation, qui indiquent quels couples UAV–utilisateur utilisent chaque élément de ressource. Cette représentation permet d'identifier les transmissions concurrentes entre UAV et d'évaluer les interférences générées lorsque plusieurs UAV réutilisent une même ressource.

Dans le contexte des réseaux UAV, Zhao et al. ont étudié l'intégration du PDMA avec des mécanismes d'allocation radio adaptés aux communications aériennes Zhao, Zhang & Adebisi (2023). Leurs résultats montrent qu'une gestion structurée de la réutilisation spectrale peut améliorer significativement l'efficacité réseau dans des environnements à forte densité de trafic. Toutefois, ces approches reposent sur une modélisation spécifique des mécanismes d'accès non orthogonal et supposent généralement que la configuration directionnelle des faisceaux est fixée ou traitée séparément du processus d'allocation radio.

Or, dans un environnement multi-UAV directionnel, la structure d'interférence ne dépend pas uniquement des ressources radio réutilisées, mais également de l'orientation spatiale des faisceaux qui conditionne le recouvrement des zones de couverture. Une même stratégie d'allocation peut ainsi produire des niveaux d'interférence très différents selon la configuration angulaire adoptée. L'allocation des ressources radio ne peut donc être considérée indépendamment des décisions de beam steering, ce qui met en évidence la nécessité d'une coordination explicite entre réutilisation spectrale, orientation directionnelle et gestion de l'interférence.

Des travaux de synthèse sur les réseaux UAV assistés soulignent également que l'allocation des ressources radio, le contrôle de puissance et la gestion des interférences constituent des défis majeurs lorsque plusieurs UAV partagent les mêmes ressources spectrales Mozaffari *et al.* (2019); Zeng *et al.* (2016).

2.3 Contrôle de puissance et optimisation monotone

Le contrôle de puissance constitue un levier central pour améliorer la qualité des liaisons radio tout en limitant les interférences dans les réseaux sans fil. En ajustant la puissance transmise sur chaque liaison, il devient possible de satisfaire des contraintes minimales de SINR, d'améliorer le débit atteignable et de mieux répartir l'énergie radio dans le réseau. Toutefois, ce problème conduit généralement à des formulations non convexes, en raison du couplage des puissances à travers les termes d'interférence.

Dans ce contexte, Zhang, Song & Letaief (2013) ont proposé un cadre d'optimisation monotone fondé sur la méthode polyblock pour résoudre efficacement certains problèmes de maximisation de débit sous contraintes couplées. Cette approche exploite les propriétés de monotonie de la fonction objectif ainsi que la structure normale de l'ensemble admissible afin d'atteindre des solutions proches de l'optimalité globale. Elle constitue ainsi une référence importante pour le traitement de problèmes d'allocation de puissance sous contraintes SINR.

Cependant, ces formulations supposent généralement que les gains de canal et la structure d'interférence sont connus et relativement figés au moment de l'optimisation. Dans un

environnement multi-UAV directionnel, cette hypothèse devient plus restrictive, car la puissance optimale ne dépend pas uniquement des budgets de transmission, mais également de la configuration angulaire des faisceaux et de la structure d'allocation des ressources radio.

Autrement dit, une modification de la puissance transmise influence directement le niveau d'interférence reçu par les autres liaisons, tandis qu'une modification de l'orientation des faisceaux ou de la réutilisation spectrale modifie à son tour les gains effectifs et la topologie d'interférence. Le contrôle de puissance se trouve donc fortement couplé aux autres dimensions radio du système, ce qui rend insuffisante une optimisation traitée isolément.

2.4 Méthodes de décomposition et coordination

Lorsque plusieurs variables de décision interagissent à travers des relations fortement couplées, une résolution directe du problème global devient difficile, en particulier lorsque la formulation combine variables continues, variables discrètes et contraintes non convexes. Dans ce contexte, les méthodes de décomposition permettent de structurer l'analyse en séparant les familles de variables et en étudiant leurs interactions de manière séquentielle.

Parmi ces approches, les méthodes de type Block Coordinate Descent (BCD) occupent une place importante dans la littérature en optimisation. Leur principe consiste à mettre à jour successivement différents blocs de variables tout en maintenant les autres fixes. Tseng (2001) a établi des résultats de convergence pour certaines classes de problèmes, sous des hypothèses précises portant notamment sur la régularité de la fonction objectif, la structure de l'espace admissible et le traitement contrôlé des sous-problèmes.

Cependant, ces garanties ne s'appliquent pas directement au problème étudié dans ce mémoire. En effet, la formulation considérée combine des variables binaires d'allocation, des variables continues d'orientation et de puissance, des contraintes de SINR non convexes et un couplage fort entre les liaisons à travers les interférences. De plus, les sous-problèmes radio ne sont pas tous résolus comme des sous-problèmes convexes exacts.

Ainsi, la procédure proposée suit une philosophie d'optimisation par blocs, proche des approches de type block-coordinate updates. Toutefois, elle n'est pas présentée comme une application directe du BCD classique avec garanties de convergence, car le problème étudié combine des variables continues et binaires, des contraintes de SINR non convexes et un couplage fort entre les liaisons à travers les interférences.

2.5 Synthèse et positionnement

Les travaux analysés dans ce chapitre montrent que l'orientation des faisceaux, la réutilisation des ressources radio et le contrôle de puissance constituent chacun des leviers importants d'amélioration des performances dans les réseaux sans fil directionnels. Pris séparément, ces mécanismes ont permis des avancées significatives en matière d'efficacité spectrale, de gestion des interférences et d'amélioration du débit.

Toutefois, dans un environnement multi-UAV directionnel, ces dimensions ne peuvent plus être étudiées indépendamment. En effet, l'orientation d'un faisceau modifie le gain directionnel effectif et influence directement la qualité du signal reçu. La structure d'allocation des ressources radio détermine les situations de réutilisation spectrale, ce qui modifie le niveau d'interférence entre liaisons concurrentes. Enfin, le contrôle de puissance agit directement sur l'intensité des signaux utiles, mais également sur le niveau d'interférence subi par les autres utilisateurs du réseau.

D'un point de vue mathématique, ces interactions montrent que le rapport signal-à-interférence-plus-bruit dépend simultanément de la configuration angulaire des faisceaux, de la structure d'allocation radio et des puissances transmises. Le SINR peut ainsi être interprété comme une quantité couplée de la forme

$$\text{SINR} = f(\theta, b, p), \quad (2.1)$$

où θ représente les paramètres d'orientation directionnelle, b la structure d'allocation radio et p les puissances d'émission.

Cette relation met en évidence que les décisions associées à chaque bloc sont fortement interdépendantes. En particulier, une configuration d'orientation des faisceaux dépend des ressources radio réutilisées ainsi que des niveaux de puissance transmis, puisque ces paramètres modifient directement la structure d'interférence observée. De manière analogue, une allocation spectrale donnée dépend de la configuration directionnelle adoptée et des puissances émises, tandis que le choix des puissances dépend lui-même des gains directionnels et des interactions induites par la réutilisation spectrale. Dans ces conditions, traiter séparément ces leviers de décision peut conduire à des configurations localement favorables mais globalement incohérentes. Cette dépendance croisée justifie l'intérêt d'une coordination explicite entre les décisions radio.

Dans cette perspective, le présent mémoire se positionne à l'intersection de trois dimensions radio fortement couplées : l'orientation des faisceaux, l'allocation des ressources et le contrôle de puissance. Contrairement aux approches qui traitent ces dimensions de manière indépendante, l'objectif est d'analyser leur interaction à travers le SINR et le débit total dans un scénario multi-UAV directionnel avec réutilisation spectrale.

La méthode proposée n'est pas présentée comme une application directe du BCD classique ni comme une résolution globale du problème mixte non convexe. Elle est définie comme une procédure de coordination radio par blocs avec acceptation sous contraintes. Cette procédure met successivement à jour les décisions d'orientation, d'allocation et de puissance, puis conserve uniquement les configurations candidates qui respectent les contraintes du problème et qui améliorent ou préservent la performance courante.

L'apport principal de ce travail réside donc dans la modélisation du couplage interférence-SINR et dans la proposition d'une procédure de coordination faisable et non dégradante pour un scénario contrôlé. Le mémoire ne revendique pas l'optimalité globale du problème général, mais cherche à montrer l'intérêt d'une coordination explicite entre les décisions radio dans un réseau multi-UAV directionnel.

Ainsi, la littérature existante fournit des contributions importantes sur les communications UAV, les antennes directionnelles, les accès non orthogonaux, l'allocation des ressources et le contrôle

Tableau 2.1 Synthèse comparative des travaux de référence

Référence	Variable principale	Méthode	Point fort	Limitation
Alkhateeb <i>et al.</i> (2020)	Orientation des faisceaux	Optimisation bayésienne	Alignement efficace en mmWave	N'intègre ni allocation radio ni contrôle de puissance
Zhao <i>et al.</i> (2023)	Allocation radio	PDMA	Améliore l'efficacité spectrale par accès non orthogonal structuré	Nécessite une modélisation spécifique des patterns et du décodage multi-utilisateur
Zhang <i>et al.</i> (2013)	Contrôle de puissance	Optimisation monotone	Traitement structuré du contrôle de puissance	Suppose une structure de canal et d'interférence relativement figée
Tseng (2001)	Méthodes de descente par blocs	BCD sous conditions spécifiques	Cadre théorique général pour la décomposition par blocs	Garanties non directement applicables au problème mixte, non convexe et interférence-couplé considéré ici
Travail proposé	Orientation des faisceaux + allocation radio + contrôle de puissance	Coordination radio par blocs avec acceptation sous contraintes	Prise en compte explicite du couplage interférence–SINR entre les décisions radio	Heuristique évaluée dans un scénario contrôlé, sans revendication d'optimalité globale

de puissance. Toutefois, ces dimensions sont souvent étudiées séparément ou avec certaines hypothèses de découplage. Dans un réseau multi-UAV directionnel avec réutilisation spectrale, ces décisions sont fortement interdépendantes : l'orientation des faisceaux modifie les gains utiles et interférents, l'allocation des ressources détermine les transmissions concurrentes, et le contrôle de puissance influence simultanément le signal utile et les interférences. Ce mémoire se positionne donc dans cette intersection, en proposant une procédure de coordination radio par

blocs avec acceptation sous contraintes, visant à analyser conjointement ces trois dimensions dans un scénario contrôlé.

CHAPITRE 3

CONTEXTE TECHNIQUE ET MODÉLISATION DU SYSTÈME

3.1 Architecture UAV-Assisted 5G

Dans ce mémoire, nous considérons un scénario de liaison descendante (downlink) dans lequel des véhicules aériens sans pilote (UAV) interviennent comme stations de base aériennes afin de compléter un réseau 5G terrestre. L'objectif de cette architecture est de renforcer temporairement la couverture ou la capacité radio dans une zone donnée, notamment lorsque l'infrastructure au sol est saturée, insuffisante ou difficilement accessible. Les UAV offrent une flexibilité de déploiement rapide, mais dans ce travail leur position est supposée fixe dans un cadre quasi-statique.

L'architecture étudiée repose sur un ensemble K d'UAV servant un ensemble M d'utilisateurs au sol partageant une même bande de fréquences. Chaque UAV agit comme un point d'accès radio et communique directement avec les utilisateurs situés dans sa zone de couverture. Les UAV sont supposés déjà positionnés dans l'espace tridimensionnel, à des altitudes fixes. Ces positions sont considérées comme données et ne constituent pas une variable d'optimisation dans ce travail.

Chaque UAV est équipé d'une antenne directionnelle caractérisée par des paramètres d'orientation en azimut et en élévation. Cette capacité de beam steering permet de diriger le faisceau principal vers l'utilisateur actif afin d'augmenter le gain utile et d'améliorer le niveau de signal reçu. Cependant, lorsque plusieurs UAV opèrent simultanément dans la même bande de fréquences, l'orientation des faisceaux influence également la distribution spatiale des interférences.

Le partage du spectre s'effectue selon un mécanisme de réutilisation spectrale structurée. Les éléments de ressource (RE) peuvent être réutilisés par différents UAV spatialement séparés, ce qui améliore l'efficacité spectrale mais introduit des interactions supplémentaires entre transmissions concurrentes. Cette réutilisation est modélisée au niveau de l'allocation binaire des ressources et ne correspond pas à un schéma complet d'accès multiple non orthogonal avec superposition et décodage multi-utilisateur.

À chaque intervalle d'analyse, le système évalue un ensemble de décisions radio comprenant :

- l'association UAV–utilisateur induite par l'allocation des ressources,
- l'orientation du faisceau directionnel,
- l'allocation des éléments de ressource,
- l'ajustement de la puissance de transmission.

Ces décisions sont intrinsèquement interdépendantes. Une modification locale, telle qu'un ajustement angulaire ou une variation de puissance, peut altérer la structure globale d'interférence du réseau et influencer les performances des autres liaisons actives. Cette interdépendance constitue un élément central de l'architecture étudiée et motive la modélisation détaillée présentée dans les sections suivantes. La Figure 3.1 illustre le modèle système considéré. Elle met en évidence la géométrie tridimensionnelle des liaisons UAV–utilisateur, les faisceaux directionnels, les distances spatiales ainsi que les zones potentielles de recouvrement responsables des interférences inter-UAV et des effets de réflexion.

Cette architecture sert de base à la formalisation mathématique du modèle de propagation, du gain directionnel et du SINR, qui seront développés dans les sections suivantes.

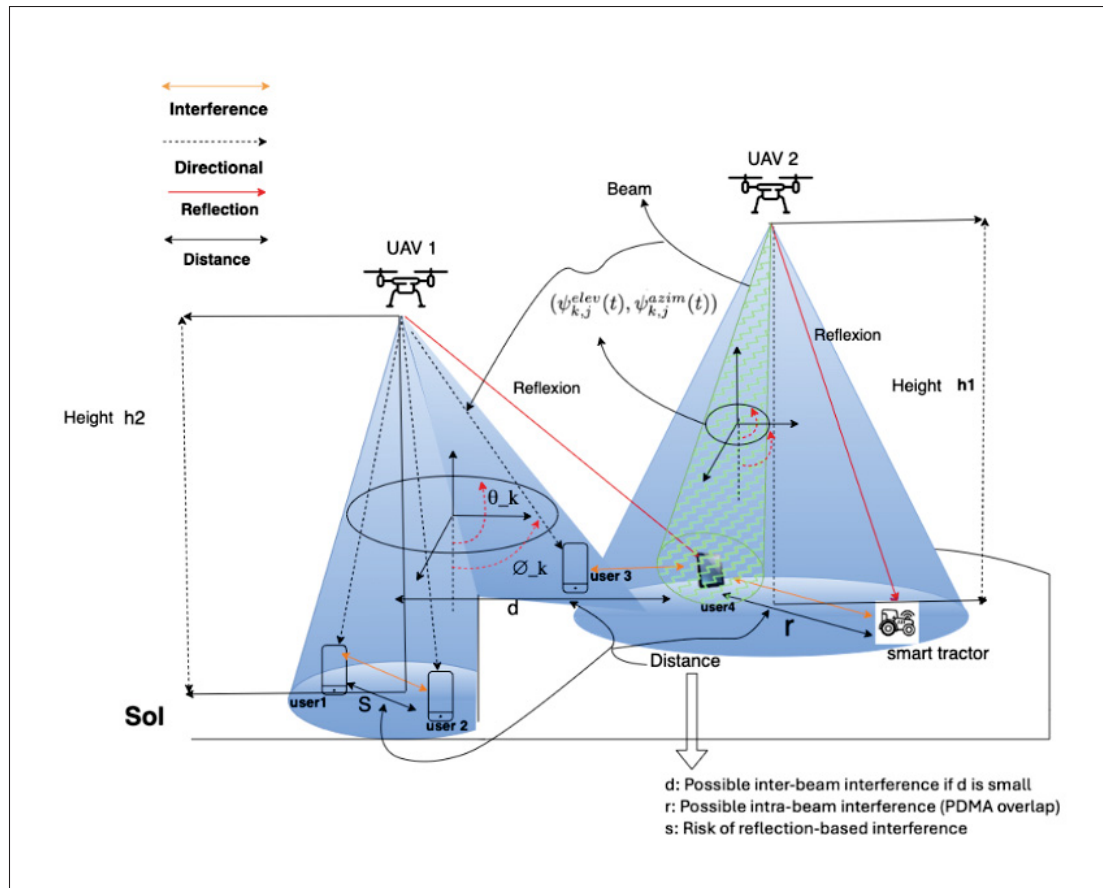


Figure 3.1 Modèle système UAV-assisted illustrant la géométrie 3D, les faisceaux directionnels et les interférences inter-UAV

3.2 Hypothèses système

Afin de formaliser le modèle étudié, plusieurs hypothèses sont adoptées. Elles permettent de définir précisément le cadre analytique dans lequel sera formulé le problème de coordination radio. Contrairement à une étude complète incluant trajectoire et placement dynamique, ce travail se concentre exclusivement sur la coordination radio entre UAV déjà déployés, conformément au cadre présenté dans le modèle système.

3.2.1 Hypothèses spatiales

Le cadre spatial adopté dans ce mémoire est quasi-statique. Les UAV sont considérés comme déjà déployés dans la zone d'étude, et leurs positions ne sont pas optimisées. Cette hypothèse permet de concentrer l'analyse sur les décisions radio, à savoir l'orientation des faisceaux, l'allocation des ressources et le contrôle de puissance.

On considère un ensemble K d'UAV agissant comme stations de base aériennes en liaison descendante. Chaque UAV évolue à altitude fixe, possède une position tridimensionnelle connue et sert des utilisateurs au sol répartis dans une zone donnée.

Les positions des utilisateurs sont supposées connues au début de chaque intervalle temporel, via un mécanisme externe de localisation, tel que le GNSS ou une approche de fusion de données. La conception de ce mécanisme n'est pas étudiée dans ce mémoire.

Ainsi, l'optimisation de trajectoire ou de placement dynamique des UAV est hors du périmètre du travail. L'objectif est d'analyser uniquement les décisions radio, c'est-à-dire l'orientation des faisceaux, l'allocation des ressources et le contrôle de puissance, pour une configuration spatiale donnée.

3.2.2 Hypothèses temporelles

Le système fonctionne en temps discret, organisé en slots temporels. À chaque slot, chaque UAV :

- participe à l'association UAV–utilisateur induite par l'allocation des ressources,
- ajuste l'orientation de son faisceau,
- alloue des éléments de ressource (RE),
- adapte sa puissance de transmission.

Ces décisions sont réévaluées au slot suivant en fonction de la variation du canal ou du déplacement éventuel des utilisateurs.

3.2.3 Hypothèses d'accès au spectre

Tous les UAV opèrent dans une même bande de fréquences partagée. Le spectre est découpé en N éléments de ressource (Resource Elements, RE), globalement accessibles à l'ensemble des UAV.

L'accès aux ressources est représenté par une réutilisation spectrale structurée entre UAV spatialement séparés. Dans la configuration principale étudiée, chaque UAV peut allouer un même RE à au plus un utilisateur, et un utilisateur ne peut pas recevoir simultanément le même RE depuis plusieurs UAV.

Cette hypothèse signifie que la réutilisation se fait principalement entre UAV différents, et non par superposition non orthogonale de plusieurs utilisateurs sur une même ressource au sein d'un même UAV.

Ces hypothèses permettent de représenter une réutilisation contrôlée des ressources radio tout en évitant la modélisation explicite du décodage multi-utilisateur. L'analyse se concentre ainsi sur les interférences inter-UAV générées par la réutilisation des RE et par le recouvrement spatial des faisceaux.

3.2.4 Hypothèses antenne et orientation

Chaque UAV est équipé d'une antenne directionnelle caractérisée par :

- un angle d'élévation,
- un angle d'azimut,
- une largeur à mi-puissance (HPBW).

L'orientation du faisceau peut être ajustée électroniquement dans les limites imposées par la HPBW. Les angles de steering constituent donc des variables de décision continues, contraintes par ces limites.

3.2.5 Hypothèses de propagation

Le canal est modélisé par :

- un gain grande échelle dépendant de la distance 3D ;
- un exposant de perte en distance α ;
- un gain de référence β_0 .

La propagation dépend donc explicitement de la distance tridimensionnelle entre le UAV et l'utilisateur. Le bruit est modélisé comme un bruit blanc additif gaussien (AWGN).

3.2.6 Hypothèses d'interférence

La source principale d'interférence considérée est l'interférence inter-UAV, due au recouvrement spatial des faisceaux lorsque plusieurs UAV réutilisent le même RE. Une composante d'interférence par réflexion peut également être introduite de manière optionnelle dans le modèle, mais elle n'est pas au cœur de l'évaluation numérique présentée dans ce mémoire.

3.3 Modèle d'antenne directionnelle

Dans le système considéré, chaque UAV est équipé d'une antenne directionnelle capable d'ajuster dynamiquement l'orientation de son faisceau selon deux paramètres :

- l'angle d'élévation
- l'angle d'azimut

Ces deux angles définissent le boresight, c'est-à-dire l'axe principal du cône de couverture.

Contrairement à une antenne omnidirectionnelle, le gain n'est pas uniforme dans toutes les directions. Il dépend directement de l'écart angulaire entre la direction du faisceau et la position de l'utilisateur ciblé.

3.3.1 Définition des offsets angulaires

Pour un UAV k et un utilisateur m , on définit :

- $\Delta\psi_{k,m}^{\text{elev}}(t)$: écart angulaire en élévation
- $\Delta\psi_{k,m}^{\text{azim}}(t)$: écart angulaire en azimut

Ces offsets mesurent la différence entre :

- la direction réelle vers l'utilisateur
- la direction actuellement pointée par le faisceau

Plus cet écart est faible, plus le gain est élevé.

3.3.2 Modèle de gain directionnel

Le gain d'antenne est approximé par une fonction gaussienne centrée sur le boresight :

$$G_k(\Delta\psi_{\text{elev}}, \Delta\psi_{\text{azim}}) = G_0 \exp \left(-\frac{(\Delta\psi_{\text{elev}})^2}{\sigma_\theta^2} - \frac{(\Delta\psi_{\text{azim}})^2}{\sigma_\phi^2} \right) \quad (3.1)$$

où :

- G_0 est le gain maximal ;
- σ_θ et σ_ϕ sont les paramètres d'étalement du lobe principal en élévation et en azimut, déterminés à partir des largeurs à mi-puissance.

Ce modèle signifie que :

- le gain décroît exponentiellement lorsque l'utilisateur s'éloigne de l'axe principal ;
- une petite variation angulaire peut entraîner une variation significative du gain.

Les paramètres σ_θ et σ_ϕ contrôlent l'étalement du lobe principal en élévation et en azimut. Afin de rendre le modèle cohérent avec la largeur à mi-puissance de l'antenne, ils sont dérivés à partir du HPBW. Par définition, le HPBW correspond à la largeur angulaire entre les deux directions pour lesquelles le gain est égal à la moitié du gain maximal. Ainsi, pour le plan d'élévation, on impose :

$$G_k \left(\Delta\psi^{\text{elev}} = \frac{\theta_{3dB}^{\text{elev}}}{2}, 0 \right) = \frac{G_0}{2}. \quad (3.2)$$

En substituant cette condition dans le modèle gaussien, on obtient :

$$\frac{1}{2} = \exp \left(-\frac{(\theta_{3dB}^{\text{elev}}/2)^2}{\sigma_\theta^2} \right), \quad (3.3)$$

ce qui conduit à :

$$\sigma_\theta = \frac{\theta_{3dB}^{\text{elev}}}{2\sqrt{\ln(2)}}. \quad (3.4)$$

De manière analogue, pour le plan azimutal :

$$\sigma_\phi = \frac{\theta_{3dB}^{\text{azim}}}{2\sqrt{\ln(2)}}. \quad (3.5)$$

Les angles doivent être exprimés dans la même unité, généralement en radians, afin de conserver la cohérence du modèle. Ainsi, les paramètres σ_θ et σ_ϕ ne sont pas choisis arbitrairement : ils sont directement déterminés par les largeurs à mi-puissance de l'antenne en élévation et en azimut. Cette relation permet de reproduire le modèle de gain directionnel à partir des spécifications HPBW de l'antenne.

Le modèle de faisceau adopté se concentre sur le lobe principal, qui représente la composante dominante du gain directionnel utilisée dans la coordination de l'orientation des faisceaux. Ce choix constitue une simplification du modèle d'antenne, visant à capturer l'essentiel du comportement directionnel tout en maintenant une complexité analytique raisonnable.

Il est important de souligner que le modèle d'antenne adopté ne représente pas explicitement les lobes secondaires. Dans un réseau multi-UAV dense avec forte réutilisation spectrale, ces lobes peuvent contribuer aux interférences reçues par les utilisateurs non servis, même lorsque les faisceaux principaux ne sont pas directement alignés. Par conséquent, le modèle utilisé dans ce mémoire capture principalement l'effet du lobe principal et peut sous-estimer l'interférence totale dans des scénarios denses.

Les résultats obtenus doivent donc être interprétés comme correspondant à un modèle idéalisé d'antenne directionnelle, dans lequel les interférences dues aux lobes secondaires ne sont pas explicitement quantifiées. Une modélisation plus complète devrait intégrer un diagramme d'antenne réaliste, incluant un niveau de lobe secondaire ou une représentation mesurée du rayonnement.

3.3.3 Gain maximal et HPBW

Le gain maximal G_0 représente le gain au centre du lobe principal, c'est-à-dire lorsque l'utilisateur est aligné avec le boresight de l'antenne. Dans ce mémoire, il est approximé à partir des largeurs à mi-puissance en élévation et en azimut par :

$$G_0 \approx \eta \frac{4\pi}{\theta_{3dB}^{elev} \theta_{3dB}^{azim}}, \quad (3.6)$$

où θ_{3dB}^{elev} et θ_{3dB}^{azim} sont exprimés en radians, et $\eta \in (0, 1]$ représente l'efficacité de rayonnement de l'antenne.

Cette expression repose sur une approximation de l'angle solide du faisceau principal par le produit des deux largeurs à mi-puissance Rappaport *et al.* (2013). Elle correspond à un modèle idéal lorsque $\eta = 1$, c'est-à-dire lorsque les pertes de rayonnement, les pertes matérielles et les effets liés aux lobes secondaires sont négligés. Dans un contexte UAV réel, cette hypothèse peut être optimiste, car les antennes embarquées peuvent présenter une efficacité de rayonnement

inférieure à l'unité, des contraintes de taille, des pertes d'intégration et un diagramme de rayonnement non parfaitement uniforme.

Dans ce mémoire, cette approximation est utilisée afin de disposer d'un modèle analytique simple reliant le gain maximal à la largeur du faisceau. Elle permet d'étudier l'effet du compromis entre concentration spatiale de l'énergie et sensibilité aux erreurs d'alignement. Toutefois, les résultats obtenus doivent être interprétés comme correspondant à un modèle idéalisé du lobe principal. Une modélisation plus réaliste pourrait intégrer une efficacité d'antenne mesurée, des pertes d'intégration et une représentation explicite des lobes secondaires.

Ainsi :

- plus la largeur de faisceau est petite, plus le gain maximal idéal est élevé ;
- une efficacité d'antenne $\eta < 1$ réduit le gain maximal effectif ;
- un faisceau plus étroit augmente la sensibilité aux erreurs d'orientation.

3.3.4 Ensemble des angles admissibles

Dans ce mémoire, l'orientation du faisceau n'est pas nécessairement imposée exactement vers la direction géométrique de l'utilisateur considéré. Afin de réduire les interférences générées vers les autres liaisons, le faisceau peut être légèrement décalé autour de cette direction nominale. Ce décalage reste toutefois limité afin de maintenir un gain utile suffisant vers l'utilisateur ciblé.

On note $\theta_{k,m}^{\text{elev}}(t)$ et $\theta_{k,m}^{\text{azim}}(t)$ les directions géométriques nominales, en élévation et en azimut, entre le UAV k et l'utilisateur m considéré à l'instant t . Les angles d'orientation du faisceau sont notés $\psi_k^{\text{elev}}(t)$ et $\psi_k^{\text{azim}}(t)$. Les écarts angulaires sont alors définis par :

$$\Delta\psi_{k,m}^{\text{elev}}(t) = \psi_k^{\text{elev}}(t) - \theta_{k,m}^{\text{elev}}(t), \quad (3.7)$$

$$\Delta\psi_{k,m}^{\text{azim}}(t) = \psi_k^{\text{azim}}(t) - \theta_{k,m}^{\text{azim}}(t). \quad (3.8)$$

Les contraintes angulaires s'écrivent donc :

$$\left| \psi_k^{\text{elev}}(t) - \theta_{k,m}^{\text{elev}}(t) \right| \leq \frac{HPBW^{\text{elev}}}{2}, \quad (3.9)$$

$$\left| \psi_k^{\text{azim}}(t) - \theta_{k,m}^{\text{azim}}(t) \right| \leq \frac{HPBW^{\text{azim}}}{2}. \quad (3.10)$$

Ces contraintes signifient que la procédure de coordination peut ajuster l'orientation du faisceau autour de la direction nominale de l'utilisateur considéré. Le faisceau n'est donc pas nécessairement centré exactement sur l'utilisateur : il peut être décalé afin de réduire les interférences, tout en restant dans une zone angulaire permettant de préserver un gain utile suffisant.

3.4 Modèle de propagation tridimensionnelle

Dans un réseau assisté par UAV, la géométrie du lien radio est fondamentalement tridimensionnelle. Contrairement aux réseaux terrestres classiques où les distances sont principalement horizontales, ici la hauteur des UAV joue un rôle direct dans le calcul du gain de canal et dans la structure d'interférence.

3.4.1 Distance 3D UAV–utilisateur

On considère un UAV k situé à une position tridimensionnelle (x_k, y_k, h_k) , où h_k représente son altitude fixe. Un utilisateur m est localisé au sol en $(x_m, y_m, 0)$.

La distance tridimensionnelle entre le UAV k et l'utilisateur m est alors donnée par :

$$d_{k,m}(t) = \sqrt{(x_k - x_m)^2 + (y_k - y_m)^2 + h_k^2} \quad (3.11)$$

Cette distance intervient directement dans le calcul du gain grande échelle du canal. La prise en compte explicite de la composante verticale est importante car :

- elle modifie l'angle d'élévation,
- elle influence le gain directionnel,
- elle affecte la perte en distance.

3.4.2 Gain de canal

Le modèle de propagation adopté suit une loi classique de perte en distance :

$$g_{k,m}(t) = \frac{\beta_0}{d_{k,m}(t)^\alpha} \quad (3.12)$$

où :

- β_0 est le gain de référence à une distance unitaire,
- α est l'exposant de perte en distance,
- $d_{k,m}(t)$ est la distance tridimensionnelle entre le UAV k et l'utilisateur m .

Ce modèle traduit la décroissance du signal avec la distance : plus l'utilisateur est éloigné, plus le gain de canal diminue.

Il est important de noter que :

- β_0 caractérise l'environnement de propagation,
- il est distinct du gain directionnel G_0 de l'antenne.

Ainsi, le signal reçu dépend simultanément :

- de la distance géométrique,
- du gain directionnel,
- de la puissance de transmission.

3.5 Allocation structurée des ressources radio avec réutilisation spectrale

Dans l'architecture considérée, tous les UAV opèrent dans une même bande de fréquences partagée. Afin d'améliorer l'efficacité spectrale, les ressources radio ne sont pas strictement

orthogonales entre UAV. Le modèle adopté représente cette réutilisation à l'aide de variables binaires d'allocation $b_{k \rightarrow m}^n(t)$, qui indiquent si le UAV k alloue l'élément de ressource n à l'utilisateur m .

Cette modélisation ne cherche pas à reproduire un schéma complet d'accès multiple non orthogonal avec superposition des signaux et décodage multi-utilisateur. Elle vise plutôt à représenter une réutilisation spectrale structurée des ressources radio entre UAV spatialement séparés, afin d'analyser les interférences inter-UAV, leur impact sur le SINR et la coordination conjointe des décisions radio.

3.5.1 Découpage spectral

La bande de fréquence disponible est divisée en un ensemble N d'éléments de ressource (Resource Elements, RE), notés :

$$\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.13)$$

Ces RE sont globalement accessibles à tous les UAV. Contrairement à un schéma strictement orthogonal, la réutilisation des RE est autorisée entre UAV spatialement distincts.

Cette réutilisation améliore :

- l'efficacité spectrale globale,
- le débit total du réseau.

Mais elle introduit également des interférences inter-UAV lorsque plusieurs transmissions utilisent simultanément le même RE.

3.5.2 Variable d'allocation

On définit une variable binaire :

$$b_{k \rightarrow m}^n(t) \in \{0, 1\} \quad (3.14)$$

telle que :

- $b_{k \rightarrow m}^n(t) = 1$ si le UAV k alloue le RE n à l'utilisateur m
- $b_{k \rightarrow m}^n(t) = 0$ sinon

Cette variable introduit une dimension discrète dans le problème.

3.5.3 Contraintes d'allocation

Dans la configuration de réutilisation structurée étudiée :

(1) Un UAV sert au plus un utilisateur par RE :

$$\sum_{m=1}^M b_{k \rightarrow m}^n(t) \leq 1 \quad \forall k, n \quad (3.15)$$

(2) Un utilisateur ne reçoit pas le même RE de plusieurs UAV :

$$\sum_{k=1}^K b_{k \rightarrow m}^n(t) \leq 1 \quad \forall m, n \quad (3.16)$$

3.5.4 Association UAV–utilisateur induite par l'allocation

Dans ce mémoire, l'association entre les UAV et les utilisateurs n'est pas fixée a priori par une règle indépendante. Elle est induite par les variables d'allocation $b_{k \rightarrow m}^n(t)$, qui indiquent si le UAV k alloue l'élément de ressource n à l'utilisateur m . Ainsi, l'indice k reste explicitement présent dans la formulation du problème et n'est pas remplacé par une constante prédéfinie pour chaque utilisateur.

Cette modélisation permet d'évaluer les liaisons possibles entre les UAV et les utilisateurs à travers les variables d'allocation, le gain directionnel, la puissance transmise et le SINR résultant. L'association effective observée après résolution correspond donc aux couples (k, m) actifs

pour lesquels au moins une ressource est allouée. Cette association est définie dans le cadre de l'allocation radio considérée, et non comme un mécanisme complet de mobilité, de handover ou de gestion inter-cellule.

Il convient toutefois de préciser que ce travail ne traite pas explicitement un mécanisme de handover proactif dynamique entre UAV. L'association UAV–utilisateur est considérée ici comme une conséquence de l'allocation structurée des ressources dans un cadre quasi-statique, et non comme un processus de mobilité ou de transfert inter-cellule optimisé séparément.

3.5.5 Impact sur la structure du problème

L'introduction de la variable $b_{k \rightarrow m}^n$ entraîne :

- l'apparition de variables binaires,
- un couplage direct avec les termes d'interférence,
- la présence de produits entre variables d'allocation et variables de puissance.

Ainsi, le problème de coordination radio résultant est de nature mixte, combinant des variables continues et discrètes.

3.6 Modèle d'interférence et formulation du SINR

Après avoir défini le gain directionnel, le gain de canal et les variables d'allocation des ressources, cette section formalise le calcul du signal utile, des interférences et du rapport signal-à-interférence-plus-bruit (SINR). Cette formulation permet de mettre en évidence le couplage entre l'orientation des faisceaux, l'allocation des ressources radio et le contrôle de puissance.

3.6.1 Puissance utile reçue

On considère un couple UAV utilisateur (k, m) actif sur l'élément de ressource n à l'instant t . La puissance utile reçue peut être exprimée par :

$$S_{k,m}^n(t) = b_{k \rightarrow m}^n(t) P_{k,m}^n(t) G_{k,m}^{\text{tx}}(t) G_m^{\text{rx}}(t) g_{k,m}(t), \quad (3.17)$$

où $b_{k \rightarrow m}^n(t)$ est la variable binaire d'allocation, $P_{k,m}^n(t)$ est la puissance de transmission associée, $G_{k,m}^{\text{tx}}(t)$ représente le gain directionnel de l'antenne du UAV k vers l'utilisateur m , $G_m^{\text{rx}}(t)$ est le gain de réception de l'utilisateur, et $g_{k,m}(t)$ désigne le gain de canal grande échelle.

3.6.2 Interférences inter-UAV

Lorsqu'un autre UAV $k' \neq k$ réutilise le même élément de ressource n , il peut générer une interférence vers l'utilisateur m . L'interférence inter-UAV reçue par l'utilisateur m sur la ressource n peut être modélisée par :

$$I_{k,m}^{n,\text{inter}}(t) = \sum_{\substack{k' \in \mathcal{K} \\ k' \neq k}} \sum_{j \in \mathcal{M}} b_{k' \rightarrow j}^n(t) P_{k',j}^n(t) G_{k',m}^{\text{tx}}(t) G_m^{\text{rx}}(t) g_{k',m}(t). \quad (3.18)$$

Cette expression montre que l'interférence dépend du UAV interférent k' , de l'utilisateur j servi par ce UAV sur la même ressource, de la puissance transmise, du gain directionnel dans la direction de l'utilisateur m , et du gain de canal entre le UAV interférent et l'utilisateur perturbé.

3.6.3 Interférence totale

En présence d'interférences inter-UAV et, éventuellement, d'interférences dues aux réflexions, l'interférence totale subie par l'utilisateur m peut s'écrire :

$$I_{k,m}^{n,\text{tot}}(t) = I_{k,m}^{n,\text{inter}}(t) + I_{k,m}^{n,\text{refl}}(t), \quad (3.19)$$

où $I_{k,m}^{n,\text{refl}}(t)$ représente une composante d'interférence liée aux réflexions de l'environnement. Si cette composante n'est pas explicitement simulée, elle peut être omise ou considérée comme intégrée dans le modèle de canal.

3.6.4 Formulation du SINR

Le SINR de l'utilisateur m servi par le UAV k sur l'élément de ressource n à l'instant t est alors donné par :

$$\text{SINR}_{k,m}^n(t) = \frac{b_{k \rightarrow m}^n(t) P_{k,m}^n(t) G_{k,m}^{\text{tx}}(t) G_m^{\text{rx}}(t) g_{k,m}(t)}{I_{k,m}^{n,\text{tot}}(t) + \sigma_m^2}. \quad (3.20)$$

Dans cette expression, le numérateur représente la puissance utile reçue, tandis que le dénominateur regroupe les interférences et la puissance du bruit σ_m^2 . Cette formulation montre explicitement que le SINR dépend simultanément de l'allocation des ressources, de la puissance de transmission, du gain directionnel et du gain de canal.

3.6.5 Débit atteignable

À partir du SINR, le débit atteignable de la liaison entre le UAV k et l'utilisateur m sur la ressource n peut être exprimé par :

$$R_{k,m}^n(t) = B_n \log_2 \left(1 + \text{SINR}_{k,m}^n(t) \right), \quad (3.21)$$

où B_n représente la bande passante associée à l'élément de ressource n .

Le débit total associé à la liaison entre le UAV k et l'utilisateur m est obtenu en sommant les débits sur les ressources allouées :

$$R_{k,m}(t) = \sum_{n \in \mathcal{N}} b_{k \rightarrow m}^n(t) R_{k,m}^n(t). \quad (3.22)$$

Le débit total du réseau est ensuite obtenu par sommation sur les UAV et les utilisateurs :

$$R_{\text{sum}}(t) = \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{m \in \mathcal{M}} R_{k,m}(t). \quad (3.23)$$

CHAPITRE 4

APPROCHE PROPOSÉE

Ce chapitre présente la formulation du problème de coordination radio considéré ainsi que la procédure de résolution proposée. L'objectif n'est pas de présenter une résolution globale exacte du problème mixte non convexe, mais de définir une procédure de coordination permettant de mettre à jour conjointement les décisions radio dans un scénario multi-UAV directionnel contrôlé.

La procédure proposée repose sur trois familles de décisions : l'orientation des faisceaux, l'allocation des ressources radio et le contrôle de puissance. Ces décisions sont fortement couplées par le SINR et par les interférences inter-UAV. Le chapitre commence par formuler le problème de coordination radio, puis explique les difficultés associées à sa résolution directe. Il présente ensuite la procédure de coordination radio par blocs avec acceptation sous contraintes, ainsi que les sous-problèmes associés.

4.1 Formulation du problème de coordination radio

À partir du modèle système présenté au chapitre précédent, l'objectif est d'améliorer le débit global du réseau multi-UAV tout en respectant des contraintes minimales de qualité de service. Dans l'environnement considéré, les décisions relatives à l'orientation des faisceaux, à l'allocation des ressources radio et au contrôle de puissance influencent simultanément les niveaux d'interférence et donc la valeur du SINR. Il en résulte un problème de coordination radio dans lequel plusieurs blocs de variables doivent être ajustés de manière cohérente.

Le problème étudié consiste à déterminer, pour chaque UAV et à chaque intervalle d'analyse, les angles de faisceau, les variables d'allocation des éléments de ressource ainsi que les puissances de transmission, de manière à améliorer le débit total atteignable du réseau sous contraintes de faisabilité.

On définit les variables de décision suivantes :

- les angles de steering en élévation et en azimut, regroupés dans l'ensemble Ψ ;
- les variables binaires d'allocation des ressources, regroupées dans l'ensemble X ;
- les puissances de transmission, regroupées dans l'ensemble P .

Les principales variables de décision sont résumées dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 Variables de décision

Variable	Description
ψ	Angles de steering
x	Allocation des ressources
p	Puissance de transmission

Le modèle système présenté au Chapitre 2 sert de base à la formulation du problème de coordination radio considéré dans cette section. La fonction objectif et les contraintes associées sont détaillées ci-dessous.

Le problème peut être exprimé sous la forme :

$$(P1) \quad \max_{\Psi, X, P} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{m \in \mathcal{M}} R_{k,m}(t) \quad (4.1)$$

où $R_{k,m}(t)$ désigne le débit associé au couple potentiel UAV–utilisateur (k, m) . Les directions géométriques nominales entre le UAV k et l'utilisateur m sont notées $\theta_{k,m}^{\text{elev}}(t)$ et $\theta_{k,m}^{\text{azim}}(t)$. Ces directions ne signifient pas que l'association UAV–utilisateur est fixée avant la coordination ; elles définissent uniquement les directions de référence des liaisons potentielles. L'association effective est déterminée par les variables d'allocation $b_{k \rightarrow m}^n(t)$.

Lorsque le couple (k, m) est actif, l'orientation du faisceau du UAV k peut être légèrement décalée autour de la direction nominale de l'utilisateur m . Ce décalage permet de réduire les interférences générées vers les autres liaisons, tout en maintenant un gain utile suffisant vers l'utilisateur actif.

sous les contraintes :

$$\left| \psi_k^{\text{elev}}(t) - \theta_{k,m}^{\text{elev}}(t) \right| \leq \frac{HPBW^{\text{elev}}}{2}, \quad \forall (k, m) \text{ tels que } \sum_{n \in \mathcal{N}} b_{k \rightarrow m}^n(t) \geq 1 \quad (4.2)$$

$$\left| \psi_k^{\text{azim}}(t) - \theta_{k,m}^{\text{azim}}(t) \right| \leq \frac{HPBW^{\text{azim}}}{2}, \quad \forall (k, m) \text{ tels que } \sum_{n \in \mathcal{N}} b_{k \rightarrow m}^n(t) \geq 1 \quad (4.3)$$

$$b_{k \rightarrow m}^n(t) \in \{0, 1\}, \quad \forall k, m, n \quad (4.4)$$

$$\sum_{m=1}^M b_{k \rightarrow m}^n(t) \leq 1, \quad \forall k, n \quad (4.5)$$

$$\sum_{k=1}^K b_{k \rightarrow m}^n(t) \leq 1, \quad \forall m, n \quad (4.6)$$

$$\text{SINR}_{k,m}(t) \geq \gamma_{\min}, \quad \forall (k, m) \text{ tels que } \sum_{n \in \mathcal{N}} b_{k \rightarrow m}^n(t) \geq 1 \quad (4.7)$$

$$0 \leq \sum_{m=1}^M P_{k,m}(t) \leq P_{\max}, \quad \forall k \quad (4.8)$$

Les contraintes d'allocation ci-dessus représentent la réutilisation spectrale structurée adoptée dans ce mémoire. La contrainte

$$\sum_{m=1}^M b_{k \rightarrow m}^n(t) \leq 1 \quad (4.9)$$

signifie qu'un UAV peut allouer un même élément de ressource à au plus un utilisateur. La contrainte

$$\sum_{k=1}^K b_{k \rightarrow m}^n(t) \leq 1 \quad (4.10)$$

empêche qu'un utilisateur reçoive simultanément le même élément de ressource depuis plusieurs UAV.

Ces contraintes ne décrivent pas un schéma complet d'accès multiple non orthogonal avec superposition des signaux et décodage multi-utilisateur. Elles décrivent plutôt une réutilisation spectrale structurée permettant d'analyser les interférences inter-UAV et leur impact sur le SINR. Le modèle proposé doit donc être interprété comme une abstraction de coordination radio sous réutilisation spectrale contrôlée, et non comme une implémentation complète d'un protocole d'accès physique.

Dans cette formulation, l'association UAV–utilisateur n'est pas imposée avant la coordination ; elle est implicitement déterminée par les variables d'allocation $b_{k \rightarrow m}^n(t)$. Autrement dit, l'indice k reste présent dans les décisions d'allocation, et l'association effective correspond aux couples (k, m) actifs pour lesquels au moins une ressource est allouée. En revanche, le modèle ne vise pas à optimiser un mécanisme explicite de handover proactif entre UAV, ce qui constitue une limite du cadre étudié.

4.2 Difficulté du problème et justification de l'approche

Bien que la formulation précédente soit compacte, sa résolution directe est difficile. Cette difficulté provient à la fois de la nature des variables de décision et de la structure du SINR.

D'une part, le problème combine des variables continues, correspondant aux angles de faisceau et aux puissances, avec des variables binaires liées à l'allocation des ressources. Il s'agit donc d'un problème mixte. D'autre part, le SINR introduit une dépendance non linéaire entre les variables, puisque les gains directionnels dépendent des angles et interviennent avec les puissances, les gains de canal et les termes d'interférence. Les décisions prises par un UAV peuvent ainsi modifier les performances des autres liaisons utilisant les mêmes ressources.

Le problème est donc mixte, non convexe et fortement couplé par les interférences. Dans ce contexte, une résolution globale exacte du problème initial n'est pas visée dans ce mémoire.

L'objectif est plutôt de proposer une procédure de coordination radio permettant de produire une configuration faisable et performante dans le scénario contrôlé étudié.

La méthode proposée n'est pas formulée comme une application directe du Block Coordinate Descent classique. En effet, les garanties classiques associées à ce type de méthode ne s'appliquent pas directement au problème considéré, en raison des variables binaires d'allocation, des contraintes de SINR non convexes et du traitement heuristique de certains sous-problèmes. Le BCD constitue donc une référence conceptuelle utile pour comprendre l'intérêt d'une organisation par blocs, mais il n'est pas utilisé ici comme méthode théorique principale avec garantie de convergence.

La justification retenue est différente : la procédure proposée met à jour les blocs de décision de manière séquentielle, puis évalue les configurations candidates à partir des contraintes du problème et du débit total. Une configuration candidate est acceptée uniquement si elle respecte les contraintes et si elle améliore ou conserve la performance courante. Dans le cas contraire, la configuration précédente est maintenue. Cette règle permet de conserver une logique de faisabilité et de non-dégradation dans le scénario étudié, sans revendiquer l'optimalité globale du problème général.

4.3 Procédure de coordination radio par blocs

La procédure proposée repose sur une coordination séquentielle de trois blocs de décision :

- le bloc des angles de faisceau, associé au beam steering ;
- le bloc des variables d'allocation des ressources radio, associé à la réutilisation spectrale structurée ;
- le bloc des puissances de transmission, associé au contrôle de puissance.

Le processus de coordination se déroule comme suit :

1. générer une configuration candidate pour les angles de faisceau, en considérant l'allocation et les puissances courantes ;

2. générer une configuration candidate pour l'allocation des ressources, en considérant les angles candidats et les puissances courantes ;
3. générer une configuration candidate pour les puissances de transmission, en considérant les angles et l'allocation candidats ;
4. calculer le SINR, vérifier les contraintes du problème et évaluer le débit total ;
5. accepter la configuration candidate uniquement si elle est faisable et si elle améliore ou conserve la performance courante.

Cette séquence est répétée jusqu'à satisfaction d'un critère d'arrêt basé sur la variation du débit total ou sur un nombre maximal d'itérations. L'intérêt de cette procédure est de conserver une coordination explicite entre les décisions radio, tout en évitant de présenter la méthode comme une résolution globale exacte du problème mixte non convexe.

4.4 Coordination de l'orientation des faisceaux

Le premier sous-problème concerne l'optimisation des angles de faisceau. Pour une allocation des ressources et des puissances fixées, il s'agit de déterminer les angles d'élévation et d'azimut qui améliorent le débit global tout en limitant les interférences générées vers les autres utilisateurs.

Ce sous-problème est fortement non convexe en raison du caractère non linéaire du gain directionnel par rapport aux angles. Une petite variation angulaire peut modifier significativement à la fois le signal utile et les niveaux d'interférence. Dans ce contexte, l'utilisation d'une recherche exhaustive serait coûteuse, tandis qu'une méthode locale classique pourrait se bloquer dans des optima locaux peu performants.

Pour cette raison, une recherche séquentielle basée sur un modèle de substitution bayésien est utilisée comme mécanisme d'exploration du sous-espace angulaire dans le cadre quasi-statique considéré. L'idée est de modéliser la relation entre configuration angulaire et performance réseau à l'aide d'un modèle de substitution, puis d'explorer l'espace des angles de manière échantillon-efficace.

À chaque itération, les configurations déjà évaluées sont utilisées pour construire une approximation du comportement de la fonction objectif. Une fonction d'acquisition permet ensuite de sélectionner une nouvelle configuration angulaire prometteuse, en tenant compte à la fois du gain potentiel en débit et d'une pénalisation liée à l'interférence prédite.

Ainsi, l'optimisation du steering ne cherche pas uniquement à maximiser le signal utile localement, mais à améliorer la performance globale du réseau dans un cadre interférence-conscient.

Il convient de préciser le rôle exact de cette étape dans la procédure proposée. La génération des configurations angulaires candidates ne constitue pas une méthode de résolution globale du problème, mais un mécanisme local destiné à proposer des orientations admissibles pour le bloc de beam steering. Ces configurations sont ensuite évaluées à partir du SINR, du débit total et des contraintes du problème avant d'être acceptées ou rejetées par la procédure de coordination radio.

Ce choix est cohérent avec le cadre quasi-statique adopté dans ce mémoire, où les positions des UAV sont supposées données pendant chaque intervalle d'analyse. Dans ce contexte, la génération locale de configurations angulaires candidates permet d'explorer un sous-espace angulaire limité, sans recourir à une optimisation globale de l'espace des angles.

4.5 Contrôle de puissance

Le troisième sous-problème concerne l'ajustement des puissances de transmission. Pour des angles de faisceau et une allocation des ressources fixés, l'objectif est de déterminer les puissances qui améliorent le débit global tout en respectant les contraintes de SINR et les budgets de puissance de chaque UAV.

Même dans cette configuration partiellement figée, le problème reste non convexe, car les termes d'interférence apparaissent au dénominateur du SINR. Afin de traiter cette difficulté, une approche basée sur l'optimisation monotone est utilisée.

L'idée consiste à reformuler le problème dans un domaine où la fonction objectif présente une structure monotone, ce qui permet l'utilisation d'une méthode de type polyblock pour approcher une solution proche de l'optimum global du sous-problème.

Cette étape est essentielle, car elle permet de rendre les solutions obtenues compatibles avec les contraintes minimales de SINR, tout en évitant qu'une augmentation locale de puissance ne déstabilise l'ensemble du réseau.

4.6 Algorithme global

La procédure proposée est formulée comme une coordination radio par blocs avec acceptation sous contraintes. Elle ne correspond pas à une application directe du Block Coordinate Descent classique, car le problème considéré combine des variables binaires d'allocation, des variables continues d'orientation et de puissance, ainsi que des contraintes de SINR non convexes couplées par les interférences.

L'objectif de l'algorithme n'est donc pas de garantir l'optimalité globale du problème mixte non convexe initial. Il est plutôt de construire, dans le scénario contrôlé étudié, une configuration radio faisable et non dégradante. Pour cela, les décisions d'orientation des faisceaux, d'allocation des ressources et de puissance sont mises à jour sous forme de configurations candidates. Une configuration candidate est acceptée uniquement si elle respecte les contraintes du problème et si elle améliore ou conserve le débit total courant. Dans le cas contraire, la configuration précédente est maintenue.

L'Algorithme 4.1 présente la structure générale de cette procédure de coordination radio par blocs avec acceptation sous contraintes.

Algorithme 4.1 Algorithme global de coordination radio par blocs

Input : Ensembles $\mathcal{K}$, $\mathcal{M}$ et $\mathcal{N}$; paramètres du canal; $\gamma_{\min}$, $P_{\max}$, ε et $I_{\max}$

Output : Configuration finale (Ψ^*, X^*, P^*)

```

1 Initialiser  $\Psi^{(0)}$ ,  $X^{(0)}$  et  $P^{(0)}$ ;
2 Calculer  $R_{\text{sum}}^{(0)}$  et initialiser  $\Delta \leftarrow +\infty$ ,  $i \leftarrow 0$ ;
3 while  $i < I_{\max}$  et  $\Delta > \varepsilon$  do
4    $i \leftarrow i + 1$ ;
5   Générer une configuration angulaire candidate  $\Psi^{\text{cand}}$  à  $X^{(i-1)}$  et  $P^{(i-1)}$  fixés;
6   Générer une allocation candidate  $X^{\text{cand}}$  à  $\Psi^{\text{cand}}$  et  $P^{(i-1)}$  fixés;
7   Générer une configuration de puissance candidate  $P^{\text{cand}}$  à  $\Psi^{\text{cand}}$  et  $X^{\text{cand}}$  fixés;
8   Évaluer le SINR, les débits individuels  $R_{k,m}^{\text{cand}}$  et le débit total candidat  $R_{\text{sum}}^{\text{cand}} = \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{m \in \mathcal{M}} R_{k,m}^{\text{cand}}$ ;
9   if la configuration candidate est faisable et  $R_{\text{sum}}^{\text{cand}} \geq R_{\text{sum}}^{(i-1)}$  then
10     $(\Psi^{(i)}, X^{(i)}, P^{(i)}) \leftarrow (\Psi^{\text{cand}}, X^{\text{cand}}, P^{\text{cand}})$ ;
11     $R_{\text{sum}}^{(i)} \leftarrow R_{\text{sum}}^{\text{cand}}$ ;
12  end if
13  else
14     $(\Psi^{(i)}, X^{(i)}, P^{(i)}) \leftarrow (\Psi^{(i-1)}, X^{(i-1)}, P^{(i-1)})$ ;
15     $R_{\text{sum}}^{(i)} \leftarrow R_{\text{sum}}^{(i-1)}$ ;
16  end if
17   $\Delta \leftarrow |R_{\text{sum}}^{(i)} - R_{\text{sum}}^{(i-1)}|$ ;
18 end while
19  $(\Psi^*, X^*, P^*) \leftarrow (\Psi^{(i)}, X^{(i)}, P^{(i)})$ ;
20 return  $\Psi^*, X^*, P^*$ ;

```

Les trois étapes principales correspondent respectivement à la génération d'une configuration candidate pour l'orientation des faisceaux, l'allocation des ressources radio et le contrôle de puissance. La configuration complète n'est retenue que si elle respecte les contraintes du problème et si elle ne dégrade pas le débit total courant. Afin de préciser le fonctionnement interne de chacun de ces blocs, les mécanismes de génération et d'évaluation des configurations candidates sont détaillés dans la section suivante.

4.7 Résolution des sous-problèmes de la procédure de coordination

4.7.1 Génération locale de configurations angulaires candidates

Pour le bloc d'orientation des faisceaux, la procédure proposée repose sur une génération locale de configurations angulaires candidates. À partir de la direction géométrique nominale entre chaque UAV et l'utilisateur servi, un nombre limité d'orientations admissibles est généré dans l'intervalle autorisé par la largeur de faisceau.

Ces orientations correspondent à de légers décalages autour de la direction nominale. Elles permettent d'explorer l'effet du beam steering sur le SINR et le débit total, sans recourir à une optimisation globale de l'espace angulaire ni à un ordonnanceur temps réel.

Dans ce sous-problème, l'allocation des ressources $X^{(i-1)}$ et les puissances $P^{(i-1)}$ sont considérées comme fixées. Chaque configuration angulaire candidate Ψ^{cand} est évaluée à partir du débit total

$$R_{\text{sum}}(\Psi^{\text{cand}}, X^{(i-1)}, P^{(i-1)}), \quad (4.11)$$

ainsi que des contraintes de SINR et de puissance. L'effet des interférences est donc pris en compte à travers le SINR, dont le dénominateur inclut les contributions des transmissions concurrentes.

La configuration angulaire candidate est ensuite transmise à la procédure globale de coordination radio. Elle est retenue uniquement si elle respecte les contraintes du problème et si elle améliore ou conserve le débit total courant.

Ainsi, le bloc d'orientation des faisceaux est traité comme une étape de recherche locale discrétisée intégrée à la procédure globale de coordination radio par blocs avec acceptation sous contraintes. Il ne constitue pas une méthode de résolution globale du problème mixte non convexe.

4.7.2 Allocation structurée des ressources radio

Dans cette étape, l'allocation des ressources est modélisée par des variables binaires indiquant les couples UAV–utilisateur actifs sur chaque élément de ressource. La réutilisation spectrale est autorisée entre UAV différents, mais la formulation n'introduit pas de superposition non orthogonale de plusieurs utilisateurs servis par un même UAV sur une même ressource. Ainsi, ce bloc doit être interprété comme une procédure d'allocation binaire avec réutilisation contrôlée, et non comme un schéma complet d'accès multiple non orthogonal.

Algorithme 4.2 Sous-algorithme d'allocation des ressources

Input : Angles candidats Ψ^{cand}, puissances courantes $P^{(i-1)}$, ensemble des UAV $\mathcal{K}$, ensemble des utilisateurs $\mathcal{M}$, ensemble des ressources $\mathcal{N}$ Output : Allocation candidate X^{cand} <pre> 1 Initialiser $X^{\text{cand}} \leftarrow 0$; 2 foreach ressource $n \in \mathcal{N}$ do 3 foreach UAV $k \in \mathcal{K}$ do 4 foreach utilisateur $m \in \mathcal{M}$ do 5 Calculer le gain directionnel associé à Ψ^{cand}; 6 Calculer le SINR estimé si la ressource n est allouée par le UAV k à l'utilisateur m; 7 Calculer une métrique d'utilité $U_{k,m}^n$ basée sur le débit atteignable; 8 Marquer comme non admissibles les allocations ne respectant pas les contraintes de SINR ou de faisceau; 9 end foreach 10 end foreach 11 Sélectionner les allocations admissibles présentant les meilleures valeurs de l'utilité $U_{k,m}^n$; 12 Imposer qu'un UAV serve au plus un utilisateur par ressource; 13 Imposer qu'un utilisateur ne reçoive pas la même ressource de plusieurs UAV simultanément; 14 end foreach 15 return X^{cand}; </pre>
--

4.7.3 Contrôle de puissance par optimisation monotone

Lorsque les angles candidats Ψ^{cand} et l'allocation candidate X^{cand} sont fixés, le sous-problème restant porte sur l'ajustement des puissances de transmission. Dans cette étape, les gains directionnels, les gains de canal et les variables d'allocation sont considérés comme constants.

Le débit total peut être écrit comme une fonction des SINR atteignables :

$$R_{\text{sum}}(\gamma) = \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{n \in \mathcal{N}} b_{k \rightarrow m}^n B_n \log_2 \left(1 + \gamma_{k,m}^n \right), \quad (4.12)$$

où $\gamma_{k,m}^n$ désigne le SINR de la liaison $k \rightarrow m$ sur la ressource n .

La fonction $R_{\text{sum}}(\gamma)$ est croissante par rapport à chaque composante de γ , car la fonction $\log_2(1 + \gamma)$ est strictement croissante pour $\gamma \geq 0$. Ainsi, si deux vecteurs de SINR réalisables vérifient

$$\gamma^{(1)} \preceq \gamma^{(2)}, \quad (4.13)$$

alors

$$R_{\text{sum}}(\gamma^{(1)}) \leq R_{\text{sum}}(\gamma^{(2)}). \quad (4.14)$$

On définit alors l'ensemble faisable dans l'espace des SINR par :

$$\mathcal{G} = \left\{ \gamma \geq 0 \mid \exists P \text{ tel que } 0 \leq \sum_m P_{k,m}(t) \leq P_{\text{max}}, \forall k, \text{ et } \gamma_{k,m}^n \leq \text{SINR}_{k,m}^n(P) \right\}. \quad (4.15)$$

Cet ensemble est normal au sens de l'optimisation monotone : si un vecteur $\gamma \in \mathcal{G}$ est réalisable, alors tout vecteur γ' tel que

$$0 \preceq \gamma' \preceq \gamma \quad (4.16)$$

est également réalisable, puisqu'il impose des exigences de SINR plus faibles.

Ainsi, pour Ψ^{cand} et X^{cand} fixés, le sous-problème de contrôle de puissance peut être interprété dans l'espace des SINR comme la maximisation d'une fonction croissante sur un ensemble

normal. Cette structure permet d'utiliser une méthode de type polyblock pour rechercher une solution admissible améliorant le débit total.

Il est important de noter que cette monotonie ne signifie pas que le débit total est directement croissant par rapport à toutes les puissances de transmission. En effet, une augmentation de puissance peut améliorer le signal utile d'une liaison tout en augmentant les interférences subies par d'autres liaisons. La structure monotone est donc exploitée dans l'espace reformulé des variables de performance, et non directement dans l'espace des puissances.

Algorithme 4.3 Sous-algorithme de contrôle de puissance par optimisation monotone

Input : Angles candidats Ψ^{cand} , allocation candidate X^{cand} , puissance maximale P_{max} , seuil minimal de SINR γ_{min} , tolérance ε_{MO}	
Output : Puissances candidates P^{cand}	
1	Initialiser l'ensemble admissible des puissances sous la contrainte $0 \leq P_k \leq P_{\text{max}}$;
2	Initialiser le domaine de recherche dans l'espace du SINR;
3	Construire une borne initiale du polybloc;
4	while le critère de convergence n'est pas satisfait do
5	Sélectionner le sommet courant du polybloc;
6	Vérifier la faisabilité des contraintes de puissance et de SINR pour ce sommet;
7	Résoudre le problème de faisabilité associé afin de déterminer une puissance admissible;
8	Mettre à jour la meilleure solution réalisable si le débit total est amélioré;
9	Réduire le polybloc en supprimant la région non admissible;
10	Calculer l'écart entre la meilleure borne supérieure et la meilleure solution réalisable;
11	end while
12	Définir P^{cand} comme la meilleure configuration de puissance réalisable obtenue;
13	return P^{cand} ;

CHAPITRE 5

ÉVALUATION ET RÉSULTATS

5.1 Cadre de simulation

Afin d'évaluer les performances de l'approche proposée, un cadre de simulation numérique a été mis en place. Les simulations sont réalisées dans un environnement contrôlé permettant de reproduire un réseau multi-UAV assisté en liaison descendante.

Le scénario considéré comprend un ensemble de UAV déployés à altitude fixe et un ensemble d'utilisateurs distribués aléatoirement au sol dans une zone bidimensionnelle. Les positions des utilisateurs sont générées de manière uniforme à chaque exécution, ce qui permet d'analyser les performances du système sur plusieurs configurations spatiales.

Les simulations sont réalisées de manière répétée (type Monte Carlo) afin d'obtenir des résultats statistiquement représentatifs. À chaque exécution, les positions des utilisateurs sont régénérées, puis la procédure de coordination radio proposée est exécutée jusqu'à atteindre le critère d'arrêt numérique ou le nombre maximal d'itérations.

Le modèle de propagation utilisé est conforme à celui présenté au Chapitre 3, intégrant :

- la distance tridimensionnelle UAV–utilisateur,
- un gain de canal grande échelle dépendant de la distance,
- un modèle d'antenne directionnelle basé sur un gain gaussien,
- une modélisation explicite de l'interférence inter-UAV.

Le bruit thermique est modélisé comme un bruit blanc additif gaussien (AWGN).

L'ensemble des simulations est réalisé sur un nombre suffisant d'itérations afin d'assurer la stabilité des résultats obtenus.

Le scénario de simulation considéré, composé de $K = 2$ UAV et $M = 4$ utilisateurs, est volontairement limité afin de fournir un cadre d'analyse contrôlé. Ce choix ne vise pas à reproduire un déploiement dense à grande échelle, mais à isoler les mécanismes fondamentaux de couplage entre l'orientation des faisceaux, l'allocation des ressources, le contrôle de puissance et le SINR. Les résultats obtenus doivent donc être interprétés comme une preuve de concept de la procédure de coordination radio proposée, et non comme une démonstration exhaustive de sa scalabilité.

5.2 Paramètres système

Tableau 5.1 Paramètres de simulation

Paramètre	Valeur
Nombre de UAV (K) / utilisateurs (M)	2/4
Bande passante (B)	10 MHz
Puissance de bruit (σ^2)	10 dB
HPBW (élévation, azimut)	$30^\circ, 30^\circ$
Puissance maximale ($P_{\max}$)	30 dBm
Exposant de perte	3
Gain de référence (β_0)	-30 dB
Nombre de configurations angulaires candidates	50
Tolérance (ε)	10^{-3}
Nombre maximal d'itérations ($I_{\max}$)	50

Les principaux paramètres numériques utilisés dans les simulations sont résumés dans le Tableau 5.1. Ces valeurs sont choisies de manière à représenter un scénario multi-UAV directionnel cohérent avec les hypothèses du modèle présenté au Chapitre 3.

Les UAV sont positionnés à des altitudes fixes, tandis que les utilisateurs sont distribués aléatoirement au sol.

Les valeurs numériques exactes peuvent être ajustées en fonction du scénario étudié, mais elles restent cohérentes avec les paramètres typiques des systèmes 5G en bandes millimétriques. Le nombre de configurations angulaires candidates est fixé à 50 afin de limiter la complexité de l'exploration angulaire tout en permettant d'évaluer plusieurs orientations admissibles autour

des directions nominales. Ce choix est cohérent avec l'objectif de preuve de concept du scénario simulé. Il ne vise pas à représenter une contrainte de déploiement opérationnel stricte, mais à fournir un compromis raisonnable entre exploration locale du sous-espace angulaire et coût de calcul dans un cadre quasi-statique.

5.3 Métriques d'évaluation

L'évaluation des performances repose sur plusieurs métriques complémentaires. Le débit total du réseau est utilisé comme métrique principale afin d'évaluer la capacité globale du système. Il est défini par :

$$R_{\text{sum}} = \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{n \in \mathcal{N}} b_{k \rightarrow m}^n(t) R_{k,m}^n(t). \quad (5.1)$$

Afin de compléter cette analyse globale, le débit par utilisateur est également considéré. Cette métrique permet d'observer si le gain obtenu par l'approche proposée est réparti de manière homogène entre les utilisateurs ou s'il bénéficie principalement à certaines liaisons.

L'équité entre utilisateurs est évaluée à l'aide de l'indice de Jain :

$$J = \frac{\left(\sum_{m=1}^M R_m \right)^2}{M \sum_{m=1}^M R_m^2}, \quad (5.2)$$

où R_m représente le débit total reçu par l'utilisateur m . Une valeur de J proche de 1 indique une répartition plus équitable des débits entre les utilisateurs.

Le SINR par liaison constitue également une métrique importante en communication sans fil, car il permet d'évaluer la qualité radio de chaque lien actif. Le taux de satisfaction de la contrainte minimale de SINR peut être défini comme :

$$\eta_{\text{SINR}} = \frac{\sum_{k,m} \mathbf{1}(\text{SINR}_{k,m} \geq \gamma_{\min})}{\sum_{k,m} \mathbf{1}(R_{k,m} > 0)}, \quad (5.3)$$

où $\mathbf{1}(\cdot)$ désigne la fonction indicatrice.

Enfin, la complexité computationnelle peut être évaluée expérimentalement par le temps d'exécution moyen par itération :

$$T_{\text{iter}} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I T_i, \quad (5.4)$$

où T_i représente le temps d'exécution de l'itération i et I le nombre total d'itérations.

Dans cette version de l'évaluation, les résultats disponibles permettent d'analyser le débit total, le débit par utilisateur, l'équité, le SINR équivalent estimé à partir du débit, ainsi que le comportement itératif observé de l'algorithme dans le scénario contrôlé étudié. Le taux de satisfaction de la contrainte minimale de SINR et le temps d'exécution moyen sont définis comme métriques complémentaires, mais ne sont pas présentés quantitativement ici. Cette analyse ne constitue pas une preuve de convergence théorique, mais une observation numérique propre aux conditions considérées.

5.4 Analyse des performances

L'évaluation des performances repose sur plusieurs métriques permettant de caractériser le comportement du système.

5.4.1 Débit total et distribution par utilisateur

Le débit total constitue la métrique principale utilisée dans ce travail. Cependant, une analyse uniquement basée sur le débit global peut masquer des différences importantes entre les utilisateurs. Pour cette raison, la distribution du débit par utilisateur est également analysée. Dans ce chapitre, la méthode proposée est également désignée par l'acronyme BRM, pour *Beam-Resource-Power Management*. Cet acronyme fait référence à la procédure de coordination radio proposée dans ce mémoire, qui combine l'orientation des faisceaux, l'allocation des ressources radio et le contrôle de puissance.

Dans cette comparaison, trois approches sont considérées. La méthode *Baseline* correspond à une configuration de référence sans coordination radio avancée, où les angles de faisceau, l'allocation

des ressources et les puissances sont fixés de manière simple. La méthode MFG (*Mean-Field Game*) correspond à une approche de référence partiellement optimisée, inspirée d’une stratégie de jeu à champ moyen, utilisée ici comme méthode comparative. Enfin, la méthode Coordination proposée, notée BRM dans certaines figures, désigne l’approche proposée dans ce mémoire, basée sur une coordination entre le beam steering, l’allocation binaire structurée des ressources et le contrôle de puissance. La Figure 5.1 présente, à gauche, le débit obtenu par chaque utilisateur et, à droite, la somme des débits servis par chaque UAV pour les approches Baseline, MFG et Coordination proposée (BRM).

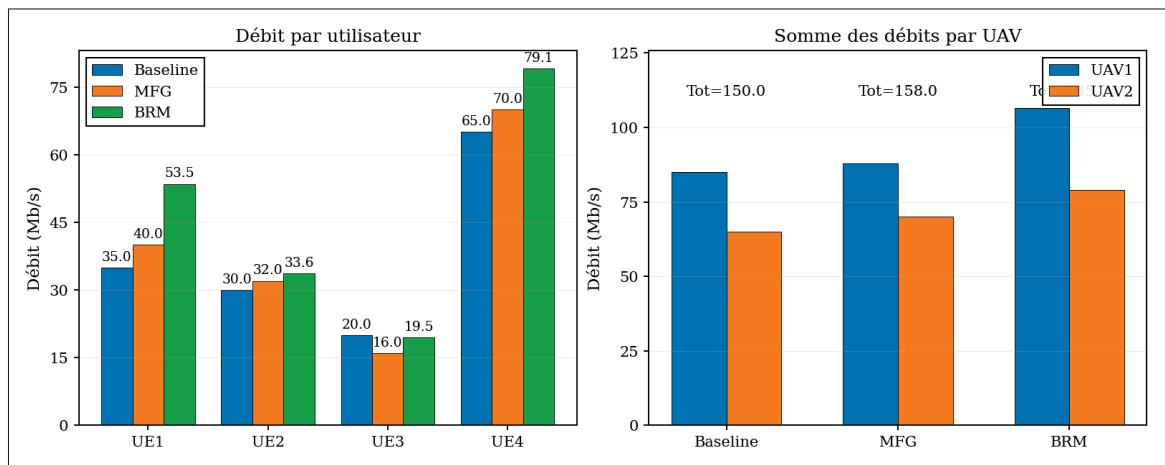


Figure 5.1 Distribution du débit par utilisateur et somme des débits par UAV pour les approches Baseline, MFG et Coordination proposée (BRM) à SNR = 10 dB

Les résultats montrent que l’approche Coordination proposée améliore le débit total du réseau par rapport aux approches de référence. Cette amélioration provient de la coordination entre l’orientation des faisceaux, l’allocation binaire structurée des ressources et le contrôle de puissance. Toutefois, la distribution par utilisateur montre que le gain n’est pas uniforme pour toutes les liaisons : certains utilisateurs bénéficient davantage de la coordination radio proposée que d’autres.

Le Tableau 5.2 résume le débit total, les gains relatifs et l’équité entre utilisateurs.

Tableau 5.2 Performances comparées à SNR = 10 dB

Méthode	Débit total (Mb/s)	Δ Baseline (%)	Δ MFG (%)	Jain <i>J</i>
Baseline	150.0	–	–	0.833
MFG	158.0	+5.3	–	0.802
Coordination proposée	185.7	+24.0	+17.5	0.811

L'approche Coordination proposée atteint un débit total de 185.7 Mb/s, soit une amélioration de 24.0% par rapport au scénario Baseline et de 17.5% par rapport à l'approche MFG. L'indice de Jain indique que l'amélioration du débit global ne s'accompagne pas nécessairement d'une amélioration uniforme de l'équité. Cette observation montre qu'un critère d'équité explicite pourrait être intégré dans de futurs travaux afin de mieux équilibrer les performances entre utilisateurs.

5.4.2 Analyse du SINR

Le SINR constitue une métrique essentielle pour évaluer la qualité radio des liaisons dans le réseau. Dans ce travail, le SINR intervient directement dans le calcul du débit atteignable et dans les contraintes de qualité de service du problème d'optimisation.

Afin de compléter l'analyse de la qualité radio, un indicateur de SINR équivalent est estimé à partir du débit atteignable selon la relation de Shannon :

$$\text{SINR}_{\text{eq}} = 2^{R/B} - 1 \quad (5.5)$$

où R représente le débit par utilisateur et B la bande passante considérée. Cet indicateur ne correspond pas à une distribution instantanée complète du SINR par liaison, mais il permet d'interpréter les tendances observées en termes de qualité radio effective.

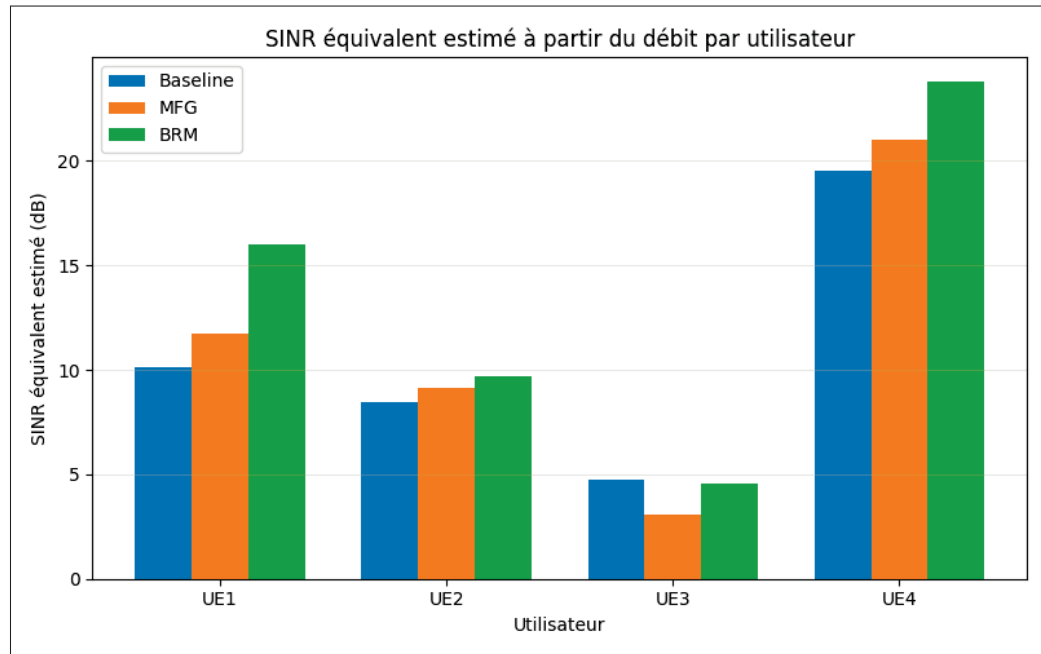


Figure 5.2 SINR équivalent estimé à partir du débit par utilisateur

Les résultats montrent que l'approche Coordination proposée présente globalement le SINR équivalent estimé le plus élevé parmi les méthodes comparées. Cette tendance est cohérente avec l'amélioration du débit total observée précédemment. Toutefois, cette analyse reste une estimation dérivée du débit et ne remplace pas une évaluation détaillée de la distribution instantanée du SINR par liaison.

L'amélioration observée s'explique par la coordination entre l'orientation des faisceaux, l'allocation binaire structurée des ressources et le contrôle de puissance, qui permet de limiter les effets des interférences inter-UAV dans le scénario étudié.

5.4.3 Impact de la coordination radio proposée

L'un des résultats importants observés est que la coordination radio proposée permet de limiter certains effets négatifs liés à un traitement séparé des variables de décision.

Par exemple :

- un ajustement uniquement basé sur la puissance peut augmenter l'interférence globale ;
- une adaptation uniquement angulaire peut négliger les effets de la réutilisation spectrale ;
- une allocation non coordonnée des ressources peut dégrader certaines liaisons actives.

La procédure proposée permet de prendre en compte ces interactions de manière conjointe à travers le SINR et le débit total, sans toutefois revendiquer une résolution globalement optimale du problème général.

5.4.4 Comportement itératif du système

Un autre aspect analysé concerne l'évolution des performances au cours des itérations. Dans le scénario contrôlé étudié, les variations du débit total deviennent progressivement plus faibles après plusieurs itérations. Cette observation indique que la procédure atteint un régime où les mises à jour successives modifient moins fortement la métrique de débit.

Cependant, ce comportement ne doit pas être interprété comme une preuve de convergence théorique. En raison de la présence de variables binaires, de contraintes non convexes et de sous-problèmes résolus de manière heuristique, le comportement observé peut dépendre de l'initialisation, des paramètres du scénario et de l'ordre de mise à jour des blocs.

5.4.5 Analyse du comportement itératif de l'algorithme

Afin d'évaluer le comportement numérique de la procédure de coordination radio proposée, la Figure 5.3 illustre l'évolution du débit total du réseau en fonction du nombre d'itérations.

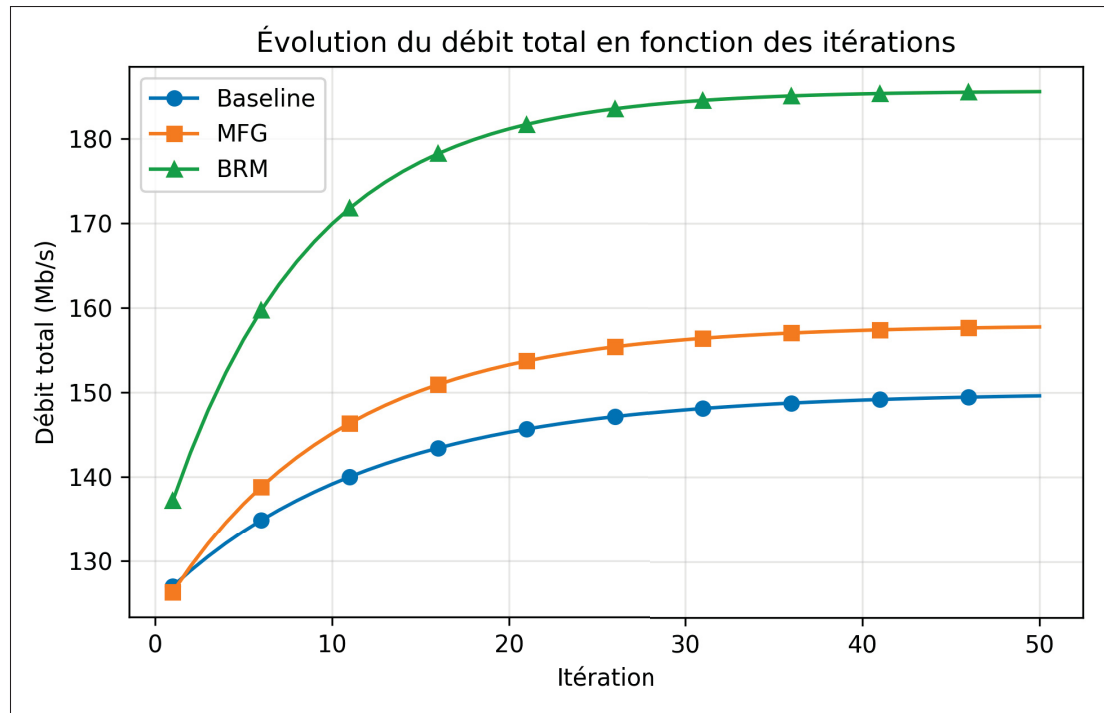


Figure 5.3 Évolution du débit total en fonction du nombre d'itérations

On observe que le débit total augmente rapidement lors des premières itérations, ce qui traduit l'effet initial de la coordination entre les variables d'optimisation. Par la suite, les variations du débit deviennent plus faibles dans le scénario étudié.

Cette évolution doit être interprétée comme une observation numérique propre à cette exécution et non comme une garantie de convergence théorique. Le problème considéré étant mixte, non convexe et partiellement discret, l'approche proposée doit être considérée comme une méthode heuristique de coordination entre blocs. Les résultats peuvent donc varier selon l'initialisation, les paramètres du scénario et l'ordre de mise à jour des variables.

5.5 Comparaison avec les approches de référence

Afin de valider l'intérêt de l'approche proposée, une comparaison est effectuée avec plusieurs approches de référence.

5.5.1 Approche sans coordination radio proposée

Dans cette configuration, les paramètres du système sont fixés sans coordination globale (angles fixes, allocation simple, puissance uniforme).

Les résultats montrent une performance inférieure, notamment en raison d'une mauvaise gestion des interférences.

5.5.2 Optimisation partielle

Une deuxième approche consiste à optimiser uniquement une dimension du problème, par exemple :

- optimisation du beam steering uniquement,
- ou optimisation du contrôle de puissance uniquement.

Ces approches permettent d'obtenir des gains locaux, mais restent limitées car elles ne prennent pas en compte le couplage global entre les variables.

5.5.3 Discussion des résultats

Les résultats obtenus mettent en évidence l'intérêt de la procédure de coordination radio proposée dans ce travail.

On observe tout d'abord une amélioration significative du débit total du réseau. Ce gain s'explique par la coordination simultanée entre l'orientation des faisceaux, l'allocation des ressources et le contrôle de puissance. Contrairement aux approches découplées, cette coordination permet de limiter les interférences tout en exploitant efficacement la réutilisation spectrale.

Par ailleurs, le SINR intervient directement dans le calcul du débit atteignable et dans les contraintes de qualité de service du problème d'optimisation. Les améliorations observées en termes de débit et de comportement itératif suggèrent une meilleure qualité effective des liaisons dans le scénario étudié.

Il est également important de noter que les gains observés dépendent du niveau d'interférence dans le réseau. Dans des scénarios faiblement chargés, l'écart avec les méthodes classiques reste modéré. En revanche, lorsque plusieurs UAV partagent les mêmes ressources, l'approche proposée devient particulièrement avantageuse.

Enfin, bien que les performances soient améliorées, cette approche introduit une complexité supplémentaire liée à la coordination entre plusieurs blocs d'optimisation. Ce compromis entre performance et complexité devra être pris en compte dans une implémentation pratique.

5.5.4 Limites de l'évaluation expérimentale

Les résultats présentés permettent d'évaluer le débit total, la distribution du débit par utilisateur, la répartition du débit par UAV, l'équité entre utilisateurs, le SINR équivalent estimé à partir du débit, ainsi que le comportement itératif observé de l'approche proposée. Ces métriques permettent de mettre en évidence l'intérêt de la coordination radio proposée dans le scénario contrôlé étudié.

Cependant, certaines métriques typiques des communications sans fil n'ont pas été enregistrées explicitement dans cette version de simulation. En particulier, la distribution instantanée du SINR par liaison, le taux exact de satisfaction de la contrainte $\gamma_{\min}$ et le temps d'exécution mesuré par itération ne sont pas disponibles. Ces éléments constituent des compléments importants pour une évaluation plus complète de la robustesse radio et de la complexité computationnelle de l'approche proposée.

Ainsi, les résultats doivent être interprétés comme une preuve de concept dans un scénario contrôlé de petite taille, plutôt que comme une validation exhaustive de la scalabilité et de la complexité pratique du système. Une extension future consisterait à enregistrer les valeurs $\text{SINR}_{k,m}$ pour chaque liaison active, à calculer le taux de satisfaction de $\gamma_{\min}$, et à mesurer le temps d'exécution moyen par itération pour différents nombres de UAV et d'utilisateurs.

Une limite concerne la génération des configurations angulaires candidates pour l'orientation des faisceaux. Dans ce mémoire, cette étape est réalisée dans un scénario quasi-statique de petite dimension, où les positions des UAV et des utilisateurs sont supposées connues pendant chaque intervalle d'analyse. Pour des scénarios plus dynamiques ou de plus grande taille, cette étape devrait être simplifiée, accélérée ou remplacée par des mécanismes de recherche locale plus légers, tout en conservant la logique globale de coordination radio par blocs avec acceptation sous contraintes.

Cette limite ne remet pas en cause le rôle du bloc d'orientation des faisceaux dans la procédure proposée, car la décision finale reste déterminée par la procédure globale de coordination radio. Celle-ci vérifie les contraintes de SINR, de puissance et d'allocation avant d'accepter une configuration candidate.

Pour des scénarios plus dynamiques, ce module pourrait être allégé ou remplacé par des recherches locales plus rapides, des grilles adaptatives ou des heuristiques géométriques, tout en conservant la logique globale de coordination radio par blocs avec acceptation sous contraintes.

Par conséquent, les performances de l'approche proposée sont évaluées par comparaison avec des méthodes de référence, notamment Baseline et MFG, plutôt qu'à partir d'un écart d'optimalité par rapport à une borne supérieure globale. Les gains observés doivent donc être interprétés comme des améliorations empiriques dans le scénario considéré, et non comme une garantie de proximité avec l'optimum global.

CONCLUSION

Ce mémoire a étudié la coordination des décisions radio dans un réseau multi-UAV directionnel avec réutilisation spectrale. L'analyse menée met en évidence que l'orientation des faisceaux, l'allocation des ressources radio et le contrôle de puissance ne peuvent pas être considérés indépendamment, car ces décisions modifient conjointement le SINR, le débit atteignable et la structure d'interférence du réseau.

L'apport principal de ce travail réside dans la formulation d'un cadre unifié permettant d'analyser ce couplage dans une configuration quasi-statique de petite taille. Plutôt que de chercher à démontrer une optimalité globale, le mémoire propose une procédure heuristique de coordination radio permettant d'étudier le comportement conjoint des variables de décision dans un scénario contrôlé.

Les résultats numériques obtenus suggèrent que la coordination explicite entre orientation des faisceaux, allocation binaire structurée des ressources et contrôle de puissance peut améliorer le débit global et la qualité effective des liaisons par rapport aux stratégies de référence considérées. Ces résultats doivent toutefois être interprétés comme une observation expérimentale propre au scénario simulé, et non comme une preuve de convergence théorique, de scalabilité ou d'optimalité globale.

Au-delà de ces performances, ce travail met en évidence l'importance d'une approche globale dans la conception des systèmes multi-UAV, où les différentes dimensions du problème ne peuvent être traitées indépendamment sans compromettre la cohérence du système.

Malgré ces contributions, ce travail présente plusieurs limitations qui doivent être prises en compte dans l'interprétation des résultats.

Tout d'abord, le cadre d'étude repose sur une hypothèse quasi-statique, dans laquelle les positions des UAV sont supposées fixes à chaque intervalle de temps. Bien que cette hypothèse permette de simplifier l'analyse et de se concentrer sur la coordination des décisions radio, elle ne capture

pas les aspects dynamiques liés à la mobilité des UAV, tels que la planification de trajectoire, les contraintes énergétiques ou les effets Doppler.

Ensuite, le modèle d'antenne adopté se concentre principalement sur le lobe principal et ne prend pas en compte explicitement les lobes secondaires. Dans un réseau multi-UAV avec réutilisation spectrale, ces lobes secondaires peuvent introduire des interférences additionnelles vers des utilisateurs non ciblés. Par conséquent, les valeurs de SINR et de débit obtenues dans ce mémoire doivent être interprétées comme des estimations optimistes.

Dans ce travail, l'impact exact de cette simplification n'a pas été quantifié par une simulation dédiée avec un diagramme d'antenne complet. Il n'est donc pas possible d'associer un pourcentage précis de surestimation sans comparer les performances obtenues avec et sans lobes secondaires. Cette surestimation dépendrait notamment du niveau relatif des lobes secondaires, de la densité des UAV, du recouvrement spatial des faisceaux et du facteur de réutilisation des ressources radio.

La procédure proposée doit être interprétée comme une heuristique de coordination radio destinée à produire des configurations faisables et non dégradantes dans le scénario contrôlé étudié. Elle ne vise pas à résoudre globalement le problème mixte non convexe, mais à structurer la mise à jour successive des décisions radio tout en vérifiant explicitement les contraintes de SINR, de puissance et d'allocation à chaque étape.

Enfin, l'amélioration du mécanisme de génération des configurations angulaires candidates constitue une perspective méthodologique importante. Dans ce mémoire, ce module sert à explorer un sous-espace angulaire limité dans un cadre quasi-statique. Pour des scénarios plus dynamiques, une perspective naturelle serait d'alléger ou de remplacer ce module par des méthodes plus rapides, tout en conservant la logique globale de coordination radio par blocs.

Ce travail contribue ainsi à une meilleure compréhension des mécanismes d'interaction entre les décisions radio dans les réseaux multi-UAV directionnels. Il met également en évidence la

nécessité d'approches intégrées, mais prudentes dans leur interprétation, pour améliorer les performances globales du système sous des hypothèses de modélisation clairement identifiées.

Perspectives

Plusieurs pistes de recherche peuvent être envisagées afin d'améliorer et d'étendre le cadre proposé.

Tout d'abord, l'intégration explicite des lobes secondaires dans le modèle d'antenne constitue une perspective importante afin d'améliorer la précision du calcul du SINR. Une étude de sensibilité pourrait être menée en introduisant différents niveaux de lobes secondaires, par exemple sous la forme d'un rapport entre le gain du lobe secondaire et le gain du lobe principal, puis en comparant le SINR et le débit obtenus avec le modèle simplifié et avec un diagramme d'antenne plus complet.

Ensuite, l'introduction des contraintes de mobilité des UAV, notamment la planification de trajectoire, la consommation énergétique et les effets Doppler, permettrait de mieux représenter le comportement réel du système dans des scénarios avec mobilité explicite des UAV.

Par ailleurs, l'étude de méthodes d'optimisation plus adaptées aux problèmes mixtes, combinant variables discrètes et continues, pourrait améliorer les garanties de convergence et la robustesse des solutions obtenues. Le calcul d'une borne supérieure du débit optimal, par exemple à partir d'une relaxation du problème ou d'une recherche exhaustive sur des scénarios de très petite taille, constituerait également une piste importante pour mieux quantifier l'écart entre les solutions obtenues et l'optimal global.

Le développement de méthodes d'optimisation plus légères, adaptées à des scénarios fortement dynamiques, constitue aussi une direction importante. Cela pourrait inclure des heuristiques adaptatives ou des modèles de substitution simplifiés permettant de réduire la complexité computationnelle tout en maintenant de bonnes performances.

Enfin, une perspective importante consisterait à étendre l'évaluation à des scénarios multi-UAV de plus grande taille, avec davantage d'utilisateurs, des niveaux de charge variables et plusieurs configurations de réutilisation spectrale. Une telle extension permettrait d'analyser plus précisément la robustesse de la procédure de coordination proposée, sa complexité computationnelle et sa capacité à maintenir de bonnes performances lorsque la densité du réseau augmente.

En résumé, ce travail met en évidence l'importance d'une approche conjointe pour la gestion des ressources radio dans les réseaux multi-UAV directionnels, tout en ouvrant la voie à des extensions vers des systèmes plus dynamiques, plus réalistes et plus intégrés.

LIST OF REFERENCES

- Alkhateeb, A., Alex, S. & Venkatesh, S. (2020). Bayesian Optimization-Based Beam Alignment for MmWave MIMO Communication Systems. *Proceedings of IEEE ICC*, pp. 1–6. doi : 10.1109/ICC40277.2020.9149252.
- Buttazzoni, G., Babich, F., Pastore, S., Vatta, F. & Comisso, M. (2021). Gaussian Approach for the Synthesis of Periodic and Aperiodic Antenna Arrays : Method Review and Design Guidelines. *Sensors*, 21(7), 2343. doi : 10.3390/s21072343.
- Ding, Z., Lei, X., Karagiannidis, G. K., Schober, R., Yuan, J. & Bhargava, V. K. (2017). A Survey on Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Networks : Research Challenges and Future Trends. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(10), 2181–2195.
- Jiang, W., Zhang, Y. & Hanzo, L. (2018). Pattern Division Multiple Access : A New Nonorthogonal Multiple Access for 5G. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(6), 4990–5003. doi : 10.1109/TVT.2018.2800696.
- Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., Nam, Y.-H. & Debbah, M. (2019). A Tutorial on UAVs for Wireless Networks : Applications, Challenges, and Open Problems. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 21(3), 2334–2360. doi : 10.1109/COMST.2019.2902862.
- Rappaport, T. S., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., Wong, G. N., Schulz, J. K., Samimi, M. & Gutierrez, F. (2013). Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular : It Will Work ! *IEEE Access*, 1, 335–349. doi : 10.1109/ACCESS.2013.2260813.
- Rolley, R. M. et al. (2022). Unmanned Aerial Vehicles : Applications, Techniques, and Challenges. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 18(10), 1–21. doi : 10.1177/15501329221123933.
- Tseng, P. (2001). Convergence of a Block Coordinate Descent Method for Nondifferentiable Minimization. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 109(3), 475–494. doi : 10.1023/A:1017501703105.
- Xie, L. et al. (2021). Beam-Steering Optimization in Multi-UAVs MmWave Networks : A Mean Field Game Approach. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20(12), 8408–8422. doi : 10.1109/TWC.2021.3109827.
- Zeng, Y., Zhang, R. & Lim, T. J. (2016). Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles : Opportunities and Challenges. *IEEE Communications Magazine*, 54(5), 36–42. doi : 10.1109/MCOM.2016.7470933.

- Zhang, R., Song, L. & Letaief, K. B. (2013). Monotonic Optimization for Wireless Communication Systems. *IEEE Transactions on Communications*, 61(11), 4757–4771. doi : 10.1109/TCOMM.2013.100813.130018.
- Zhao, Y., Zhang, Y. & Adebisi, B. (2023). Joint Resource Allocation and Trajectory Optimization for UAV-Assisted PDMA Networks. *IEEE Transactions on Communications*, 71(5), 2760–2775. doi : 10.1109/TCOMM.2023.3240349.