

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ALLOCATION DES RESSOURCES ET ASSOCIATION DES UTILISATEURS
DANS LES RÉSEAUX CELLULAIRES DENSES À ONDES MILLIMÉTRIQUES
CENTRÉS SUR L'UTILISATEUR

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INFORMATIQUE

PAR

HANAA BENYERBAH

FÉVRIER 2023

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.04-2020). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

J'adresse tout d'abord mes sincères remerciements à mes directeurs de maîtrise, le professeur Elmahdi Driouch et le professeur Wessam Ajib, pour leur excellent encadrement, pour leur confiance et leur soutien en me donnant la chance de faire partie de leur équipe, ainsi que pour leurs précieuses aides, leurs bons conseils et leur dévouement. En plus de leurs compétences et connaissances scientifiques, j'aimerais les remercier chaleureusement et leur exprimer ma profonde reconnaissance pour leur patience, leur disponibilité et leur gentillesse et bienveillance, notamment en période de pandémie de COVID-19.

J'aimerais également remercier toute l'équipe de notre laboratoire, en particulier mes amies, Ihsane Damoulay et Eya Ahmed, pour leur aide, leur support et leurs conseils durant ma maîtrise.

Je tiens, particulièrement, à exprimer ma profonde gratitude à mes très chers parents, que je ne saurais remercier assez. Merci maman, merci papa de m'avoir toujours encouragé et donné la chance de me surpasser, d'aller plus loin et de réussir, je vous serai redevable à jamais. Je remercie ma meilleure amie Soumia Kasdi pour son soutien, son aide, et ses bons conseils tout au long de ma maîtrise et particulièrement durant les moments les plus difficiles. Enfin, j'adresse un grand merci à ma famille, mes sœurs : Chourouk ; Manel et Nabila, mon frère Nassim et sa femme Thiziri, mes beaux frères : Hamdane ; Ayoub et Hocine, mes nièces et mon neveu, ainsi que tous mes proches pour leur soutien inconditionnel.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-----|
| LISTE DES TABLEAUX | vi |
| LISTE DES FIGURES | vii |
| LISTE DES ACRONYMES | ix |
| RÉSUMÉ | xi |
| CHAPITRE I INTRODUCTION | 1 |
| 1.1 Mise en contexte | 1 |
| 1.2 Motivation | 3 |
| 1.3 Problématique | 4 |
| 1.4 Méthodologie et contributions | 6 |
| 1.5 Organisation du mémoire | 7 |
| CHAPITRE II VUE D'ENSEMBLE DES RÉSEAUX DE 5 ^{ème} GÉNÉRA- TION | 8 |
| 2.1 Évolution des réseaux mobiles | 9 |
| 2.2 Les technologies de la cinquième génération de réseaux mobiles | 11 |
| 2.2.1 Les transmissions bidirectionnelles simultannées (en anglais <i>Full Duplex</i>) | 11 |
| 2.2.2 Communications à ondes millimétriques | 12 |
| 2.2.3 Petites cellules | 15 |
| 2.2.4 MIMO massif | 16 |
| 2.2.5 Architecture centrée sur l'appareil et coopération entre les BSs | 19 |
| 2.3 Conclusion | 24 |
| CHAPITRE III ÉTAT DE L'ART | 25 |
| 3.1 Réseaux ultra-dense centrés sur l'utilisateur | 26 |

| | | |
|--|---|----|
| 3.1.1 | Allocation des ressources dans les UDNs centrés sur l'utilisateur | 27 |
| 3.2 | Réseaux cellulaires à ondes millimétriques | 30 |
| 3.2.1 | Allocation des ressources dans les réseaux à ondes millimétriques | 31 |
| 3.2.2 | Allocation des ressources dans les réseaux UDMNs | 31 |
| 3.2.3 | Réseaux à ondes millimétriques orientés utilisateur | 32 |
| 3.3 | Conclusion | 35 |
| CHAPITRE IV MODÈLE DE SYSTÈME ET FORMULATION DU PROBLÈME | | 36 |
| 4.1 | Modèle du système | 37 |
| 4.1.1 | Gain d'antenne | 38 |
| 4.1.2 | Modèle de blocage | 39 |
| 4.1.3 | Affaiblissement de propagation (Path-loss) | 40 |
| 4.1.4 | Évanouissements à petite échelle (small-scale fading) | 40 |
| 4.1.5 | Rapport signal sur interférence plus bruit (SINR) | 41 |
| 4.2 | Formulation du problème | 43 |
| 4.3 | \mathcal{NP} -dureté | 46 |
| 4.4 | Conclusion | 47 |
| CHAPITRE V SOLUTION PROPOSÉE | | 48 |
| 5.1 | Algorithme glouton d'association et d'allocation de puissance | 49 |
| 5.1.1 | Étape 1 : Association des utilisateurs | 50 |
| 5.1.2 | Étape 2 : Calcul et allocation de puissance | 50 |
| 5.1.3 | Complexité de calcul | 52 |
| 5.2 | Algorithme d'optimisation par essaims de particules | 53 |
| 5.2.1 | Représentation de la solution | 55 |
| 5.2.2 | Initialisation | 57 |

| | | |
|--|---|----|
| 5.2.3 | Algorithme et complexité de calcul | 58 |
| 5.3 | Conclusion | 60 |
| CHAPITRE VI ÉVALUATION DES PERFORMANCES ET RÉSULTATS | | 61 |
| 6.1 | Benchmarks et paramètres de simulation | 61 |
| 6.1.1 | Algorithme d'association un-à-un | 61 |
| 6.1.2 | Algorithme d'association aléatoire | 62 |
| 6.1.3 | Solution optimale | 62 |
| 6.2 | Paramètres de simulation | 63 |
| 6.2.1 | Paramètres généraux | 63 |
| 6.2.2 | Impact de la méthode d'initialisation de l'algorithme PSO | 63 |
| 6.3 | Impact du nombre de stations de base sur le nombre des utilisateurs satisfaits | 66 |
| 6.4 | Impact du nombre d'utilisateur total sur le nombre des utilisateurs satisfaits | 68 |
| 6.5 | Impact du SINR seuil | 69 |
| 6.6 | Conclusion | 70 |
| CONCLUSION | | 71 |
| ANNEXE A | | 73 |

LISTE DES TABLEAUX

| Tableau | Page |
|---|------|
| 4.1 Tableau de notations. | 44 |
| 6.1 Paramètres de simulations par défaut. | 64 |
| 6.2 Paramètres de simulations pour l'évaluation de PSO. | 65 |

LISTE DES FIGURES

| Figure | Page |
|---|------|
| 1.1 Triangle de la 5G | 3 |
| 2.1 Évolution des générations de réseaux cellulaires | 8 |
| 2.2 Les différents types de cellules | 16 |
| 2.3 Formation de faisceaux MIMO massif | 19 |
| 2.4 CoMP intra-site et inter-site | 21 |
| 2.5 Interférences intercellulaires | 23 |
| 4.1 Modèle du système | 38 |
| 4.2 Exemple d'interférences dans le réseau | 42 |
| 5.1 Première étape de l'algorithme | 51 |
| 5.2 Optimisation par essaims de particules | 54 |
| 6.1 Nombre moyen d'itérations nécessaire à l'algorithme PSO pour converger | 66 |
| 6.2 Impact du nombre de BSs sur le nombre des UEs satisfaits ($U = 10$) . | 68 |
| 6.3 Impact du nombre de BSs sur le nombre des UEs satisfaits ($U = 20$). | 69 |
| 6.4 Impact du nombre d'utilisateur total sur le nombre des utilisateurs satisfaits ($B = 4$) | 70 |
| 6.5 Impact du SINR seuil ($U = 10$) et ($B = 4$). | 70 |

LISTE DES ALGORITHMES

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Algorithme GAPA - Étape 2 : Allocation de puissance | 52 |
| 2 | Algorithme PSO | 59 |
| 3 | Algorithme GAPA | 73 |

LISTE DES ACRONYMES

| | |
|-------|--|
| ABS | sous-trame presque vide (<i>Almost Blank Sub-frame</i>) |
| AMPS | Système de téléphonie mobile avancé (<i>Advanced mobile phone system</i>) |
| APOPT | Optimiseur de processus avancé (<i>Advanced Process OPTimizer</i>) |
| BS | Station de base (base station) |
| CDMA | Accès multiple par répartition en code (<i>Code Division Multiple Access</i>) |
| CoMP | Transmission et Réception coordonnées multipoint (<i>Coordinated Multi-Point</i>) |
| EDGE | Débit de données amélioré pour l'évolution de GSM (<i>Enhanced Data Rate for GSM Evolution</i>) |
| eICIC | Coordination améliorée des interférences intercellulaires (<i>Enhanced Inter-Cell Interference Coordination</i>) |
| eMBB | Amélioration du haut-débit mobile (<i>Enhanced Mobile Broadband</i>) |
| GAPA | Algorithme glouton d'association et d'allocation de puissance (<i>Greedy Association and Power Allocation</i>) |
| GPRS | Service général de radiocommunication par paquets (<i>General Packet Radio Service</i>) |
| GSM | Système global pour la communication mobile (<i>Global System for Mobile Communication</i>) |
| HSPA | Accès par paquets à haut débit (<i>High Speed Packet Access</i>) |
| LOS | Visibilité directe (<i>Line-Of-Sight</i>) |
| LTE | Evolution à long terme (<i>Long Term Evolution</i>) |

| | |
|--------|--|
| MIMO | Entrées multiples, sorties multiples (<i>Massive Multiple-Input Multiple-Output</i>) |
| MMS | Service de messagerie multimédia (<i>Multimedia Messaging Service</i>) |
| mMTC | Communication machine massive (<i>Machine Type Communication</i>) |
| mmWave | Ondes millimétriques (<i>Millimeter-wave</i>) |
| NLOS | Hors visibilité directe (<i>Non-Line-Of-Sight</i>) |
| NP | Non déterministe polynomial (<i>nondeterministic polynomial time</i>) |
| OFDM | multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (<i>Orthogonal frequency-division multiplexing</i>) |
| PSO | Optimisation par essaim de particules (<i>Particle Swarm Optimization</i>) |
| QoS | Qualité de service |
| RB | Bloc de ressources |
| SINR | Rapport signal sur interférence rapport plus bruit (<i>Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio</i>) |
| SMS | Messages texte (<i>Short Message Service</i>) |
| TACS | Système de communication à accès total (<i>Total Access Communication System</i>) |
| TDD | Duplexage par répartition dans le temps (<i>Time Division Duplex</i>) |
| TDMA | Accès multiple par répartition dans le temps (<i>Time Division Multiple Access</i>) |
| UDMN | Réseau ultra dense à ondes millimétriques (<i>ultradense mmWave network</i>) |
| UDN | Réseau ultra dense (<i>Ultra-Dense Network</i>) |
| UE | Équipement utilisateurs |
| URLLC | Communication ultra fiable à faible latence (<i>Ultra-Reliable Low Latency Communication</i>) |
| WSR | Débit total pondéré (<i>weighted sum rate</i>) |

RÉSUMÉ

Les utilisateurs des réseaux cellulaires cherchent toujours à bénéficier d'une excellente connexion à haut débit, et ce, même dans des situations où la densité des équipements utilisateurs est hautement élevée. Afin de satisfaire cette demande, de nouvelles technologies ont vu le jour, notamment les communications à ondes millimétriques et le déploiement dense de stations de base. Cependant, ces réseaux souffrent des interférences causées par le chevauchement de la couverture des stations de base. Pour faire face à ce problème, une solution prometteuse est l'architecture centrée sur l'utilisateur, où un utilisateur peut être servi par un ensemble de stations de base qui coopèrent dans le but de réduire les interférences perçues par les récepteurs. Ce projet de maîtrise étudie le problème de la maximisation du nombre d'utilisateurs servis dans un réseau dense à ondes millimétriques tout en garantissant la qualité de service (QoS) requise par chaque utilisateur, définie par une qualité de signal reçu. Puisque le problème formulé est NP-difficile, deux solutions quasi-optimales basées sur le groupement (en anglais *clustering*) et l'allocation des ressources sont proposées. Le premier est un algorithme heuristique qui construit les clusters en associant l'utilisateur à autant de stations de base que nécessaire. Le deuxième est un algorithme d'optimisation par essaims de particules binaires adapté à notre problème d'optimisation sous contraintes. Les simulations confirment que les algorithmes proposés approchent la solution optimale avec une complexité de calcul grandement inférieure.

Mots-clés : ondes millimétriques, réseaux centrés sur l'utilisateur, association d'utilisateurs, allocation de canaux, allocation de puissance, optimisation par essaims de particules (PSO).

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Ces dernières décennies, la démocratisation des appareils connectés due au développement rapide de diverses applications, notamment la réalité augmentée, le visionnement en continu de vidéos de très haute qualité, la télémédecine, et l'internet tactile, a conduit à un volume massif de trafic. Par conséquent, les réseaux sans fil en général, et les réseaux cellulaires en particulier font face à une grande demande pour des débits beaucoup plus élevés que ceux supportés par les technologies et architectures des réseaux actuels. Le trafic mobile mondial prévu en 2030 s'élève à 5016 EB/mois, alors qu'il était à 7,462 EB/mois en 2010 (Chowdhury *et al.*, 2020). Ces chiffres montrent que nous nous dirigeons vers une ère de systèmes de gestion à distance automatisés dans tous les domaines de la société. Pour ce faire, des millions, voire des milliards de capteurs sont intégrés dans les environnements, qui deviennent de plus en plus intelligents, afin d'offrir des systèmes automatisés. Pour prendre en charge ces applications, une connexion ultra fiable et rapide est indispensable. Actuellement, la 5G a déjà été déployée dans de nombreux pays à travers le monde (Yahaya *et al.*, 2022), en raison de ses avantages élevés par rapport aux technologies des générations

précédentes en termes de nombre de connexions réseau, de vitesse de transfert, de consommation d'énergie, de sécurité et de fiabilité.

Ainsi, la cinquième génération des réseaux cellulaires (5G) fournit une gamme de service très variée dans le but de répondre à différentes exigences. Plus précisément, la 5G propose de répondre à trois scénarios d'utilisation des principes clés, aussi appelés le triangle de la 5G, qui sont :

- débit mobile amélioré (en anglais *Enhanced Mobile Broadband*, eMBB) : il s'agit d'un scénario dans lequel le réseau doit offrir des débits de données très élevés qui, non seulement, permettront des téléchargements plus rapides, mais vont stimuler également d'autres innovations comme la réalité virtuelle et augmentée ou les vidéos à 360° ;
- communication ultra fiable à faible latence pour les besoins critiques (en anglais *Ultra-Reliable Low Latency Communication*, URLLC) ;
- et, communication massive entre machines (en anglais *Massive Machine Type Communication*, mMTC) afin de garantir des communications sûres pour des milliards de'objets connectés, notamment des capteurs et actionneurs.

De manière à répondre à ces exigences, les réseaux cellulaires 5G profitent des avantages apportés par des technologies, telles que les communications à ondes millimétriques (en anglais *Millimeter Wave*, mmWave), l'emploi massif d'antennes au niveau des émetteurs/récepteurs, communément connu sous l'appellation MIMO massif (en anglais *Massive Multiple-Input Multiple-Output*), le déploiement de petites cellules, les transmissions bidirectionnelles simultanées (en anglais, *Full Duplex*), l'architecture centrée sur l'appareil et la formation de faisceaux (en anglais *Beamforming*) (Dahlman *et al.*, 2020).

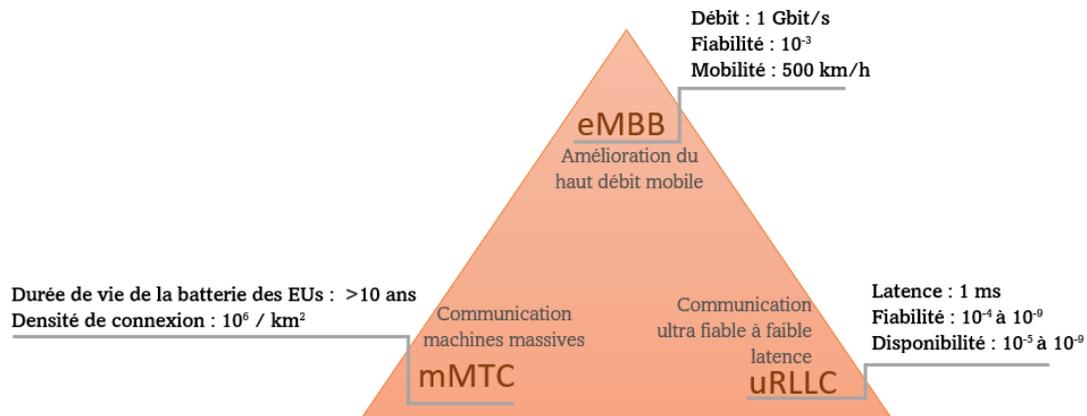


FIGURE 1.1 Triangle de la 5G

1.2 Motivation

Les réseaux cellulaires se retrouvent face à plusieurs défis notamment l'accessibilité, la disponibilité, la faible latence et la forte demande de hauts débits, cela est dû au nombre croissant des équipements utilisateurs connectés et à la taille des données échangées qui augmente à une cadence fulgurante.

La 5G utilise la technologie des ondes millimétriques qui s'avère être une solution prometteuse pour les réseaux cellulaires afin d'augmenter les débits et améliorer la couverture. Les communications dans les réseaux 5G utilisant les mmWave bénéficient davantage de spectre fréquentiel. En effet, mmWave utilisent des fréquences allant de 30 à 300 Gigahertz, c.-à-d. des longueurs d'ondes de 1 millimètre à 1 centimètre. D'autres avantages de l'utilisation des mmWave sont :

- une réutilisation spatiale plus optimale des fréquences en réduisant le problème d’interférences, et ce, grâce à l’atténuation rapide de la puissance des ondes radioélectriques ;
- une amélioration des débits, due à la possibilité d’utiliser des antennes de petites tailles, ce qui facilite l’implémentation de plusieurs antennes sur des surfaces limitées.

En raison de ces avantages, plusieurs travaux de recherche se sont intéressés à étudier le déploiement des réseaux dans la bande d’ondes millimétriques. Notre travail s’intéresse aux réseaux mmWave avec une distribution dense des stations de base (BSs), qui permet d’augmenter la capacité du réseau (Andrews *et al.*, 2014), (López-Pérez *et al.*, 2015) et (Lin *et al.*, 2018). En effet, dans une distribution dense, il y aurait toujours une BS à proximité de l’équipement utilisateur (UE). Cependant, des défis importants sont rencontrés dans de tels réseaux, notamment, les interférences causées par le chevauchement des couvertures des BSs.

1.3 Problématique

Dans le but de fournir un service durable et de haute qualité et afin de satisfaire les demandes croissantes des utilisateurs, une connexion à haut-débit, omniprésente, avec une faible latence est nécessaire. Parmi les technologies qui permettent d’atteindre ces objectifs, on retrouve les communications mmWave et les architectures à déploiement dense de BSs. Toutefois, de tels systèmes font face à des défis majeurs. En effet, les communications mmWave sont supposées atteindre de très hauts débits en raison des larges bandes passantes qu’elles offrent, néanmoins, elles sont exposées à un affaiblissement de propagation élevé et une forte atténuation. D’autre part la densité du réseau cause inévitablement un chevauchement des couvertures des BSs, ce qui

entraîne une forte présence d'interférences qui peuvent réduire considérablement les performances du réseau.

Par conséquent, il est clair que l'utilisation conjointe des communication mmwave et du déploiement dense des BSs constitue une formule gagnante présentant une panoplie d'avantages. Toutefois, cette combinaison dépend fortement de l'association des utilisateurs et de l'allocation des ressources, notamment les canaux de fréquences et les puissances de transmission. Ainsi, l'amélioration des performances des réseaux sans fil qui utilisent ces deux technologies nécessitent le développement de solutions algorithmiques adaptées de manière à minimiser l'impact des interférence dans le réseau et de remédier aux défis énumérés précédemment, afin de garantir une bonne qualité de service (QoS) à chaque utilisateur.

Dans le cadre de notre projet, on se focalise sur l'étude d'un réseau cellulaire avec une distribution dense de BSs qui communique sur bandes mmWave. Le but est d'associer les utilisateurs aux BSs, et leur allouer les ressources nécessaires pour garantir une bonne QoS. Une architecture orientée utilisateur (en anglais *user-centric*) est proposée, où l'utilisateur est servi conjointement par plusieurs BSs. Cela permet de surmonter le principal défi rencontré dans une distribution dense de BSs qui est l'interférence.

Notre objectif est de maximiser le nombre des utilisateurs associés, dans un réseau dense à ondes millimétriques centré sur l'utilisateur, sous les contraintes des ressources limitées et du rapport SINR (signal-sur-interférence-plus-bruit).

1.4 Méthodologie et contributions

Afin d'atteindre l'objectif annoncé dans la section précédente, nous commençons par définir mathématiquement le modèle du système étudié afin de déterminer tous les éléments qui concernent le réseau et son l'environnement. Nous formulons, ensuite, le problème d'optimisation qui vise à maximiser le nombre d'utilisateurs servis, sous les contraintes de disponibilité des ressources, tout en garantissant une bonne QoS aux utilisateurs. Par la suite, nous étudions la faisabilité et la difficulté du problème et prouvons qu'il est \mathcal{NP} -difficile, cela signifie qu'il est presque impossible de trouver un algorithme pour le résoudre en temps polynomial. Enfin nous proposons deux approches qui permettent de répondre à notre problématique en se basant sur le clustering, l'association d'utilisateurs et l'allocation de puissance. Cela, en respectant les contraintes des ressources limitées et en minimisant les interférences, ce qui permettra d'optimiser le nombre d'utilisateurs satisfaits. La première approche est un algorithme glouton. Il procède en deux phases : la phase 1 construit des clusters en associant l'utilisateur à autant de BSs que nécessaire pour satisfaire la contrainte de QoS et la phase 2 effectue une allocation de puissance pour chaque association obtenue. La deuxième approche est un algorithme d'optimisation par essais de particules (en anglais *Particle Swarm Optimization*, PSO). Puisque le problème à résoudre est une problème à contraintes dont les variables d'optimisation du problème formulé sont des variables binaires, nous proposons un PSO binaire adapté à la nature du problème. Les particules sont représentées par des matrices d'association binaires, alors que la faisabilité de chaque particule est vérifiée, c.-à-d., si la particule respecte les contraintes du problème formulé, sinon la particule est réparée. La complexité de calcul des deux algorithmes proposés est calculée et s'avère plus intéressante que la complexité de l'algorithme optimal.

Les principales contributions de notre projet sur cette problématique peuvent être résumés comme suit :

- Nous formulons un problème d’association des utilisateurs dans une architecture centrée sur l’utilisateur, sous forme d’un problème d’optimisation non linéaire à nombres entiers partiel ;
- Nous étudions la complexité de calcul du problème formulé et montrons que c’est un problème \mathcal{NP} -difficile pour lequel il n’existe pas d’algorithmes pouvant donner la solution optimale en un temps raisonnable ;
- Nous proposons un premier algorithme heuristique glouton capable de résoudre le problème une manière sous-optimale en temps polynomial ;
- Nous proposons un deuxième algorithme méta-heuristique d’optimisation par essais de particules adapté à notre problème d’optimisation sous contraintes ;
- Nous analysons les performances des deux algorithmes proposés, par simulation et nous démontrons leur efficacité en les comparant avec la solution optimale ainsi qu’avec d’autres algorithmes d’associations d’utilisateurs et d’allocation des ressources.

1.5 Organisation du mémoire

Le reste de ce mémoire est organisé comme suit, le chapitre 2 présente une vue d’ensemble et des notions de base sur les réseaux cellulaires et leur évolution au fil des années. Le chapitre 3 est un état de l’art des travaux liés à notre problématique. Le modèle de système, la formulation du problème ainsi que l’étude de sa \mathcal{NP} -difficulté sont présentés dans le chapitre 4. Les deux algorithmes proposés sont expliqués en détails dans le chapitre 5 et les résultats de simulations sont énumérés dans le chapitre 6. Enfin, une conclusion qui résume notre travail.

CHAPITRE II

VUE D'ENSEMBLE DES RÉSEAUX DE 5^{ème} GÉNÉRATION

Aujourd'hui, Les utilisateurs des appareils mobiles demandent des vitesses de données extrêmement rapides et un service très fiable à faible latence. La dernière génération de réseaux mobiles, la 5G, est conçu avec l'objectif de gérer plus de trafic à des vitesses plus élevées. La 5G se base sur de nouvelles technologies prometteuses qui permettent de répondre aux exigences actuelles et futures des utilisateurs.

Ce chapitre donne un aperçu de la 5G, tout en décrivant les générations précédentes et la justification d'une nouvelle génération. Il décrit aussi les différentes nouvelles technologies utilisées dans les réseaux 5G et leurs caractéristiques. La figure 2.1 présente l'évolution des générations de réseaux cellulaires.

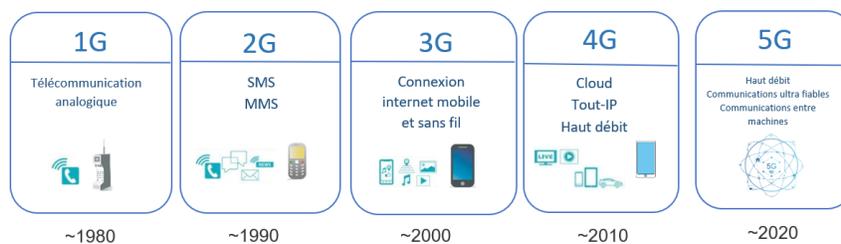


FIGURE 2.1 Évolution des générations de réseaux cellulaires

2.1 Évolution des réseaux mobiles

Apparue vers 1980, la première génération des réseaux mobiles (1G) basée sur des transmissions analogiques, offre exclusivement la possibilité d'effectuer des appels vocaux et rend, pour la première fois, la téléphonie mobile accessible à tout le monde. Il existe de nombreux standards du réseau 1G, notamment, AMPS (en anglais *Advanced mobile phone system*), NMT (en anglais *Nordic Mobile Telephony*), et TACS (en anglais *Total Access Communication System*). (Dahlman *et al.*, 2020)

Déployée dans les années 1990, la deuxième génération des réseaux cellulaires (2G), plus performante et plus fiable que la 1G, a introduit les transmissions numériques sur la liaison radio. L'utilisation de la transmission numérique a permis en plus d'effectuer des appels vocaux, d'échanger des messages texte (en anglais *Short Message Service*, SMS) et image (en anglais *Multimedia Messaging Service*, MMS). Le standard le plus connu de la 2G est GSM (en anglais *Global System for Mobile Communication*). Ce standard offre un débit maximal est 9,6 kbit/s et est essentiellement basé sur la technique d'accès multiple par répartition temporelle (en anglais *Time Division Multiple Access*, TDMA). La 2G évolue vers des réseaux intermédiaires : le réseau GPRS (en anglais *General Packet Radio Service*) avec un débit maximal de transfert de données de 171,2 kbit/s et un débit moyen de 48 kbit/s, aussi appelé 2,5G ou 2G+ ; et le réseau EDGE (en anglais *Enhanced Data Rate for GSM Evolution*), avec un débit maximal de 384 kbit/s, et un débit moyen de 100 kbit/s, aussi appelé 2,75G.

La troisième génération des réseaux mobiles (3G), introduite au début des années 2000, a franchi l'étape vers une connectivité mobile à haut débit. En effet, fonction-

nant sur les bandes de fréquences autour de 900 MHz et de 2100 MHz, et pouvant atteindre un débit de 1.9 Mbit/s, elle permet un accès "rapide" à internet. Elle donne accès notamment à la télévision mobile, la visio-conférence, le téléchargement des données, l'envoi et le visionnement des vidéos. La 3G a également introduit de la communication mobile dans un spectre non apparié avec la technologie de transmission TD-SCDMA (en anglais *Time Division Synchronous Code Division Multiple Access*) basée sur le duplex par séparation temporelle (en anglais *Time Division Duplex*, TDD). La troisième génération des réseaux mobiles a connu à son tour trois évolutions : La 3G+ ou HSPA (en anglais *High Speed Packet Access*), avec un débit moyen de 3,6 Mbit/s ; le HSPA+ aussi appelé H+, avec un débit moyen de 5 Mbit/s ; et le DC-HSPA+ (ou H+ *Dual Carrier*), avec un débit moyen de 10 Mbit/s.

La quatrième génération des réseaux mobiles (4G), représentée principalement par les deux standards LTE Advanced (Long en anglais *Term Evolution Advanced*) et WiMAX 2 (WirelessMAN-Advanced), offre une plus grande efficacité et de plus hauts débits que la meilleure évolution de la 3G. Cette génération vise à implémenter un large éventail d'applications telles que le transfert rapide des fichiers volumineux, le visionnement des vidéos en haute définition, les appels vidéo de haute qualité, etc. La 4G utilise des transmissions basées sur OFDM (en anglais *Orthogonal frequency-division multiplexing*) et sur les technologies multiantennes plus avancées permettant ainsi d'atteindre des capacités plus élevées. De plus, le standard LTE (et ses successeurs) fonctionne dans les spectres appariés et non appariés, au sein d'une technologie d'accès radio commune. L'évolution de ce dernier a également étendu le fonctionnement des réseaux mobiles à des spectres sans licence. Le débit maximal théorique de la 4G est de 150 Mbit/s et pour la 4G+ , l'évolution de la 4G, le débit maximal

théorique atteint jusqu'à 1 Gbit/s.

Finalement, la cinquième génération de réseaux mobiles (5G), offre aux usagers un ultra haut débit mobile, avec des débits qui dépassent les 10 Gbit/s et donne accès par exemple au cloud gaming, visionnage de vidéo en résolution 4K, réalité virtuelle, etc. La sous-section suivante présente plus de détails concernant cette génération en décrivant les principales technologies qui font partie de sa définition.

2.2 Les technologies de la cinquième génération de réseaux mobiles

La dernière génération des réseaux cellulaires, 5G, définit un réseau unique suffisamment flexible pour gérer de nombreux cas d'utilisation différents. La 5G permet par conséquent une communication ultra-fiable à faible latence ; une communication massive de type machine ; et un haut débit mobile amélioré. Les principales technologies clés envisagées pour les systèmes 5G comprennent les transmissions bidirectionnelles simultanées, le MIMO massif, les petites cellules, l'architecture centrée sur l'appareil, la formation de faisceaux et les communications mmWave.

2.2.1 Les transmissions bidirectionnelles simultanées (en anglais *Full Duplex*)

Jusqu'à l'ère de la 5G, les équipements utilisateurs et les BSs sont équipés d'émetteurs-récepteurs qui doivent, soit alterner entre transmission et réception sur la même fréquence, soit fonctionner sur des fréquences différentes dans le cas où l'utilisateur souhaite transmettre et recevoir des informations en même temps. Avec la technologie du full duplex un émetteur-récepteur pourra émettre et recevoir des données en même temps, sur la même fréquence dans le but d'atteindre une plus grande efficacité

spectrale. Cette technologie nécessite la conception de circuits capables d'acheminer des signaux entrants et sortants lorsqu'une antenne transmet et reçoit des données en même temps, afin que les signaux n'entrent pas en collision. La difficulté du déploiement de cette technologie réside dans le principe de réciprocité des signaux. En effet, une onde radio se déplace vers l'avant et vers l'arrière sur la même fréquence. (Nordrum et Clark, 2017a) rapportent que dans le but d'arrêter le retour en arrière de ces ondes, des experts ont réussi à assembler des transistors au silicium qui agissent comme des commutateurs à grande vitesse. Cela va permettre la transmission et la réception des signaux sur la même fréquence en même temps. Cependant, parmi les inconvénients de la technologie full-duplex on retrouve les interférences de signal par l'écho gênant, qui se manifestent par le fait que le signal émis est beaucoup plus proche de l'antenne de l'appareil et donc plus puissant que tout signal qu'il reçoit. Ainsi, dans le but d'avoir une antenne qui émet et reçoit en même temps, une technologie spéciale d'annulation d'écho est nécessaire et constitue récemment un sujet de recherche de grand intérêt.

2.2.2 Communications à ondes millimétriques

L'augmentation massive du trafic de données échangées entre les appareils connectés est de plus en plus importante. Par ailleurs, dans les réseaux des générations précédentes, les communications étaient toutes faites sur les mêmes bandes du spectre de radio-fréquences. Cela signifie moins de bande passante pour tous les utilisateurs, la communication devient plus lente et peu fiable et cela augmente le nombre d'interruptions. Une solution à ce problème est l'utilisation des bandes aux hautes fréquences qui n'ont jamais été utilisées auparavant pour les standards de réseaux cellulaires. Plus particulièrement, la 5G s'intéresse au spectre électromagnétique entre

30 et 300 GHz, également connu sous le nom de bandes millimétriques (mmWave) (Nordrum et Clark, 2017c).

La technologie mmWave est caractérisée par des fréquences très élevées par rapport aux bandes inférieures à 6 GHz (sub-6) utilisées par les générations précédentes. Ainsi, les ondes millimétriques peuvent fournir une bande passante dix fois supérieure à celle de l'ensemble de la bande cellulaire sub-6. Parmi les particularités de la technologie mmWave est le fait qu'elle soit adaptée aux communications très rapprochées et ne conviennent pas aux applications à longue portée, étant donné que les ondes millimétriques subissent une atténuation de propagation beaucoup plus élevée.

Dans les générations des réseaux mobiles précédant la 5G, la principale raison pour laquelle le spectre des ondes millimétriques était inactif, est que ce dernier était jugé inadapté aux communications mobiles en raison de la qualité de propagation plutôt défavorable. Les principales problématiques étudiées relatives à la propagation mmWave pour la 5G sont (Andrews *et al.*, 2014) :

Affaiblissement de propagation : cette mesure est donnée par la formule suivante (Friis, 1946) : $\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{A_r A_t}{d^2 \lambda^2}\right)$ où P_r est la puissance délivrée à l'antenne d'émission, P_t est la puissance délivrée par l'antenne de réception, A_r est la surface d'ouverture effective de l'antenne de réception, A_t est la surface d'ouverture effective de l'antenne d'émission et λ est la longueur d'onde mesurée par $\lambda = \frac{c}{f}$ où f est la fréquence porteuse. Il est alors facile de déduire que à mesure que la fréquence augmente l'affaiblissement de propagation en espace libre entre une antenne de transmission et une antenne de réception augmente (Andrews *et al.*, 2014). Par conséquent, cet affaiblissement est encore plus prononcée pour les ondes millimétriques vue la grande

valeur que prend la fréquence de transmission.

Blocage : les signaux mmWave sont sensibles aux blocages, en effet, ils présentent une propagation plus spéculaire et une diffraction réduite comparé aux micro-ondes. Par conséquent, le modèle du canal dépend de la présence ou absence d'une visibilité directe (en anglais *Line-of-Sight*, LOS) (Andrews *et al.*, 2014). Pour une liaison de propagation LOS, à mesure que la distance entre l'émetteur et le récepteur augmente, l'affaiblissement de propagation augmente de près de 20dB/décade. Cependant, pour une propagation sans visibilité directe (en anglais *Non-Line-of-Sight*, NLOS) l'affaiblissement de propagation passe à 40 dB/décade plus une perte de blocage supplémentaire de 15 à 40 dB (Rangan *et al.*, 2014), ce qui a un effet néfaste sur la puissance du signal reçu..

Shadowing : les signaux mmWave sont extrêmement sensibles au phénomène de *shadowing*. Par exemple, des matériaux, comme les briques, peuvent atténuer les signaux jusqu'à 80 dB. Aussi, un obstacle tel que le corps humain peut entraîner une perte de 20 à 35 dB (Rangan *et al.*, 2014).

Absorption atmosphérique : l'absorption due à l'air et à la pluie est assez importante pour les signaux mmWave, notamment, l'absorption d'oxygène introduit une atténuation de 15 dB/km dans la bande autour de 60 GHz. Cependant, une telle absorption est sans conséquence pour le déploiements cellulaires en milieu urbain et s'avère être bénéfique car elle atténue davantage les interférences des BSs plus éloignées, ce qui augmente efficacement l'isolement de chaque cellule.

Pour de nombreuses applications, l'affaiblissement de propagation en espace libre, l'atténuation atmosphérique, l'absorption atmosphérique et le shadowing limitent l'utilisation des signaux d'ondes millimétriques. Cependant, il s'avère que ces ca-

ractéristiques peuvent également être exploitées comme avantages dans certaines applications puisqu'ils permettent notamment de réduire les tailles des cellules favorisant ainsi une réutilisation spatiale plus importante des bandes fréquentielles. Par conséquent, pour surmonter les défis des ondes millimétriques, afin de pouvoir profiter pleinement de leurs potentiels, les réseaux 5G assistent les tours cellulaires traditionnelles en employant une nouvelle technologie, appelée petites cellules.

2.2.3 Petites cellules

Les petites cellules sont de minuscules BSs à faible puissance et qui peuvent être placées à au plus une centaine de mètres de distance, les unes des autres, dans les villes, afin d'assurer une qualité de signal acceptable même dans les zones surpeuplées. L'ensemble des petites cellules forme un réseau dense qui agit comme une équipe de relais afin de transmettre les signaux et acheminer les données partout pour fournir un haut débit et une latence ultra-faible. L'avantage des petites stations de base, c'est qu'elles sont de petite taille, très légères, consomment moins d'énergie et peuvent être placés n'importe où. Ces dernières peuvent être divisées en microcellules, femtocellules et picocellules, comme représenté sur la figure 2.3, compte tenu du nombre d'utilisateurs qu'elles peuvent prendre en charge et de leur couverture. Aussi, cette structure permet une utilisation plus ciblée et donc plus efficace du spectre. En effet, avoir plus de BSs signifie que les fréquences utilisées par une BS dans sa petite zone de couverture peuvent être réutilisées par une autre BS dans une zone différente mais proche (Nordrum et Clark, 2017d).

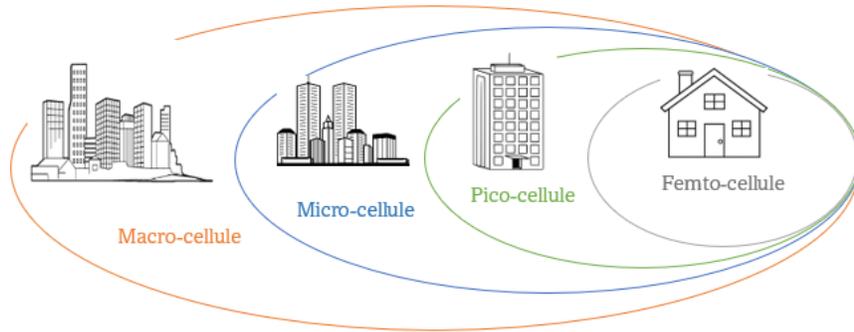


FIGURE 2.2 Les différents types de cellules

2.2.4 MIMO massif

Les systèmes de communication multiantennes, communément appelés systèmes MIMO, reposent sur le déploiement de plusieurs antennes au niveau de l'émetteur et/ou du récepteur et ont été introduits et largement utilisés pour atteindre une efficacité spectrale et énergétique élevées. Cependant, les appareils connectés augmentent d'une façon exponentielle et les utilisateurs génèrent des données massives qui doivent être communiquées d'une manière rapide, efficace et fiable (Nordrum et Clark, 2017b). Les technologies MIMO ne sont pas en mesure de gérer cet énorme flux de trafic de données, ainsi, les systèmes MIMO massif sont introduits comme une technologie potentielle pour surmonter ce problème. Ces systèmes permettent aux BSs d'envoyer et de recevoir des signaux de beaucoup plus d'utilisateurs à la fois. En effet, le MIMO massif consiste en le déploiement de dizaines ou même de centaines d'antennes à la BS. Les antennes supplémentaires aideront à concentrer l'énergie dans une région plus petite de l'espace pour fournir une meilleure effica-

ité spectrale et un meilleur débit (Chataut et Akl, 2020). Parmi les avantages d'un système MIMO massif :

- Une efficacité spectrale plus élevée : le réseau d'antennes de MIMO massif peut être utilisé pour focaliser des faisceaux étroits vers un seul utilisateur ce qui permet d'atteindre une efficacité spectrale supérieure à celle du système MIMO utilisé pour la 4G/LTE ;
- Une efficacité énergétique plus importante : le réseau d'antennes nécessite moins de puissance rayonnée car il est focalisé dans une petite section spécifique, il réduit ainsi les besoins en énergie ;
- Suivi de l'utilisateur : l'utilisation des faisceaux étroits vers l'utilisateur permettent un suivi fiable et précis de ce dernier ;
- Débit de données élevé : le multiplexage spatial fournis par le MIMO massif augmentent davantage le débit de données comparé aux systèmes MIMO ;
- Moins d'évanouissement (en anglais *fading*) : un grand nombre d'antennes au niveau du récepteur rend le MIMO massif résistant aux effets d'évanouissement ;
- Faible latence : les systèmes MIMO massifs réduisent la latence sur l'interface radio en augmentant les débits ;
- Robustesse et fiabilité : le grand nombre d'antennes dans massif MIMO les rend robuste contre les interférences involontaires et les pannes d'antenne et fournit également plus de gain, ce qui augmente la fiabilité de la liaison ;
- Sécurité : les canaux orthogonaux de la station mobile et les faisceaux étroits offrent plus de sécurité physique.

Le principal défi du MIMO massif est de réduire les interférences tout en transmettant plus d'informations à partir de plusieurs antennes à la fois. La technologie de formation de faisceaux peut aider les réseaux MIMO massifs à utiliser plus efficacement le spectre qui les entoure. La formation de faisceaux sert à adapter le diagramme de rayonnement de l'antenne. Cette technologie permet à la BS d'identifier l'itinéraire approprié pour transmettre les données à l'utilisateur le plus efficacement possible en réduisant ainsi les interférences avec les utilisateurs à proximité.

De plus, pour les ondes millimétriques, la formation de faisceaux aide à augmenter le débit de données. En considérant que les ondes millimétriques sont sensibles aux obstacles et ne peuvent pas les pénétrer, et que leur longueur d'ondes, étant plus courte, les empêche de se propager sur de plus longues distances ; la formation de faisceaux aide l'utilisateur à recevoir un signal fort sans interférence et ce, en lui envoyant des faisceaux concentrés vers lui. Plusieurs antennes peuvent être utilisées sur l'émetteur et/ou récepteur pour obtenir :

- Un gain de multiplexage : transmission simultanée de flux de données parallèles sur plusieurs antennes pour améliorer les taux d'erreur binaire ;
- Un gain de diversité : flux de données redondants utilisant un codage espace-temps pour réduire les taux d'erreur ;
- Un gain d'antenne : amélioration du rapport signal sur bruit (en anglais *Signal-to-noise ratio*, SNR) à la réception et suppression des interférences dans le même canal dans un scénario multi-utilisateur. (Mietzner *et al.*, 2009)

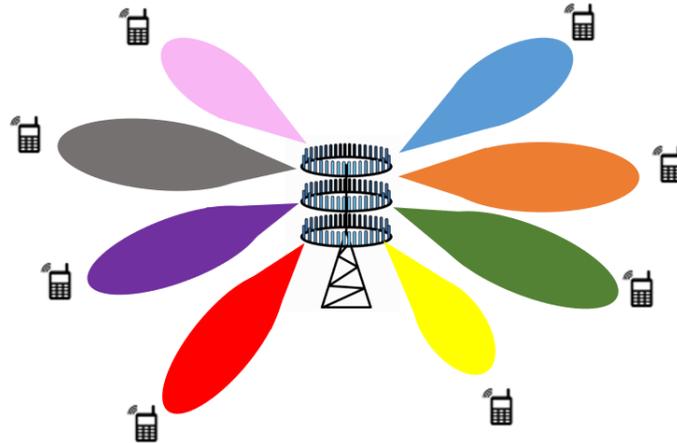


FIGURE 2.3 Formation de faisceaux MIMO massif

2.2.5 Architecture centrée sur l'appareil et coopération entre les BSs

Dans une architecture centrée sur l'utilisateur, chaque utilisateur peut être servi conjointement par un groupe de BSs. La coopération des BSs est une architecture efficace pour déployer des BS dans des réseaux mmWave. En effet, avec l'introduction des communications mmWave, de nombreuses bandes de fréquences coexistent avec différentes caractéristiques de propagation. Ainsi, les architecture centrée sur l'appareil, où un appareil utilisateur communique en échangeant des informations à travers plusieurs nœuds, sont une solution prometteuse pour surmonter les défis de l'augmentation des bandes de fréquences et la densification des réseaux.

Dans les systèmes des générations précédentes, les architectures étaient centrées sur la BS. Les équipements utilisateurs obtenait les services de la station de base en utilisant une connexion de liaison descendante et montante et un canal pour

l'échange d'informations de contrôle. Cependant, dans ce genre d'architectures, un nombre accru d'utilisateurs nécessite d'accroître considérablement le nombre de BSs ce qui entraîne une augmentation importante de la densité des cellules. Ces dernières années, une attention particulière est accordée au concept de la coopération dans des systèmes et des mécanismes afin de permettre aux réseaux de s'auto-organiser et d'établir automatiquement une connexion entre les entités impliquées.

Deux fonctionnalités importantes ont vu le jour avec LTE-Advanced : La transmission et la réception coordonnées multipoint (en anglais *Coordinated Multi-Point*, CoMP) et la coordination améliorée des interférences intercellulaires (en anglais *Enhanced Inter-Cell Interference Coordination*, eICIC). Grâce à ces deux techniques, les performances des réseaux cellulaires à partir de la 4G sont considérablement améliorées. CoMP s'est concentrée sur les modèles de coordination dynamiques qui nécessitent des liaisons rapides entre les points de coordination, contrairement à eICIC qui est considéré comme un modèle de coordination semi-statique (Gulia *et al.*, 2022).

2.2.5.1 La transmission et la réception coordonnées multipoint

L'idée principale de CoMP est lorsqu'un utilisateur est positionné dans le bord de la cellule, il peut recevoir/transmettre des signaux de/vers plusieurs cellules et ce en coordonnant les signaux transmis depuis les multiples BSs, ce qui augmente les performances de manière significative. Cette coordination gère les interférences de manière proactive et peut être simple, comme dans les systèmes qui vise à éviter les interférences ou plus complexe dans le cas où les mêmes données sont transmises à partir de plusieurs BSs. Les communications CoMP peuvent se produire avec CoMP intra-site (même BS) ou inter-site (entre plusieurs BSs), comme illustré à la figure

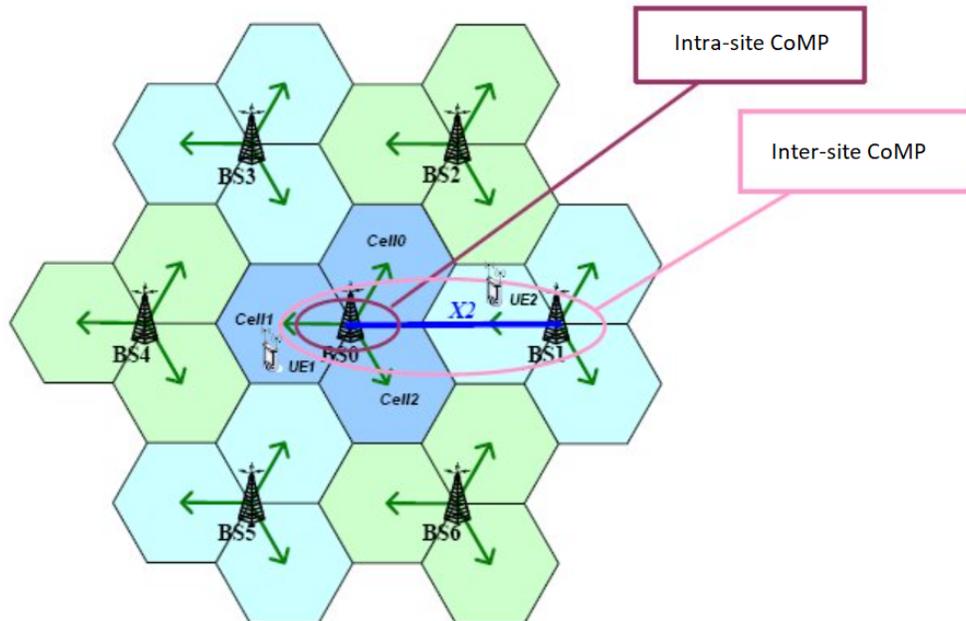


FIGURE 2.4 CoMP intra-site et inter-site

2.4 (Tomás, 2021).

Parmi les avantages de CoMP (Boldi *et al.*, 2011) :

- Une meilleure utilisation du réseau : les données peuvent être transmises via les BSs les moins chargées pour une meilleure utilisation des ressources.
- Une réduction des interférences : il est possible d'utiliser les interférences de manière constructive plutôt que destructive, en utilisant des techniques de combinaison spécialisées.
- Des performances de réception améliorées : l'utilisation de plusieurs BSs pour chaque connexion signifie que la réception globale sera améliorée.

La technologie CoMP est tout aussi importante dans les réseaux 5G. En effet, elle offre certaines des capacités du MIMO massif soit, augmente la capacité et la couverture jusqu'à la périphérie de la cellule dans un environnement de petites cellules. Les gains de capacité permis par la 5G CoMP sont importants dans les déploiements de sites basés sur de petites cellules. Selon une présentation de Qualcomm, CoMP pourrait être vu comme une extension du MIMO, ils rapportent que « *Massive MIMO utilise un grand nombre d'antennes pour créer plusieurs dimensions spatiales à partir de la propagation par trajets multiples afin d'augmenter la capacité, la couverture et la périphérie des cellules, tandis que CoMP utilise un grand nombre d'antennes distribuées pour créer plusieurs dimensions spatiales pour une capacité et/ou une diversité spatiale accrues pour la fiabilité* » [Traduction libre] (Tomás, 2021)

2.2.5.2 La coordination améliorée des interférences intercellulaire

Les systèmes eICIC constituent une évolution des systèmes ICIC (en anglais *Inter-Cell Interference Coordination*), pour traiter les problèmes d'interférence dans les réseaux hétérogènes et atténuer les interférences sur le trafic et les canaux de contrôle. Alors que l'ICIC coordonne les interférences intercellulaires dans les domaines de fréquence et de puissance, l'eICIC coordonne les interférences intercellulaires également dans le domaine temporel. eICIC se base sur le concept de "sous-trame presque vide" (en anglais *Almost Blank Sub-frame*, ABS) qui n'envoie aucun canal de trafic et sont principalement des trames de canal de contrôle à très faible puissance. Si la macrocellule configure les sous-frames ABS, les équipements utilisateurs connectés aux pico/femtocellules peuvent envoyer leurs données pendant ces trames ABS et éviter ainsi les interférences de la macrocellule, comme le montre la figure 2.5.

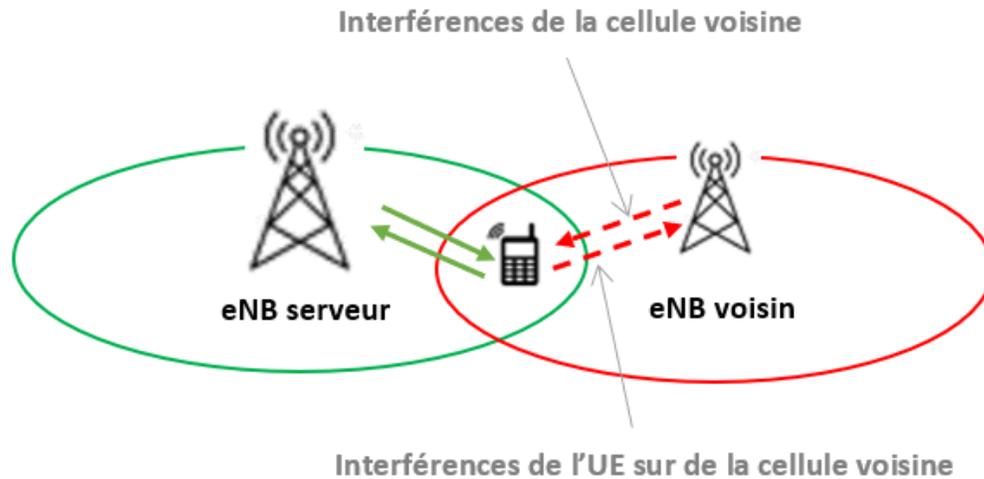


FIGURE 2.5 Interférences intercellulaires

Le mécanisme de l'eICIC a été standardisé en LTE-A et son efficacité a été vérifiée. Ces solutions peuvent être utilisés dans les systèmes 5G et au-delà. Cependant, il reste encore beaucoup de travail à faire pour bien comprendre l'eICIC et son impact sur d'autres systèmes de communication (Ling *et al.*, 2019).

Avec les ondes millimétriques, le MIMO massif, les petites cellules et d'autres technologies, la 5G promet une latence ultra-faible et des vitesses de données record pour les utilisateurs de smartphones, les voitures autonomes, les joueurs de réalité virtuelle, etc. Par conséquent, le réseau étudié dans le cadre de ce mémoire suppose l'utilisation des technologies introduite dans ce chapitre, notamment le mmWave, les petites cellules et le beamforming.

2.3 Conclusion

Ce chapitre a présenté d'une manière concise les réseaux de 5^{ème} génération et leurs différentes caractéristiques. Il a par la suite discuté des technologies émergentes qui feront partie de la 5G et des générations futures de réseaux mobiles. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les travaux liés à notre problématique.

CHAPITRE III

ÉTAT DE L'ART

Récemment, le nombre d'utilisateurs des réseaux cellulaires a considérablement augmenté et la taille des données échangées continue de croître de façon exponentielle. Par conséquent, les réseaux cellulaires sont confrontés à plusieurs défis, notamment la disponibilité, l'accessibilité et la forte demande de vitesses élevées et de faible latence. Cependant, les utilisateurs finaux cherchent toujours à bénéficier d'une excellente qualité de service, même dans des situations de haute densité. Les réseaux hétérogènes réguliers constitués de macro-cellules et de plusieurs petites cellules sont incapables de répondre à de telles exigences (Andrews *et al.*, 2014). Afin d'y remédier, de nouvelles technologies ont vu le jour, particulièrement l'utilisation de fréquences plus élevées telles que les ondes millimétriques. Parmi les avantages des communications mmWave, on trouve la propagation directive à courte portée et les bandes passantes plus larges (Rangan *et al.*, 2014). De plus, les communications mmWave favorise davantage un déploiement dense de BSs, ce qui permet une amélioration significative de la capacité du réseau (Andrews *et al.*, 2014). Le défi, toutefois, est l'interférence causée par le chevauchement de la couverture des BSs. Pour surmonter ce problème, des approches orientées utilisateur, où chaque utilisateur est servi conjointement par un groupe de BSs, ont été proposées et étudiées dans la littérature.

Dans ce chapitre, nous présentons un survol des différents travaux de recherche qui traitent des sujets reliés à la problématique considérée dans ce mémoire. Dans un premier lieu, nous présentons différentes approches pour l'allocation des ressources dans les réseaux ultra-denses orientés utilisateur. Ensuite, nous présentons des travaux réalisés pour l'allocation des ressources dans les réseaux orientés utilisateur à ondes millimétriques.

3.1 Réseaux ultra-dense centrés sur l'utilisateur

Avec la densification des réseaux sans fil, les architectures basées sur le groupement (en anglais *clustering*) centré sur l'utilisateur telles que décrites dans (Chen *et al.*, 2016a) sont devenues l'un des principes de conception prometteurs afin de garantir une qualité de service (QoS) élevée et répondre aux exigences des utilisateurs. Le fondement de ces architectures est que les BSs sont regroupées en clusters (ou cellules virtuelles) dans le but de bénéficier des avantages de la technique de transmission conjointe de (Nigam *et al.*, 2014). Par conséquent, plusieurs travaux se sont intéressés à l'étude de ces architectures. (Kim *et al.*, 2019) a effectué une analyse du nombre optimal de clusters pour atteindre la capacité maximale de l'UE dans un environnement ultra dense (en anglais *Ultra-Dense Networks*, UDNs). Les résultats obtenus démontrent que lorsque le nombre de clusters augmente, la réutilisation de fréquence et la capacité des UEs augmentent. Toutefois après un certain seuil de nombre de clusters (environ 13 clusters pour un environnement de 1000 BSs et 600 UEs par 1km^2), l'interférence entre clusters augmente à mesure que le nombre de clusters augmente. Il ont aussi démontré que parmi les paramètres suivants : la densité des BSs ; la densité des UEs ; la puissance de transmission de la BS ; et la bande de fréquence, c'est la fréquence centrale qui a le plus grand impact sur le nombre op-

timal de clusters. En effet, la puissance reçue des BSs qui servent l'UE et la puissance des interférences provenant d'autres clusters sont toutes les deux réduites dans les bandes de hautes fréquences à cause d'une perte de trajet plus élevée. Cependant, il y a un seul signal intéressant reçu au niveau de l'utilisateur contrairement aux interférences qui peuvent être plusieurs.

3.1.1 Allocation des ressources dans les UDNs centrés sur l'utilisateur

Dans les dernières générations des réseaux mobiles où les abonnés ainsi que la demande de données ne cesse d'augmenter, les UDNs sont utilisés pour répondre aux demandes toujours croissantes de données. Cependant, dans ces types de réseaux, les interférences sont importantes, étant donné que la couverture de cellules est plus petite et densément disposée. De ce fait, (Liu *et al.*, 2015) considère que le clustering et l'allocation des ressources intercellulaires sont nécessaires pour les UDNs. Ils proposent dans leur article une solution en deux étapes : la première étape concevoir à construire une technique de clustering orienté utilisateur basé sur la théorie des jeux ; la deuxième étape propose un ordonnancement basé sur la coloration des graphes. Les résultats de simulation montrent que le modèle proposé, qui considère conjointement le clustering avec l'allocation des ressources, peut améliorer considérablement les performances du système. Les graphes sont aussi utilisés dans (Chen *et al.*, 2016b) qui étudie le problème d'allocation de ressources pour un réseau centré sur l'utilisateur. Les auteurs ont proposé une solution d'allocation pour les réseaux à grande échelle. Basé sur la théorie des graphes, le schéma proposé obtient des résultats plus intéressants que les systèmes avec clustering fixe.

(Jung Kim et Gon Kim, 2020) propose une solution de clustering et une allocation de sous-porteuses (en anglais *subcarriers*). Considérant que la solution CoMP (*Coordinated Multi Point*) existante ne prend pas en compte l'allocation de sous-porteuses, l'effet des interférences augmente lorsque la même sous-porteuse est allouée sur des distances adjacentes. De ce fait, les auteurs utilisent une technique de clustering basée sur la localisation dans un environnement de système de communication CoMP, dans le but d'augmenter le débit et réduire l'interférence aux UEs au bord de la cellule dans un UDN. Pour l'allocation des ressources en fréquences, la solution proposée commence par utiliser l'algorithme des k-moyennes (en anglais *k-means*) pour déterminer les clusters regroupant les petites BSs. Par la suite, la matrice des interférences des petites BSs est créée. (Jung Kim et Gon Kim, 2020) vise à maximiser les débits des UEs, en allouant différentes sous-porteuses aux petites BSs qui interfèrent et en attribuant une puissance proportionnelle à la qualité du canal à chaque sous-porteuse. Les résultats obtenus confirment que le débit global augmente en réduisant les interférences avec les cellules voisines et aussi que les performances s'améliorent à mesure que le nombre d'utilisateurs augmente. Toujours dans le but de réduire les interférences entre les petites cellules dans les réseaux ultra-denses, (Tian et Jia, 2020) propose une solution améliorée d'allocation de ressources par clustering (en anglais *Clustering-Assisted Resource Allocation, CARA*) divisé en trois étapes : (i) un regroupement des BSs femto en clusters selon un seuil d'intra-interférence prédéfini afin de contraindre la somme des interférences dans chaque cluster et la sélection des têtes des clusters ; (ii) une allocation de sous-canaux aux différents UEs en deux étapes, effectuée par les têtes des clusters, où la première étape attribue un sous-canal à chaque utilisateur et la deuxième étape affecte un deuxième sous-canal à certains utilisateurs ; (iii) une allocation de puissance pour maximiser le débit pour une configuration donnée de clustering et d'allocation de sous-canaux. Les résultats

de simulation indiquent que la solution proposée améliore considérablement le débit total du système.

(Bai *et al.*, 2014) se concentre sur l'étude des problèmes d'équilibrage de charge et d'allocation des ressources avec une densité d'utilisateurs et une taille de cluster différentes dans un UDN. Une technique d'allocation dynamique des ressources est proposé dans le but d'optimiser les performances du système, ce qui a réduit le pourcentage global d'utilisateurs insatisfaits de 80%. Les résultats de simulations présentés dans (Bai *et al.*, 2014) montre que, au fur et à mesure que la taille des clusters augmente, les performances de l'équilibrage de charge deviennent plus faibles que celles de l'allocation des ressources. Ainsi, la densité des utilisateurs et la taille du cluster ont plus d'impact sur les performances de l'équilibrage de charge que celle de l'allocation des ressources. Cependant, dans le cas où la densité d'utilisateurs est plus faible, un scénario très probable pour les déploiements UDN, l'allocation des ressources est beaucoup plus performante.

Le problème de l'allocation des ressources dans les environnements UDNs basés sur une architecture centrée sur l'utilisateur est étudié aussi dans (Lin *et al.*, 2018) et (Luo et Hua, 2016). En effet, les UDNs sont confrontés à des défis tels que la disponibilité limitée des blocs de ressources orthogonaux (RB) et un équilibrage de la charge du trafic. Pour relever ces défis, (Lin *et al.*, 2018) propose de maximiser l'efficacité spectrale en optimisant le clustering et l'allocation des ressources sous la contrainte des ressources limitées. Dans un premier lieu, les auteurs développent un nouveau modèle de clustering chevauché et distribué. Ensuite, les RBs orthogonaux sont alloués aux clusters formés précédemment, et ce, en se basant sur la méthode

de coloration des graphes. Cette approche permet d’atténuer l’effet des interférences inter-cluster sur les performances. Le travail présenté dans (Luo et Hua, 2016) vise à maximiser le débit total pondéré (en anglais *weighted sum rate*, WSR) des utilisateurs sous les contraintes de ressources dans les UDN. Ils considèrent l’optimisation conjointe de l’allocation des ressources dans les liaisons terrestres sans fil et le user-centric clustering dans les liaisons d’accès. Cependant, (Luo et Hua, 2016) ne tient pas compte de l’allocation des bandes de fréquences.

Les travaux mentionnés dans cette section ne prennent pas en compte les communications sur des fréquences d’ondes millimétriques. De plus, ces travaux ne considèrent pas la maximisation du nombre d’utilisateurs satisfaits qui est une métrique importante et c’est un élément de différence importante que ce mémoire vient combler.

3.2 Réseaux cellulaires à ondes millimétriques

(Uwaechia et Mahyuddin, 2020) fournit un aperçu complet des caractéristiques de propagation et examine les modèles de canaux pour les communications mmWave. Les réseaux cellulaires mmWave ont été étudiés dans (Bai *et al.*, 2014), les auteurs proposent une approche basée sur la géométrie stochastique pour évaluer les performances des réseaux cellulaires mmWave avec blocage. Les auteurs ont intégré le blocage, en modélisant la probabilité que la communication, soit en visibilité directe (en anglais *Line-Of-Sight*, LOS) ou non (en anglais *Non-Line-Of-Sight*, NLOS), en fonction de la distance entre le UE et la BS.

3.2.1 Allocation des ressources dans les réseaux à ondes millimétriques

(Bai *et al.*, 2014) précise que les réseaux mmWave devraient être denses, mais pas trop dense, cela est dû au fait que lorsque la densité des BSs augmente, le nombre de BSs interférentes en LOS augmente aussi. Ils ont aussi montré que les réseaux denses mmWave peuvent atteindre à la fois des débits plus élevés et une couverture comparable à celle des réseaux cellulaires à micro-ondes. (Pan *et al.*, 2021) propose un algorithme basé sur un réseau de neurones pour résoudre l’association d’utilisateurs et allocation de ressources pour des systèmes de communication mmWave. Le problème d’allocation des ressources est formulé comme un problème de programmation quadratique par contraintes quadratiques aux nombre entier partiel (en anglais *mixed-integer quadratically constrained quadratic programming*, MIQCQP). La résolution du problème a été réalisée en deux étapes. La première étape décompose le problème MIQCQP en deux sous-problèmes : un sous-problème de matrice associée binaire ; et un sous-problème de rapport d’intégration des réseaux d’amenée et d’accès (en anglais *integrated access backhaul*, IAB) continu. La deuxième étape conçoit un réseau de neurones pour résoudre le problème d’inférence de la matrice d’association binaire et un algorithme d’allocation des ressources pour trouver le ratio IAB sous-optimal. Les résultats de simulation dans (Pan *et al.*, 2021) montrent que l’algorithme proposé peut obtenir de bonnes performances avec une vitesse d’inférence rapide.

3.2.2 Allocation des ressources dans les réseaux UDMNs

Les UDNs fournissent une efficacité de réutilisation spectrale très élevée en exploitant les transmissions adjacentes rapprochées, alors que les communications mmWave

fournissent des ressources spectrales abondantes. Cependant, pour accéder aux avantages des UDN, l'optimisation de l'association des utilisateurs et de l'allocation des ressources entre les liaisons d'accès radio doivent être prises en compte. Pour ce faire, (Liu *et al.*, 2017) propose un jeu de coalition basé sur des algorithmes d'association d'utilisateurs et d'allocation de bandes de fréquence pour les réseaux ultradense à ondes millimétriques (en anglais *ultradense mmWave networks*, UDMNs). Les auteurs ont considéré une association conjointe d'utilisateurs, c.-à-d. les utilisateurs forment plusieurs groupes en jouant à des jeux de coalition, dans le but de maximiser le débit des petites cellules pour les UDMN auto-reliés. Les résultats de simulation montrent que la technique proposée améliore le débit de manière significative, et se rapproche des performances de l'algorithme d'optimisation immunitaire (en anglais *immune optimization algorithm*, IOA) avec une complexité de calcul beaucoup plus faible. (Zhang *et al.*, 2017) étudie également le problème d'association des utilisateurs dans les UDMN, ainsi que l'allocation de puissance sous contraintes d'équilibre de charge, récupération d'énergie par les BSs, et QoS au niveau des utilisateurs. Pour ce faire, ils ont modélisé le problème sous forme de problème aux nombres entiers partiel résolu par une décomposition lagrangienne. Les auteurs ont ensuite proposé un algorithme d'association et d'allocation de puissance qui converge rapidement vers un point optimal avec une complexité réduite.

3.2.3 Réseaux à ondes millimétriques orientés utilisateur

Les performances de la coopération des BSs en mmWave sont étudiées dans plusieurs travaux de recherche, tels que (Maamari *et al.*, 2016), (Liu *et al.*, 2019), (Skouroumounis *et al.*, 2017), (Shi *et al.*, 2019), (Soleimani et Sabbaghian, 2020) et (Humadi *et al.*, 2021).

Le travail de (Maamari *et al.*, 2016) montre que la coopération des BSs améliore les performances dans des réseaux mmWave à faible densité de BSs et la présence d'obstacles. Les auteurs ont étudié un schéma de clustering de BS dans lequel un utilisateur est connecté à un nombre fixe de BSs. Ils ont considéré l'effet de différents paramètres réseau et système sur les performances de probabilité de couverture, tels que la densité des BSs, les blocages, et différentes distributions d'évanouissement sur les liens directs.

(Skouroumounis *et al.*, 2017) étudie les performances d'une solution de sélection de BS à faible complexité pour des réseaux hétérogènes (en anglais *heterogeneous network*, HetNet). Une approche de sélection de BSs à deux étapes a été proposée. Dans la première étape, un ensemble de stations de base candidates, qui appartiennent à différents niveaux, est pré-sélectionné et dans la deuxième étape, l'utilisateur choisit, à partir de l'ensemble pré-sélectionné, la BS avec le rapport signal sur interférence plus bruit le plus élevé (en anglais *Signal-to-interference-plus-noise ratio*, SINR).

(Liu *et al.*, 2019) étudie le problème d'association des utilisateurs et d'allocation des ressources dans un réseau hétérogène mmWave où différentes bandes ont des caractéristiques de propagation différentes. Dans ce modèle, un utilisateur peut transmettre sur plusieurs bandes mmWave simultanément. De ce fait, deux modèles d'accès différents sont considérés. Le premier est un modèle d'accès à bande unique, pour lequel ils ont développé une approche d'allocation optimale des intervalles de temps, puis un algorithme itératif pour l'association d'utilisateurs et une allocation de puissance basée sur la méthode de décomposition duale lagrangienne et la méthode de Newton-Raphson. Le deuxième modèle étudié est un modèle d'accès à bandes multiples, pour lequel ils ont proposé une solution quasi-optimale basée sur le cadre d'approximation de Markov.

(Soleimani et Sabbaghian, 2020) vise à surmonter la perte de performance imposée par le canal et gérer les interférences. Il propose une méthode de clustering conçue pour un environnement mmWave qui améliore la connectivité LOS. Dans l’approche proposée, les utilisateurs femto (FU) et les points d’accès femto (FAP) sont regroupés en cluster dans le but d’avoir le plus de liaisons LOS. Les auteurs ont résolu le problème d’optimisation binaire en imposant un terme de pénalité déductive si la contrainte est violée et ont montré que leur technique de clustering surpasse l’une des meilleures méthodes de clustering existantes. (Soleimani et Sabbaghian, 2020) propose également un algorithme sous-optimal pour associer les FU aux FAP dans chaque cluster ce qui a donné des performances proches de l’optimal avec une complexité de calcul raisonnable. Dans ce travail, ils ont aussi traité le problème d’allocation de puissance et de sous-canaux en proposant une solution à un problème non linéaire aux variables entières partiel (en anglais *mixed integer nonlinear programming*, MINLP) qui exploite une fonction de pénalité multiplicative.

Le travail de (Shi *et al.*, 2019) étudie un réseau dense à ondes millimétriques centré sur l’utilisateur, où les points d’accès et les blocages sont aléatoirement distribués. La géométrie stochastique est utilisée pour effectuer une analyse de la probabilité de couverture et de la capacité ergodique sous trois différentes distributions d’évanouissement à petite échelle. L’analyse des performances a montré que la coopération des points d’accès permet d’atteindre des couvertures plus larges et un gain de capacité notable dans une région où la densité des points d’accès est faible. Les auteurs dans (Humadi *et al.*, 2021) utilisent également la géométrie stochastique pour analyser la probabilité de couverture et l’efficacité spectrale moyenne, avec des communications mmWave. Ils proposent une approche de clustering centrée sur l’utilisateur, qui se base sur une sélection dynamique des BSs en fonction de l’état des canaux. Cepen-

dant, le travail proposé dans (Humadi *et al.*, 2021) ne tient pas compte du problème d'association des utilisateurs.

3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les travaux de recherche liés à notre problématique, notamment les travaux qui traitent les problématiques en relation avec les réseaux ultra-denses centrés sur l'utilisateur et les réseaux à ondes millimétriques en fournissant une attention particulière aux différentes problématiques d'allocation des ressources dans ces réseaux. Dans le chapitre suivant, nous allons établir notre modèle de système et formuler le problème étudié.

CHAPITRE IV

MODÈLE DE SYSTÈME ET FORMULATION DU PROBLÈME

Une architecture centrée sur l'utilisateur, où un ensemble de BSs coopèrent pour servir leurs clients, est une solution prometteuse pour un déploiement dense de BSs qui communiquent sur des bandes de fréquence mmWave. En effet, cette coopération permet de faire face aux défis des interférences subies par l'utilisateur. Les BSs les plus proches de l'utilisateur, ou plus précisément celles dont les signaux reçus sont assez élevés, composeront un cluster (ou une super station de base virtuelle) qui va servir l'utilisateur en question.

Dans ce mémoire, nous étudions un réseaux centré sur l'utilisateur avec des communications mmWave. Ce chapitre présente le modèle de système utilisé ainsi que la formulation du problème étudié. On considère un réseau dense utilisant des communications mmWave et une architecture centrée sur l'utilisateur. Le problème étudié vise à maximiser le nombre des utilisateurs associés, sous contraintes de QoS. Le problème est d'abord formulé sous la forme d'un problème non linéaire aux nombres entiers partiel, par la suite il est démontré que le problème est \mathcal{NP} -difficile.

4.1 Modèle du système

On considère un réseau dense de BSs qui utilise les bandes de fréquences millimétriques pour communiquer avec des utilisateurs. Le réseau est composé de U utilisateurs et de B BSs. Soient $\mathcal{U} = \{1, \dots, U\}$ et $\mathcal{B} = \{1, \dots, B\}$ qui représentent, respectivement, l'ensemble d'utilisateurs et l'ensemble de BSs. On suppose que chaque BS $b \in \mathcal{B}$ dispose de C canaux fréquentiels et $\mathcal{C} = \{1, \dots, C\}$ désigne l'ensemble de ces canaux. Un canal $c \in \mathcal{C}$ peut être réutilisé pour servir plusieurs utilisateurs, et cela, sur des BSs différentes. On suppose aussi qu'un utilisateur $u \in \mathcal{U}$ peut être servis simultanément par plusieurs BSs. Cependant, un seul et même canal doit être attribué à cet utilisateur par l'ensemble des BSs qui le servent.

Ce modèle considère une architecture centrée sur l'utilisateur, où chaque utilisateur est associé et desservi par une ou plusieurs BSs qui transmettent conjointement les mêmes données. Le but de ce processus d'association est de garantir une bonne qualité de transmission, c.-à-d. s'assurer que le rapport signal sur interférence plus bruit (en anglais *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*, SINR) de l'UE satisfait un certain SINR seuil. Ayant la possibilité de transmettre sur plus d'un canal, une BS peut desservir plusieurs utilisateurs simultanément et peut ainsi appartenir à plusieurs clusters différents en même temps. Un exemple de ce modèle avec six utilisateurs, dix BSs et trois canaux par station de base est donné dans la Figure 4.1.

Dans cette figure, UE4 est servi par BS1, BS2 et BS3 sur le canal1 et BS1 sert également UE2 sur le canal2. Cela signifie que BS1 fait partie du cluster de UE4 et en même temps du cluster de UE2. De plus, UE4 est servi sur le canal1. Étant donné que les canaux peuvent être réutilisés, les communications dans le même canal

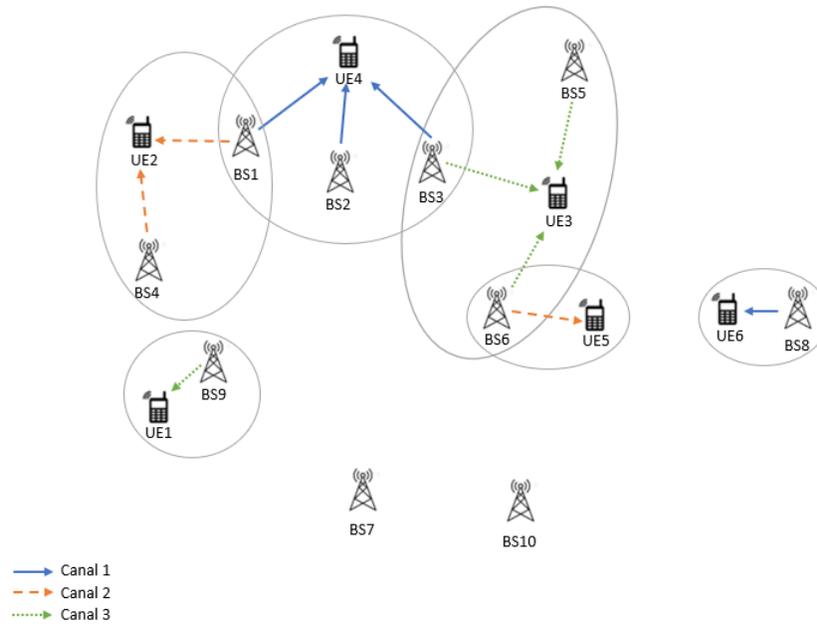


FIGURE 4.1 Modèle du système

interféreront les unes avec les autres.

4.1.1 Gain d'antenne

On considère la formation de faisceaux (ou beamforming en anglais) qui est une technique de traitement du signal utilisée pour l'émission ou la réception directionnelle de signaux, ce qui augmente la capacité de la liaison et permet d'utiliser plus efficacement la bande d'ondes millimétriques. En effet, le gain réalisé grâce à la formation de faisceaux peut compenser l'affaiblissement de propagation et la pénétration excessive du mmWave (Kutty et Sen, 2016).

On suppose que toutes les BSs sont équipées de plusieurs antennes et sont ainsi

capable d'utiliser la technique de formation de faisceaux afin d'augmenter le gain d'antenne dans une direction donnée. Le modèle de gain d'antennes est décrit selon (Wang *et al.*, 2018) et (Humadi *et al.*, 2021). Le gain d'antenne $G(\theta)$ est exprimé comme suit

$$G(\theta) = \begin{cases} G_M, & |\theta| \leq \frac{\theta_T}{2} \\ G_S, & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.1)$$

où G_M et G_S sont les gains des antennes dans le lobe principal et les lobes secondaires, respectivement. θ désigne l'angle de direction et θ_T est la largeur du faisceau du lobe principal.

4.1.2 Modèle de blocage

Étant donné que les signaux sont transmis sur des ondes millimétriques, ils sont plus sensibles aux blocages. Dans ce mémoire, nous adoptons le modèle de blocage en balle (Andrews *et al.*, 2017). Ce modèle considère un rayon approximatif de la région de la visibilité directe (LOS), désignée par R . Par conséquent, la probabilité qu'une liaison, de distance d , soit considérée en visibilité directe est donnée par

$$P_{LOS}(d) = \begin{cases} 1, & \text{si } d < R \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.2)$$

De la même manière, la probabilité qu'un lien de distance d soit hors visibilité directe (NLOS) est donnée par $P_{NLOS}(d) = 1 - P_{LOS}(d)$.

Pour augmenter la probabilité qu'une liaison soit LOS entre un utilisateur et les BSs qui lui sont associées, il faudra augmenter la densité de déploiement des stations de base, car cela réduira les distances de transmission. En effet, une densité assez élevée crée de fortes chances de trouver des BSs disponibles à proximité de l'utilisateur. Toutefois, les déploiements denses nécessitent une gestion plus adaptée du problème d'interférence .

4.1.3 Affaiblissement de propagation (Path-loss)

Comme souligné dans (Humadi *et al.*, 2021), les liaisons LOS et NLOS présentent des caractéristiques différentes par rapport à la qualité des signaux reçus. Plus précisément les deux types de liaisons ont des exposants d'affaiblissement différents. Soient α^L et α^{NL} , respectivement, les exposants d'affaiblissement LOS et NLOS. Pour un lien de distance d , l'affaiblissement de propagation est donné par

$$PL(d) = \begin{cases} d^{-\alpha^L}, & \text{liaisons LOS,} \\ d^{-\alpha^{NL}}, & \text{liaisons NLOS.} \end{cases} \quad (4.3)$$

4.1.4 Évanouissements à petite échelle (small-scale fading)

On suppose que le coefficient de canal suit une distribution de Nakagami- m où m indique le degré de sévérité d'évanouissement. La distribution d'évanouissement à petite échelle est différente selon le type de la liaison sans fil, LOS ou NLOS. L'évanouissement dans les liaisons LOS mmWave est moins sévère c.-à-d. la valeur de m est relativement plus grande et est généralement modélisée par un évanouissement de Rice, ce qui peut être bien représenté par le modèle Nakagami- m avec $m = \frac{(K+1)^2}{2K+1}$,

où K est le facteur ricien (Humadi *et al.*, 2021). Par conséquent, le gain du canal à petite échelle est une variable aléatoire Gamma, c.-à-d. $h \sim \Gamma(m, \frac{1}{m})$ où $\Gamma(\cdot)$ est la fonction Gamma et le paramètre de Nakagami m est égal à m_L ou m_{NL} selon si de la propagation est LOS ou NLOS, respectivement.

4.1.5 Rapport signal sur interférence plus bruit (SINR)

Dans ce travail, nous adoptons la technique de transmission conjointe, où un ensemble d'émetteurs (ici, BSs) transmettent conjointement les mêmes données à un récepteur (ici, un l'utilisateur donné). La puissance du signal reçu au niveau de l'utilisateur u servi sur le canal c , est donnée par :

$$S_{u,c} = \sum_{b \in \mathcal{G}_u} p_{c,b} G_M |h_{u,c,b}|^2 PL(d_{u,b}), \quad (4.4)$$

où \mathcal{G}_u est le cluster des BSs qui servent l'utilisateur u , $p_{c,b}$ indique la puissance de transmission de la BS b sur le canal c , $d_{u,b}$ est la distance entre la BS b et l'utilisateur u et $h_{u,c,b}$ est coefficient du canal c entre la BS b et l'utilisateur u .

Étant donné que les canaux peuvent être réutilisés, les communications dans le même canal interféreront les unes avec les autres. La figure 4.2 montre un exemple de ces interférences. Soit \mathcal{I}_u l'ensemble des utilisateurs qui sont servis sur le même canal que celui utilisé par u . La puissance des interférences reçue au niveau de l'utilisateur u s'il est servi sur le canal c , peut être donnée par :

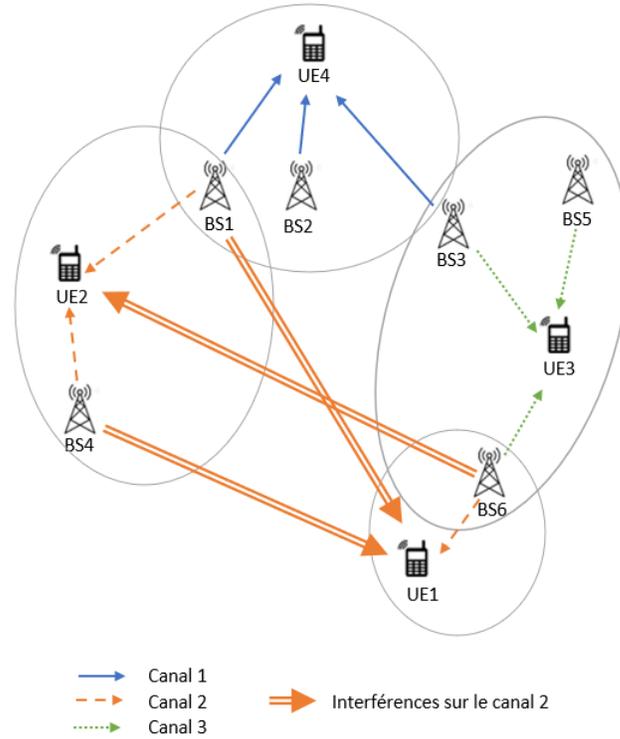


FIGURE 4.2 Exemple d'interférences dans le réseau

$$I_{u,c} = \sum_{v \in \mathcal{I}_u} \sum_{n \in \mathcal{G}_v} p_{c,b} G(\theta_n) |h_{u,c,n}|^2 PL(d_{u,n}), \quad (4.5)$$

où θ_n et $G(\theta_n)$ sont, respectivement, l'angle et le gain directionnel du signal interférant émis par la $n^{\text{ème}}$ BS. En se basant sur ces hypothèses, le SINR de l'utilisateur u sur le canal c est donné par :

$$\gamma_{u,c} = \frac{S_{u,c}}{N_0 + I_{u,c}}, \quad (4.6)$$

où N_0 est la puissance du bruit thermique.

4.2 Formulation du problème

L'objectif de ce projet est de maximiser le nombre d'utilisateurs associés dans le réseau, c.-à-d. le nombre d'utilisateurs qui reçoivent un SINR supérieur ou égal au *SINR seuil*, toutes les notations utilisées sont énumérées dans le tableau 4.1.

Pour modéliser le problème, trois ensembles de variables d'optimisation sont définis,

$$x_{u,c,b} = \begin{cases} 1, & \text{si l'utilisateur } u \text{ est servi par la BS } b \text{ sur le canal } c, \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.7)$$

$$y_{u,c} = \begin{cases} 1, & \text{si le canal } c \text{ est attribué à l'utilisateur } u, \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.8)$$

et $p_{c,b}$ la puissance allouée par la BS b à la transmission sur le canal c .

Soient $\mathbf{X} = [x_{u,c,b}]$ une matrice de taille $(U \times C \times B)$, $\mathbf{Y} = [y_{u,c}]$ une matrice de taille $(U \times C)$ et $\mathbf{P} = [p_{c,b}]$ une matrice de taille $(C \times B)$. Ainsi, le SINR reçu par l'utilisateur u sur le canal c peut être reformulé comme suit :

$$\gamma_{u,c} = \frac{\sum_{b=1}^B x_{u,c,b} p_{c,b} G_M |h_{u,c,b}|^2 PL(d_{u,b})}{N_0 + \sum_{\substack{f=1 \\ f \neq u}}^U \sum_{b=1}^B x_{f,c,b} p_{c,b} G(\theta_b) |h_{u,c,b}|^2 PL(d_{u,b})} \quad (4.9)$$

TABLEAU 4.1 Tableau de notations.

| Notations | Paramètre |
|---|---|
| $\mathcal{U}, \mathcal{B}, \mathcal{C}$ | Ensemble d'utilisateurs, ensemble de BS, ensemble de canaux |
| U, B, C | Nombre d'utilisateurs, nombre de BS, nombre de canaux |
| $G(\theta)$ | Gain d'antenne selon l'angle θ |
| θ | Angle de direction |
| θ_T | Largeur du faisceau du lobe principal |
| G_M | Gain dans le lobe principal |
| G_S | Gain dans les lobes secondaires |
| R | Rayon de la région de LOS |
| $d_{u,b}$ | Distance entre utilisateur et BS |
| $P_{LOS}(), P_{NLOS}()$ | Probabilité que le lien est LOS, NLOS |
| α^L, α^{NL} | Exposants d'affaiblissement LOS, NLOS |
| $S_{u,c}$ | Puissance du signal reçu à l'utilisateur u servi sur le canal c |
| \mathcal{G}_u | Cluster des BSs servant l'utilisateur u |
| $p_{c,b}$ | Puissance de transmission de la BS b sur le canal c |
| $h_{u,c,b}$ | Coefficient du canal c entre la BS b et l'utilisateur u |
| \mathcal{I}_u | Ensemble des utilisateurs servis sur le même canal que u |
| $I_{u,c}$ | Puissance des interférences reçue au niveau du UE u |
| $\gamma_{u,c}$ | SINR de l'utilisateur u sur le canal c |
| N_0 | Puissance du bruit thermique |
| γ_{Th} | SINR seuil |
| P_T | Puissance totale disponible au niveau d'une BS |

Soit γ_{Th} le SINR seuil (en anglais *SINR Threshold*) et P_T la puissance totale disponible au niveau de chaque BS. Le problème étudié peut être formulé comme suit :

$$\underset{\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{P}}{\text{Maximiser}} \sum_{u \in \mathcal{U}} \sum_{c \in \mathcal{C}} y_{u,c} \quad (4.10a)$$

$$\text{s. c. } \gamma_{u,c} \geq y_{u,c} \cdot \gamma_{Th}, \forall u \in \mathcal{U}, c \in \mathcal{C} \quad (4.10b)$$

$$\sum_{c \in \mathcal{C}} x_{u,c,b} \leq 1, \forall u \in \mathcal{U}, b \in \mathcal{B} \quad (4.10c)$$

$$\sum_{u \in \mathcal{U}} x_{u,c,b} \leq 1, \forall c \in \mathcal{C}, b \in \mathcal{B} \quad (4.10d)$$

$$y_{u,c} - x_{u,c,b} \geq 0, \forall u \in \mathcal{U}, c \in \mathcal{C}, b \in \mathcal{B} \quad (4.10e)$$

$$\sum_{c \in \mathcal{C}} y_{u,c} \leq 1, \forall u \in \mathcal{U} \quad (4.10f)$$

$$\sum_{c \in \mathcal{C}} p_{c,b} \leq P_T, \forall b \in \mathcal{B} \quad (4.10g)$$

$$x_{u,c,b} \in \{0, 1\}, \forall u \in \mathcal{U}, c \in \mathcal{C}, b \in \mathcal{B} \quad (4.10h)$$

$$y_{u,c} \in \{0, 1\}, \forall u \in \mathcal{U}, c \in \mathcal{C}. \quad (4.10i)$$

$$p_{c,b} \geq 0, \forall c \in \mathcal{C}, b \in \mathcal{B} \quad (4.10j)$$

Les contraintes (4.10b) garantissent que le SINR reçu par un utilisateur associé est supérieur ou égal au SINR seuil. Les contraintes (4.10c) garantissent qu'une BS n'attribue qu'un seul canal par utilisateur, quant aux contraintes (4.10d), elles indiquent que le canal c dans la BS b est attribué à un seul utilisateur. Les contraintes (4.10e) et (4.10f) confirment que l'utilisateur est servi sur le même canal par toutes les BSs qui lui sont associées. Les contraintes (4.10g) garantissent que la somme de

toutes les puissances allouées aux canaux dans une BS b est inférieure ou égale à P_T , la puissance maximale dont dispose la station. Les contraintes (4.10h) et (4.10i) garantissent que $x_{u,c,b}$ et $y_{u,c}$ sont des variables binaires. Enfin, les contraintes (4.10j) garantissent que la puissance allouée à la BS b sur le canal c est d'une valeur positive.

4.3 \mathcal{NP} -dureté

Une classe de complexité, en informatique théorique, est un groupe de problèmes algorithmiques dont la résolution peut se faire de la même manière sur un modèle de calcul et qui nécessite les mêmes ressources. La classe \mathcal{P} représente l'ensemble de tous les problèmes de décision calculables en temps polynomial par une machine de Turing déterministe. La classe \mathcal{NP} qui se réfère à *Nondeterministic Polynomial time*, représente les problèmes calculables en temps polynomial par une machine de Turing non-déterministe. Un problème \mathcal{NP} -difficile est un problème connu pour être au moins aussi difficile à résoudre que les problèmes les plus difficiles à résoudre dans la classe de complexité \mathcal{NP} (Arora et Barak, 2009).

Dans cette sous-section, nous démontrons que le problème formulé dans (4.10) est un problème \mathcal{NP} -difficile. Dans un premier temps, nous devons prouver que le problème est dans la classe \mathcal{NP} . Pour ce faire, il est simple de trouver, étant donné une solution, un algorithme de vérification qui s'exécute en temps polynomial. En effet, si l'ensemble des utilisateurs servis par chaque BS est donné, toutes les contraintes du problème (4.10) peuvent être vérifiées en temps polynomial. Le problème est donc dans la classe \mathcal{NP} .

Supposons l'association un-à-un, qui est un cas simplifié de notre problème, où chaque utilisateur ne peut être servi que par une seule BS. Supposons que chaque BS dispose d'une seule bande de fréquence, c.-à-d. $C = 1$. Ce cas simplifié du problème reste difficile à résoudre en temps polynomial. Premièrement, la difficulté réside dans la fonction objectif, qui cherche à maximiser le nombre d'utilisateurs associés aux BSs. Ensuite, la difficulté provient aussi des contraintes du SINR. En effet, chaque association entre un utilisateur et une BS sur un canal $c \in \mathcal{C}$, a un effet sur le SINR des autres associations sur ce même canal c . En se basant sur ces hypothèses, le problème d'association un-à-un qui est un cas spécial du (4.10) est équivalent au problème formulé dans (Mlika *et al.*, 2017) qui a été prouvé être un problème \mathcal{NP} -difficile. De ce fait, on déduit que le problème 4.10 est aussi \mathcal{NP} -difficile.

Le problème (4.10) est un problème non linéaire à nombres entiers partiel (en anglais *mixed integer non linear problem* ou MINLP). Puisque nous avons montré que le problème est \mathcal{NP} -difficile, cela signifie qu'il est impossible de trouver un algorithme pour le résoudre en temps polynomial, sauf si $\mathcal{P} = \mathcal{NP}$. Par conséquent, dans le chapitre suivant, nous proposons de résoudre le problème avec deux algorithmes heuristiques qui présentent des compromis différents entre la complexité temporelle et les performances en termes du nombre d'utilisateurs associés.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini notre modèle de système, formulé le problème et étudié sa \mathcal{NP} -dureté. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les deux solutions proposées, la première suit une approche gloutonne en deux phases alors que la deuxième adopte une approche d'optimisation par essaim de particules (PSO).

CHAPITRE V

SOLUTION PROPOSÉE

En raison de la grande complexité de calcul du problème formulé dans le chapitre précédent qui a été prouvé \mathcal{NP} -difficile. Dans ce chapitre, nous proposons deux différentes approches pour résoudre le problème avec une complexité de calcul réduite.

La première approche est un algorithme glouton qui se déroule en deux phases. La phase 1 de l'algorithme associe les utilisateurs avec autant de BSs que nécessaire pour satisfaire les contraintes du SINR, c.-à-d. que le SINR reçu au niveau de l'utilisateur doit être supérieur ou égal à un SINR seuil. La phase 2 effectue une allocation de puissance pour chaque association obtenue. La deuxième approche est un algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO). Dans cette approche, les particules sont représentées par des matrices d'association binaires. À chaque itération de l'algorithme la faisabilité de chaque particule obtenue est vérifiée, c.-à-d. si la particule respecte les contraintes du problème formulé, sinon la particule est réparée. Par la suite, le chapitre présente les complexités de calcul des deux algorithmes proposés.

5.1 Algorithme glouton d'association et d'allocation de puissance

Le problème formulé dans le chapitre précédent, est un problème complexe et difficile à résoudre d'une manière optimale. La difficulté réside, premièrement, dans l'association des utilisateurs. Cela est dû aux ressources limitées et aux contraintes de disponibilité de ces dernières. La deuxième difficulté réside dans les contraintes du SINR. En effet, une association entre un utilisateur et des BSs doit satisfaire un seuil minimal du SINR reçu. Cependant, chaque association dérange les autres, c.-à-d. cause des interférences aux utilisateurs servis sur le même canal.

L'algorithme heuristique propose de résoudre le problème en le divisant en deux sous-problèmes qui seront résolus en deux étapes distinctes. La première étape traite le problème d'association des utilisateurs aux BSs, en respectant les contraintes des ressources limitées. La deuxième étape se base sur les associations obtenues à l'étape 1 afin de procéder à l'allocation de la puissance nécessaire pour satisfaire les SINRs des utilisateurs associés. Comme il a été discuté précédemment, chaque association UE-BS contribue positivement au SINR de l'utilisateur en question mais impacte négativement les SINRs des autres utilisateurs servis sur le même canal. Dans le but de remédier à ce problème, l'algorithme considère un canal à la fois et exécute les deux étapes pour chaque canal, puis passe au canal suivant. Le pseudo-code de l'algorithme glouton appelé GAPA pour *Greedy Association and Power Allocation* est présenté en annexe.

5.1.1 Étape 1 : Association des utilisateurs

Cette étape est effectuée pour chaque canal $c \in \mathcal{C}$. L'algorithme procède un utilisateur à la fois en commençant par l'utilisateur ayant le plus grand gain de canal. Chaque utilisateur $u \in \mathcal{U}$ s'associe avec la BS ayant le gain de canal le plus élevé et l'algorithme vérifie si la contrainte du SINR est satisfaite en considérant cette association. Dans le cas contraire, l'algorithme répète ce même processus d'association jusqu'à ce que le SINR soit satisfait, dans cette étape le SINR est calculé avec la puissance maximale disponible dans chaque BS. Dans le cas où l'utilisateur u est associé avec toutes les stations de base disponibles dans le réseau mais que son SINR n'est toujours pas satisfait, toutes les associations sont annulées et l'utilisateur u n'est pas servi. Cela permet de libérer les ressources pour les autres UEs et dans la prochaine itération le processus d'association sera répété pour l'utilisateur u sur le canal suivant. Aussi, dans cette étape, l'algorithme s'assure que l'association finale de l'utilisateur u ne perturbe pas les associations précédentes, c.-à-d. vérifie si le SINR des utilisateurs déjà associés est toujours satisfait et que les interférences causées par l'association courante ne dérange pas cette contrainte. Dans le cas contraire, l'association en cours est annulée. La figure 5.1 montre le déroulement de cette première étape.

5.1.2 Étape 2 : Calcul et allocation de puissance

Cette étape est aussi effectuée d'une manière distincte pour chaque canal $c \in \mathcal{C}$. Pour chaque utilisateur $u \in \mathcal{U}$ associé dans l'étape 1 l'algorithme sauvegarde son cluster \mathcal{G}_u , c.-à-d. les BSs qui servent u . Par la suite, il calcule la puissance nécessaire à cette association pour atteindre le SINR seuil, à partir de la formule 4.9, et obtient ainsi

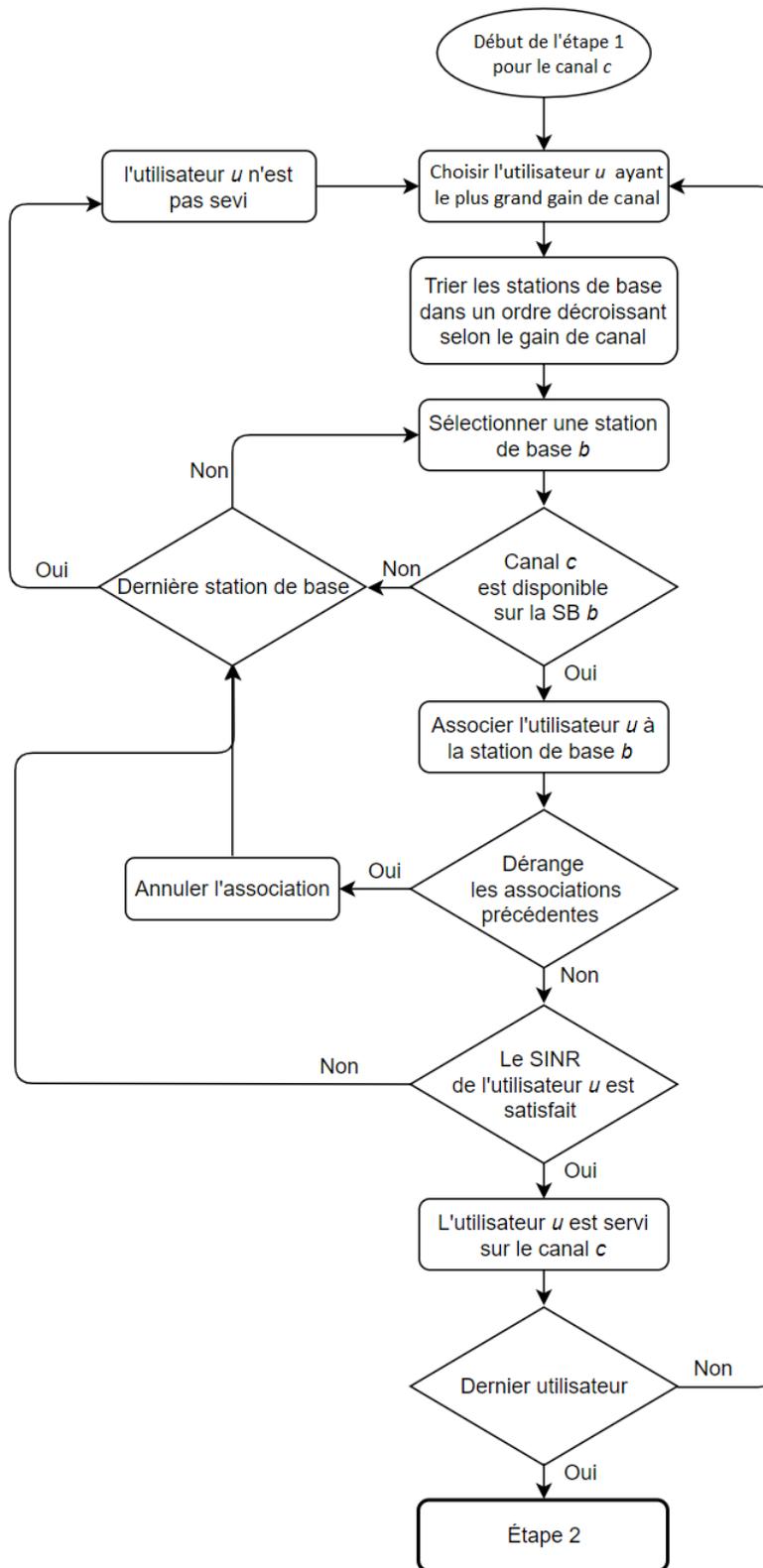


FIGURE 5.1 Première étape de l'algorithme

la puissance totale de transmission nécessaire au cluster \mathcal{G}_u pour satisfaire u . Les BSs de \mathcal{G}_u étant déjà triées par ordre décroissant par rapport au gain de canal, en respectant cet ordre, l'algorithme commence par allouer la puissance totale disponible au niveau de la SB, pour le canal c en question, et soustrait cette puissance allouée de la puissance totale nécessaire calculée, arrivé à la dernière BS, il lui assigne le reste la puissance totale nécessaire. Finalement, la matrice des puissances est mise à jour en attribuant, pour chaque BS $b \in \mathcal{B}$ le reste de la puissance disponible au canal suivant. A la fin de l'étape 2 l'algorithme passe au canal suivant. Le déroulement de l'étape 2 de l'algorithme GAPA est présentée dans l'algorithme 1.

Algorithm 1 Algorithme GAPA - Étape 2 : Allocation de puissance

pour Chaque utilisateur u associé à l'étape 1 **faire**

pour $b \in \mathcal{B}$ **faire**

 Calculer la puissance $p_{c,b}$

 Mettre à jour la matrice des puissances P

5.1.3 Complexité de calcul

L'étape 1 procède un utilisateur à la fois, avec une boucle **for** de U itérations. Dans chacune de ces itérations, les BSs sont triées avec une complexité de $\mathcal{O}(B \log(B))$, la sélection des BSs se fait, au plus, B fois. Aussi, dans cette étape, l'algorithme vérifie que l'association courante ne perturbe pas les associations précédentes. Cette vérification se fait avec une boucle **for** qui parcourt l'ensemble des utilisateurs avec une complexité de $\mathcal{O}(U)$. La complexité de calcul au pire cas de l'étape 1 est $\mathcal{O}(U(\mathcal{O}(B \log B) + \mathcal{O}(B(\mathcal{O}(U)))) = \mathcal{O}(BU^2)$. Dans l'étape 2, l'algorithme procède, pour chaque utilisateur associé en phase 1, en calculant la puissance nécessaire pour chaque BS. La complexité de calcul de cette étape est $\mathcal{O}(BU)$. L'algorithme procède canal par ca-

nal avec la boucle **for**. La complexité de calcul, au pire cas, de cette boucle est $\mathcal{O}(C)$ et elle imbrique les étapes 1 et 2. Par conséquent, la complexité globale au pire cas de l'algorithme GAPA est :

$$\mathcal{O}(C(\mathcal{O}(BU^2) + \mathcal{O}(BU))) = \mathcal{O}(CBU^2).$$

5.2 Algorithme d'optimisation par essais de particules

Cette section présente un algorithme d'optimisation par essaim de particules (en anglais *Particle Swarm Optimization*, PSO) pour résoudre efficacement le problème étudié. PSO est une métaheuristique d'optimisation basée sur la collaboration d'un groupe d'individus peu intelligents. Ces individus peuvent avoir une organisation globale complexe utilisant des règles de déplacement très simples dans l'espace de recherche. Au début de l'algorithme, les particules sont positionnées dans l'espace de recherche. A chaque itération k , les particules se déplacent selon trois composantes : la vitesse courante v^k ; la meilleure position de la particule $pbest^k$ et la meilleure position globale de l'essaim $gbest^k$.

Toutefois, le problème étudié dans ce mémoire est un problème complexe à plusieurs contraintes avec des variables binaires, l'application directe du PSO n'est donc pas adéquate. Par conséquent, ce chapitre propose une solution PSO binaire adaptée aux problèmes avec contraintes.

PSO a été introduite pour la première fois dans (Kennedy et Eberhart, 1995) et a acquis une grande popularité grâce à son efficacité et sa simplicité de mise en œuvre. De ce fait, PSO a été utilisé pour résoudre efficacement divers problèmes d'optimi-

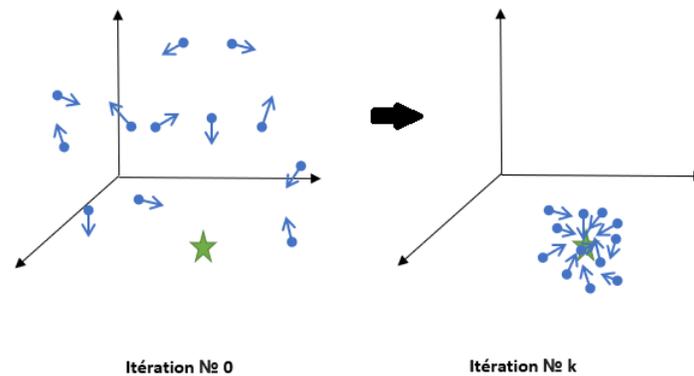


FIGURE 5.2 Optimisation par essaims de particules

sation (Raitoharju *et al.*, 2017), (Qolomany *et al.*, 2017), (Yimin *et al.*, 2018) et (Wang, 2020). Aussi, des algorithmes de PSO modifiés en était proposés dans la littérature afin de traiter les problèmes d’optimisation avec des contraintes linéaires et non-linéaires. Cependant, les algorithmes qui traitent des problèmes d’optimisation avec contraintes sont confrontés au problème de ne pas être en mesure de garantir des solutions réalisables. (Kohler *et al.*, 2019) proposent un algorithme, appelé PSO+, capable de résoudre des problèmes avec des contraintes non linéaires en utilisant un opérateur de réparation de faisabilité et deux essaims de particules afin de toujours assurer le respect des contraintes dans un des essaims. Toujours dans le cadre des problèmes d’optimisation avec contraintes, (Atoui *et al.*, 2018) proposent un algorithme PSO adapté, qui utilise une fonction de réparation des particules qui ne respectent pas les contraintes et de ce fait, s’assurer que toutes les particules sont faisables, c.-à-d. respectent pleinement chacune des contraintes. Dans le but de traiter un problème d’optimisation de valeurs binaires (Tasgetiren et Liang, 2004) propose un PSO binaire qui modélise les particules par des vecteurs ou matrices de valeurs binaires et utilisent une fonction sigmoïde pour les mises à jour des positions.

5.2.1 Représentation de la solution

Les éléments de base de l'algorithme PSO proposé, à valeurs binaires et adapté aux problèmes avec des contraintes, sont résumés comme suit :

Données en entrée : un essaim de L particules. Chaque particule est définie par sa position π_l qui est représentée par une matrice binaire tridimensionnelle $U \times C \times B$, dont les éléments sont donnés par :

$$\pi_l(u, c, b) = \begin{cases} 1, & \text{si l'utilisateur } u \text{ est servi sur le canal } c \text{ de la BS } b, \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (5.1)$$

Fonction d'utilité (en anglais fitness function) : pour mesurer la qualité de l'association, $f(\pi_l)$ évalue le nombre d'utilisateurs associés par la particule l .

Données en sortie : g_{best} qui est une matrice binaire de taille $U \times C \times B$ correspondant à la particule qui maximise la fonction d'utilité, c.-à-d. $g_{best} = \operatorname{argmax}_{\pi_l} f(\pi_l)$

Critère de terminaison : l'algorithme se termine lorsqu'un nombre maximum d'itérations est effectué ou que tous les utilisateurs sont associés.

Vitesse des particules : chaque particule l à l'itération k se déplace à la vitesse v_l^k dans l'espace de recherche. Cette vitesse est donnée par une matrice tridimensionnelle de taille $U \times C \times B$, où chaque élément de la matrice est limité à $[v_{min}, v_{max}]$. Après chaque mouvement, la vitesse est mise à jour comme suit :

$$\begin{aligned}
v_i^{k+1}(u, c, b) &= \omega^k v_i^k(u, c, b) \\
&+ w_1 r_1 \times (pbest_i^k(u, c, b) - \pi_i^k(u, c, b)) \\
&+ w_2 r_2 \times (gbest^k(u, c, b) - \pi_i^k(u, c, b))
\end{aligned} \tag{5.2}$$

où $pbest_i^k(u, c, b)$ est la meilleure position enregistrée de la particule jusqu'à l'itération k , $gbest^k(u, c, b)$ est la meilleure position globale, r_1 et r_2 sont des nombres aléatoires uniformes dans $[0, 1]$, w_1 et w_2 sont des coefficients de pondération pour la meilleure position de la particule et la meilleure position globale (également appelés paramètres social et cognitif) et enfin, ω^k est un facteur d'inertie qui modélise la tendance de la particule à continuer dans la même direction précédente, où $\omega^k = \frac{1+\beta}{\beta+k}$, avec β une variable aléatoire choisie selon une distribution uniforme. En effet, ce facteur diminue à mesure que le nombre d'itérations augmente, afin de permettre aux particules d'explorer davantage l'espace de recherche au début et exploiter par la suite les résultats de leur recherche.

Nous utilisons l'application linéaire par morceaux pour forcer les valeurs de vitesse à se situer dans l'intervalle de valeurs autorisées,

$$v_i^{k+1}(u, c, b) = \begin{cases} v_{max}, & \text{si } v_i^{k+1}(u, c, b) > v_{max} \\ v_{min}, & \text{si } v_i^{k+1}(u, c, b) < v_{min} \\ v_i^{k+1}(u, c, b), & \text{sinon.} \end{cases} \tag{5.3}$$

Déplacement des particules : Puisque les particules ont des valeurs binaires, nous utilisons la fonction sigmoïde (Tasgetiren et Liang, 2004) qui est donnée par

$sig(y) = \frac{1}{1+e^{-y}}$ pour forcer les valeurs réelles obtenues, après déplacement d'une particule donnée, à se situer entre 0 et 1. Chaque élément $\pi_l^{k+1}(u, c, b)$ est calculé comme suit, où $random[0, 1]$ est une valeur aléatoire entre 0 et 1 :

$$\pi_l^{k+1}(u, c, b) = \begin{cases} 1, & \text{si } sig(h(v_l^{k+1}(u, c, b))) < random[0, 1] \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (5.4)$$

Conditions : Les positions des particules sont mises à jour en fonction de la vitesse calculée seulement si (4.10d)–(4.10g) sont respectées. Sinon, tous les éléments de la particule sont forcés à être égaux à zéro.

Il est à noter que les contraintes du SINR et d'allocation de puissance ne sont pas prises en compte lors de la mise à jour des positions des particules et donc les associations obtenues peuvent ne pas respecter les contraintes (4.10b). Ainsi, une fonction de réparation (Atoui *et al.*, 2018) est utilisée pour tester la condition SINR. Cette fonction vérifie le SINR de chaque particule, dans le cas où cette condition n'est pas respectée, la particule est réparée en mettant à zéro les positions qui ne respectent pas la condition afin de trouver une solution réalisable. Par la suite, la puissance nécessaire est allouée en utilisant la phase 2 de GAPA.

5.2.2 Initialisation

Trois approches sont testées dans ce travail :

- *RandomInit* : l'algorithme génère L particules aléatoires, selon la distribution uniforme discrète, en respectant les contraintes (4.10c)–(4.10g).
- *HeuristicInit* : l'algorithme génère $L - 1$ particules aléatoires, selon la dis-

tribution uniforme discrète, en respectant les contraintes (4.10c)–(4.10g) et ajoute un $L^{\text{ème}}$ particule correspondant à la solution GAPA.

- *HeuristicModInit* : il est similaire à *HeuristicInit*, mais remplace un nombre donné de particules, noté E , par une solution proche de GAPA, c.-à-d. en forçant des éléments choisis aléatoirement à 1.

5.2.3 Algorithme et complexité de calcul

Le pseudo-code de l'algorithme d'optimisation par essaims de particules proposé, est représenté par algorithme 2. Dans la phase d'initialisation, l'algorithme génère L particules et L vitesses en $\mathcal{O}(UCBL)$. Ensuite, pour chaque itération, il met à jour les positions des particules dans $\mathcal{O}(UCB)$, vérifie les conditions en $\mathcal{O}(UC^2B^2)$ et appelle la fonction de réparation dont la complexité f_{repair} dépend de la stratégie employée. La complexité de calcul totale pour l'algorithme PSO est donc égale à $\mathcal{O}((UC^2B^2 + \mathcal{O}(f_{repair}))KL)$.

Algorithm 2 Algorithme PSO

Input : un essaim de L particules

Output : $gbest$ = la meilleure particule

- 1: Initialiser les positions des particules
- 2: Initialiser les vitesses des particules de manière aléatoire
- 3: Initialiser $pbest_i^0$ pour toutes les particules avec

$$pbest_i^0(u, c, b) = \pi_i^0(u, c, b)$$

- 4: Évaluer chaque particule avec $f(\pi_i^0)$
- 5: Initialiser $gbest^0$ pour toutes les particules avec

$$f(gbest^0(u, c, b)) = \max_i \{f(pbest_i^0(u, c, b))\}$$

- 6: $k \leftarrow 1$
 - 7: **tant que** (*Les critères d'arrêt ne sont pas atteints*) **faire**
 - 8: Mettre à jour la vitesse en fonction de (5.2)
 - 9: Mettre à jour les positions des particules en fonction de (5.3) et (5.4)
 - 10: S'assurer que les contraintes (4.10c)–(4.10g) sont respectées
 - 11: Réparer les positions si nécessaire
 - 12: Mesurer la fonction d'utilité
 - 13: Mettre à jour $pbest$ et $gbest$
 - 14: $k \leftarrow k + 1$
-

5.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les détails de nos deux approches proposées. La première solution est un algorithme glouton qui procède en deux étapes, la première consiste à associer les utilisateurs et la deuxième étape effectue l'allocation de puissance. La deuxième solution est un algorithme d'optimisation par essaims de particules adapté à notre problème. Dans le chapitre suivant, nous allons évaluer les performances des deux solutions comparées à des benchmarks et discuter des résultats obtenus.

CHAPITRE VI

ÉVALUATION DES PERFORMANCES ET RÉSULTATS

Ce chapitre présente plusieurs résultats de simulation des deux algorithmes proposés, GAPA et PSO. Il présente l'efficacité des deux algorithmes en comparant leur performance par rapport à d'autres algorithmes d'association des utilisateurs et d'allocation des ressources.

6.1 Benchmarks et paramètres de simulation

Afin d'illustrer les performances des deux algorithmes proposés GAPA et PSO, ces derniers sont comparés à trois benchmarks, à savoir l'algorithme d'association un-à-un (en anglais *One-to-one association* 1to1-A), l'algorithme d'association aléatoire (en anglais *Random Association*, RA) et la solution optimale (OPT).

6.1.1 Algorithme d'association un-à-un

L'algorithme 1to1-A suppose qu'un utilisateur peut être associé à au plus une seule BS et ne considère pas le clustering des BSs. L'algorithme traite un canal à la fois. Pour chaque canal il parcourt l'ensemble des utilisateurs avec une boucle **for** de

U itérations. En commençant par l'utilisateur ayant le plus grand gain de canal, pour chaque utilisateur u , les stations de base sont triées avec une complexité de $\mathcal{O}(B \log B)$. L'utilisateur s'associe avec la BS ayant le meilleur gain de canal, si cette dernière est disponible, puis vérifie si cette association ne dérange pas les autres utilisateurs déjà associés, avec une complexité de $\mathcal{O}(U)$. Dans le cas contraire, il passe à la BS suivante, au pire cas ce processus est répété B fois. La puissance de transmission nécessaire est calculée, à partir de la formule 4.9, et allouée directement après chaque association. La complexité de calcul de cet algorithme est $\mathcal{O}(CBU^2)$.

6.1.2 Algorithme d'association aléatoire

L'algorithme d'association aléatoire privilégie la réduction de la complexité des calculs au coût d'une mauvaise performance. Par conséquence, cet algorithme ne considère aucun ordre de priorité, ni pour les utilisateur, ni et les BSs. Il traite les associations UE-BS d'une manière itérative, indépendamment du gain de canal, des ressources disponibles et de l'impact des associations sur le reste du réseau. L'algorithme procède un canal à la fois. Pour chaque canal il parcourt l'ensemble des utilisateurs en U itérations. Chaque utilisateur s'associe avec autant de BS que nécessaire. Au pire cas, il parcourt l'ensemble des BSs avec une complexité de $\mathcal{O}(B)$. L'allocation de puissance se fait de la même manière que dans l'étape 2 de GAPA. La complexité de calcul de l'algorithme RA est $\mathcal{O}(CBU)$.

6.1.3 Solution optimale

Le problème étudié étant \mathcal{NP} -difficile, il est impossible de développer un algorithme capable de le résoudre d'une manière optimale dans un temps raisonnable, sauf si

$\mathcal{P} = \mathcal{NP}$. De ce fait, les performances de la solution optimale sont obtenues à l'aide de APOPT (en anglais *Advanced Process OPTimizer*), un solveur du package GEKKO sous le langage de programmation Python.

APOPT est un solveur de programmation quadratique séquentielle (en anglais *Sequential Quadratic Programming*, SQP) à ensemble actif basé sur l'utilisation de l'algorithme par séparation et évaluation (en anglais Branch and Bound). APOPT utilise une méthode de démarrage à chaud pour accélérer les solutions successives de programmation non linéaire (en anglais *Nonlinear Programming*, NLP). Il permet notamment de résoudre des problèmes d'optimisation à grande échelle, notamment les problèmes de programmation non linéaires en variables entières mixtes (MINLP) (apopt.com, sd).

6.2 Paramètres de simulation

6.2.1 Paramètres généraux

Pour les paramètres de notre simulation, nous considérons que U utilisateurs sont uniformément distribués dans un espace carré de taille A . Les BSs sont distribuées en considérant que la zone de simulation est organisée en hexagones et que chaque BS est placé au centre d'un hexagone. Par défaut, $C = 4$ sauf s'il est spécifié autrement. Les paramètres de simulation restants sont présentés dans le tableau 6.1.

6.2.2 Impact de la méthode d'initialisation de l'algorithme PSO

Cette sous-section étudie l'impact de la méthode d'initialisation des particules sur le nombre d'itérations nécessaire pour que l'algorithme converge à la meilleure

TABLEAU 6.1 Paramètres de simulations par défaut.

| Notations | Paramètre | Valeur |
|---------------------------|--|-----------------------|
| A | Zone de simulation | 100m \times 100m |
| γ_{Th} | SINR seuil | 10 dB |
| P_T | Puissance de transmission par station de base | 30dBm |
| W | Bande passante par canal | 200MHz |
| | Densité spectrale de puissance de bruit | -174dBm/Hz |
| R | Longueur maximale de la liaison LOS | 10m |
| (m_L, m_{NL}) | Paramètres Nakagami LOS et NLOS | (3, 2) |
| (α_L, α_{NL}) | Exposant de l'atténuation du au trajet LOS et NLOS | (2.2,4) |
| (G_M, G_S) | Paramètres d'antenne BS | (20 dB, 0 dB) |
| θ_T | Largeur du faisceau | 45° |
| L | Nombre de particules dans le swarm (PSO) | $2U$ |
| K | Nombre d'itérations (PSO) | $U \times C \times B$ |
| v_{max}, v_{min} | Vitesse de déplacement maximale, minimale (PSO) | 4, -4 |

TABLEAU 6.2 Paramètres de simulations pour l'évaluation de PSO.

| Notations | Paramètre | Valeur |
|-----------|---|--------|
| L | Nombre de particules dans le swarm | 20 |
| E | Nombre de particules modifiées dans <i>HeuristicModInit</i> | 3 |
| U | Nombre d'utilisateurs | 10 |
| B | Nombre de stations de base | 3 |
| C | Nombre de canaux par station de base | 4 |

solution possible. Pour ce faire, on utilise les trois approches d'initialisation présentées dans la section (5.2.2) : *RandomInit* ; *HeuristicInit* ; et *HeuristicModInit*. Les paramètres d'évaluation utilisés sont décrits dans le tableau 6.2, Nous avons choisi des petites valeurs pour U , C et B à cause de la complexité très élevée de OPT.

Les performances de l'algorithme sont considérées sur 20 topologies différentes (distances entres UEs et BBs, gains des canaux) et représentées par la moyenne des résultats dans la figure 6.1.

La figure 6.1 montre que l'algorithme PSO initialisé avec l'approche *HeuristicInit*, où l'une des particules est initialisée par la solution de l'algorithme heuristique proposé GAPA, converge vers la solution optimale après seulement 7 itérations. Aussi, l'algorithme initialisé par *HeuristicModInit* converge assez rapidement, après 73 itérations. Cependant, quand les particules sont initialisées aléatoirement, l'algorithme prend plus de temps mais finit par converger vers l'optimal après 94. En effet, cela s'explique par le fait que lorsqu'une particule est initialisée par GAPA, l'algorithme commence avec une solution (*gbest*) qui est déjà assez proche de l'optimal. C'est une solution à double tranchant, vu qu'elle peut nous mener vers un optimal local,

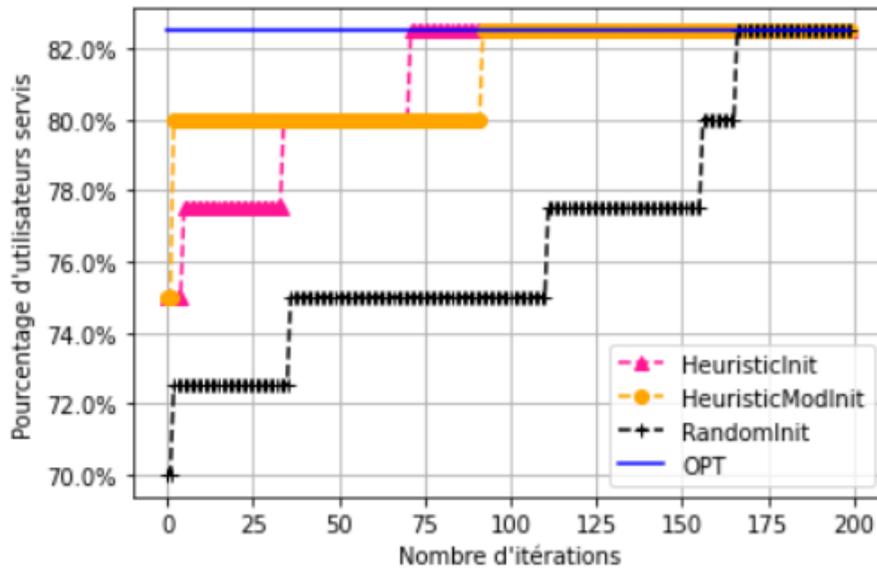


FIGURE 6.1 Nombre moyen d'itérations nécessaire à l'algorithme PSO pour converger soit celui obtenu par GAPA. Toutefois, la diversification que peut introduire notre solution PSO permet de remédier à ce problème.

Pour le reste des simulations l'algorithme PSO est initialisé selon l'approche *HeuristicInit* car elle converge plus rapidement que *RandomInit* et *HeuristicModInit*.

6.3 Impact du nombre de stations de base sur le nombre des utilisateurs satisfaits

La figure 6.2 montre le pourcentage d'utilisateur associés par rapport au nombre de BSs avec $U = 10$. Nous remarquons que les performances de PSO et GAPA sont très proches de la solution optimale avec un léger avantage pour PSO. Un écart de performance de 1.2%, dans le pire des cas, est observé pour PSO, tandis que l'écart est de 3.8% pour GAPA. Cela s'explique par la complexité réduite de GAPA par

rapport à l'algorithme PSO. De plus ce dernier profite pleinement de la solution de GAPA en l'améliorant pour atteindre des performances plus intéressantes. On observe également que les performances de l'algorithme RA seaturent rapidement et ne dépassent pas les 70% de la solution optimale, soit un écart de plus de 30% par rapport à cette dernière, et ce malgré l'augmentation du nombre de BSs. Cela s'explique par le choix aléatoire des UEs et des BSs à associer. En effet, aucun ordre de priorité n'est considéré et cela pénalise les derniers utilisateurs ce qui limite ainsi les performances de cette approche.

La complexité de calcul élevée d'OPT nous empêche de considérer une valeur de U supérieure à 10. Par conséquent, afin d'illustrer les performances des algorithmes proposés pour une plus grande valeur de U , la figure 6.3 montre le pourcentage d'utilisateurs associés par rapport au nombre de BSs avec un nombre total de 20 utilisateurs dans le réseau pour un SINR seuil de $13dB$. afin de montrer l'impact du nombre de canaux par BS dans cette figure, deux expériences sont illustrées, la première avec 3 canaux par BS et la deuxième avec 5 canaux par BS.

À partir des deux figures 6.2 et 6.3, Nous observons également que les deux algorithmes proposés surpassent significativement les deux benchmarks à complexité réduite, à savoir 1to1-A et RA. Par conséquent, nous concluons qu'un algorithme de clustering bien conçu garantit de bonnes performances avec une augmentation limitée en complexité de calcul.

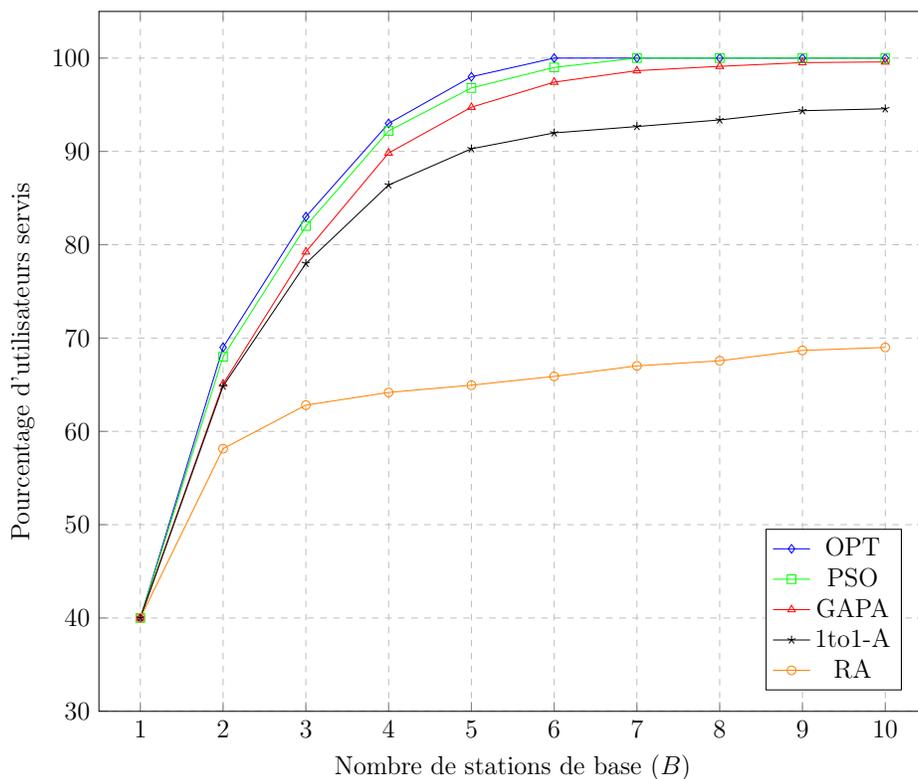


FIGURE 6.2 Impact du nombre de BSs sur le nombre des UEs satisfaits ($U = 10$)

6.4 Impact du nombre d'utilisateur total sur le nombre des utilisateurs satisfaits

La figure 6.4 trace l'évolution du nombre d'utilisateurs associés en fonction du nombre total d'UEs, avec 4 BSs dans le réseau. Là encore, on observe que GAPA performe très bien même en augmentant le nombre d'utilisateurs dans le réseau, avec un écart de performance dans le pire des cas de 3,3% par rapport à OPT. D'autre part, les performances de PSO sont très proches de l'optimal et améliorent clairement la solution GAPA quand U devient plus grand. Comme dans les figures 6.2 et 6.3, les deux algorithmes proposés surpassent significativement 1to1-A et RA.

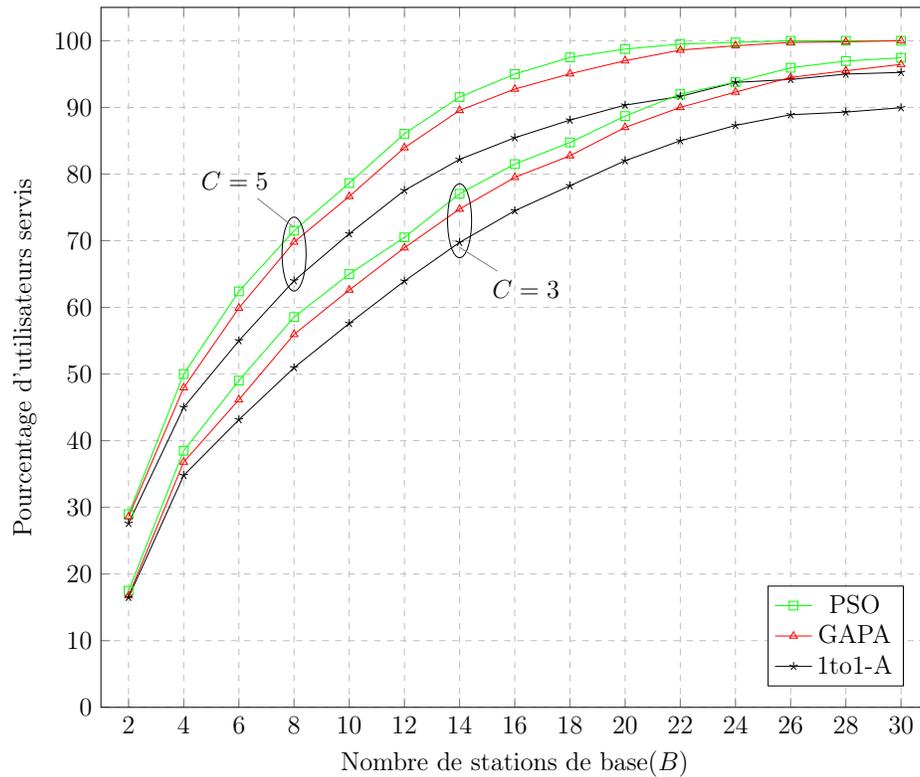


FIGURE 6.3 Impact du nombre de BSs sur le nombre des UEs satisfaits ($U = 20$).

6.5 Impact du SINR seuil

La figure 6.5 trace le pourcentage d'UE associées en faisant varier le SINR seuil entre 1dB et 16dB . Nous définissons les autres paramètres comme suit : $U = 10$, $B = 4$ et $C = 3$ ou 5. Lorsque le SINR seuil augmente, le nombre d'utilisateurs associés diminue en raison des ressources limitées. Cependant, même pour une valeur de SINR seuil élevé, les performances de GAPA et PSO restent proches de l'optimale et les deux profitent d'un clustering de BSs adéquat et une allocation de puissance adaptée. Ils surpassent donc clairement 1to1-A surtout pour les grands valeurs du

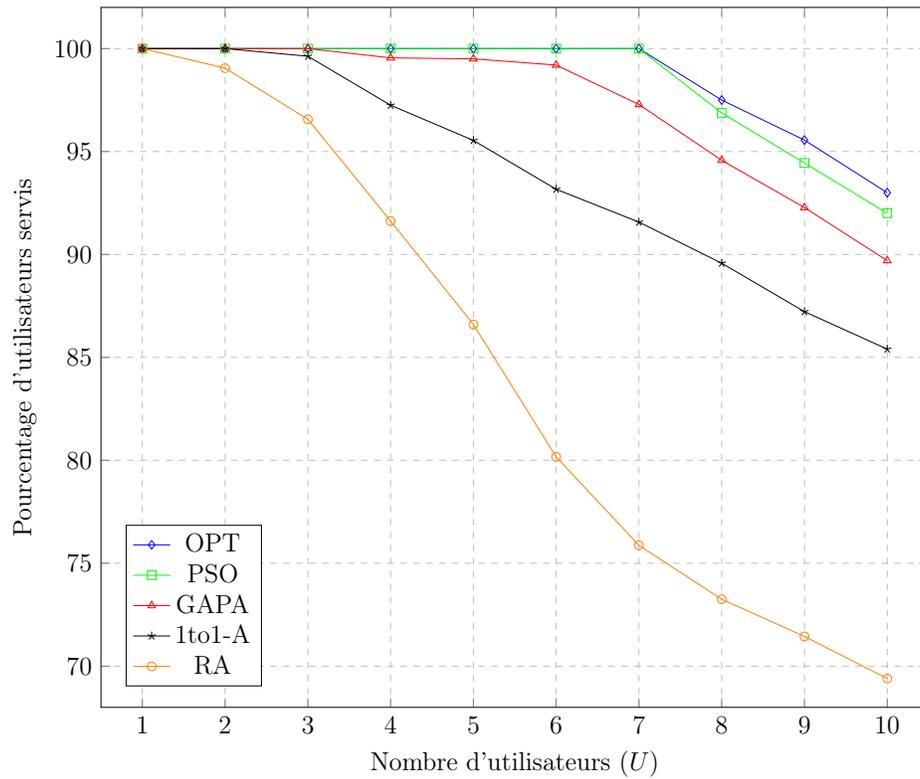


FIGURE 6.4 Impact du nombre d'utilisateur total sur le nombre des utilisateurs satisfaits ($B = 4$)

SINR seuil.

6.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évalué les résultats des deux solutions proposées comparées à des benchmarks et nous avons démontré que les performances de nos solutions s'approchent de l'optimal et surpassent significativement les autres algorithmes.

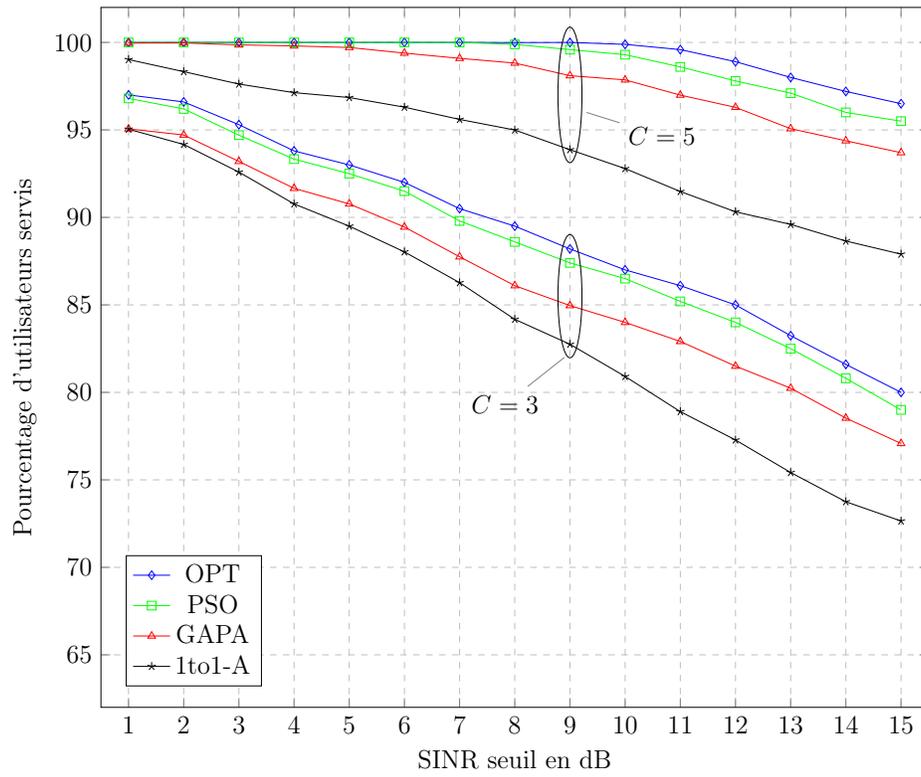


FIGURE 6.5 Impact du SINR seuil ($U = 10$) et ($B = 4$).

CONCLUSION

L'architecture orientée utilisateur, qui se base sur la coopération des stations de base, est une technologie prometteuse pour un déploiement dense des stations de bases dans les réseaux à ondes millimétriques. Dans un tel système, l'utilisateur peut être servi par un ensemble de SBs coopérantes, ce qui réduit les interférences reçues des stations voisines. Dans ce projet, nous avons étudié l'association utilisateur-station de base et le problème d'allocation de canal et d'allocation de puissance dans un réseau dense, orienté utilisateur et qui utilise des communications à ondes millimétriques. L'approche proposée vise à maximiser le nombre des utilisateurs associés sous contraintes de qualité de service, définie par un SINR seuil. Le problème étudié a d'abord été formulé sous la forme d'un programme non linéaire aux nombres entier partiel et a été démontré être \mathcal{NP} -difficile. Pour résoudre ce problème, deux approches basées sur le clustering, l'association d'utilisateurs et l'allocation de puissance ont été proposées en considérant le compromis entre performance et complexité de calcul. La première approche est appelée GAPA pour *Greedy Association and Power Allocation*. C'est une approche heuristique qui se déroule en deux étapes : la première étape construit des clusters en associant l'utilisateur avec autant de stations de base que nécessaire pour satisfaire les contraintes du SINR, tandis que la deuxième phase effectue une allocation de puissance indépendante pour chaque association obtenue. La deuxième approche est un algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO). Étant donné que les variables d'optimisation modélisant l'association des utilisateurs et l'attribution des canaux sont des variables binaires, nous avons développé une solu-

tion PSO binaire où les particules sont représentées par des matrices binaires à trois dimensions. L'algorithme proposé assure la faisabilité des particules à toutes les itérations via un mécanisme de réparation. La complexité de calcul des deux algorithmes proposés est calculée et s'avère bien inférieur à celle de l'algorithme optimal. Les résultats numériques ont montré que nos algorithmes proposés résolvent différemment le compromis entre la performance et la complexité de calcul, mais ils atteignent tous les deux un niveau proche des performances optimales, avec une complexité de calcul très réduite.

Dans nos travaux futurs, nous prévoyons de considérer une approche distribuée pour l'association des utilisateurs et l'allocation des ressources. Aussi, nous nous intéresserons à l'apprentissage automatique et proposerons une approche basée sur l'apprentissage par renforcement.

ANNEXE A

Dans cette annexe, nous présentons le pseudo-code de l'algorithme GAPA.

Algorithm 3 Algorithme GAPA

Données d'entrée :

$U, C, B, \mathbf{P} = [p_{b,c}], \mathbf{t}, \gamma_{Th}$.

$\mathbf{X} \leftarrow 0, \mathbf{Y} \leftarrow 0$.

pour $c \in C$ **faire**

Étape 1 : Association des utilisateurs

pour $u \in U$ **faire**

 Trier \mathbf{t} dans un ordre décroissant selon le gain du canal c pour u

$i \leftarrow 0$

faire

 Sélectionner b de \mathbf{t}

si $\sum_{u=1}^U x_{u,c,b} < 1$ **alors**

$x_{u,c,b} \leftarrow 1$

pour $f \in U$ avec $f \neq u$ **faire**

si $(y_{f,c} = 1) \wedge (\gamma_{f,c} < \gamma_{Th})$ **alors**

$x_{u,c,b} \leftarrow 0$

tant que $(\gamma_{u,c} \geq \gamma_{Th}) \vee (i = B)$

si $\gamma_{u,c} \geq \gamma_{Th}$ **alors**

$y_{u,c} = 1$

sinon

pour $b' \in B$ **faire**

$x_{u,c,b'} \leftarrow 0$

Étape 2 : Allocation de puissance

pour Chaque utilisateur u associé à l'étape 1 **faire**

pour $b \in B$ **faire**

 Calculer la puissance $p_{c,b}$

 Mettre à jour la matrice des puissances P

RÉFÉRENCES

- Andrews, J. G., Bai, T., Kulkarni, M. N., Alkhateeb, A., Gupta, A. K. et Heath, R. W. (2017). Modeling and analyzing millimeter wave cellular systems. *IEEE Transactions on Communications*, 65(1), 403–430. <http://dx.doi.org/10.1109/TCOMM.2016.2618794>
- Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., Soong, A. C. K. et Zhang, J. C. (2014). What will 5g be? *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 32(6), 1065–1082. <http://dx.doi.org/10.1109/JSAC.2014.2328098>
- apopt.com. [s.d.]. *APOPT Solutions*. Récupéré de <https://www.apopt.com/>
- Arora, S. et Barak, B. (2009). *Computational complexity : a modern approach*. Cambridge University Press.
- Atoui, W. S., Ajib, W. et Boukadoum, M. (2018). Offline and Online Scheduling Algorithms for Energy Harvesting RSUs in VANETs. 67(7), 6370–6382. <http://dx.doi.org/10.1109/TVT.2018.2797002>
- Bai, T., Alkhateeb, A. et Heath, R. W. (2014). Coverage and capacity of millimeter-wave cellular networks. *IEEE Communications Magazine*, 52(9), 70–77. <http://dx.doi.org/10.1109/MCOM.2014.6894455>
- Boldi, M., Tölli, A., Olsson, M., Hardouin, E., Svensson, T., Boccardi, F., Thiele, L. et Jungnickel, V. (2011). *Coordinated MultiPoint (CoMP) Systems*, (p. 121–155).

- Chataut, R. et Akl, R. (2020). Massive mimo systems for 5g and beyond networks—overview, recent trends, challenges, and future research direction. *Sensors*, 20(10). Récupéré de <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/10/2753>
- Chen, S., Qin, F., Hu, B., Li, X. et Chen, Z. (2016a). User-centric ultra-dense networks for 5g : challenges, methodologies, and directions. *IEEE Wireless Communications*, 23(2), 78–85. <http://dx.doi.org/10.1109/MWC.2016.7462488>
- Chen, Z., Hou, X. et Yang, C. (2016b). Training resource allocation for user-centric base station cooperation networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(4), 2729–2735. <http://dx.doi.org/10.1109/TVT.2015.2420114>
- Chowdhury, M. Z., Shahjalal, M., Ahmed, S. et Jang, Y. M. (2020). 6g wireless communication systems : Applications, requirements, technologies, challenges, and research directions. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 1, 957–975. <http://dx.doi.org/10.1109/OJCOMS.2020.3010270>
- Dahlman, E., Parkvall, S. et Skold, J. (2020). *5G NR : The Next Generation Wireless Access Technology*. Elsevier Science. Récupéré de <https://books.google.ca/books?id=PZH9DwAAQBAJ>
- Friis, H. (1946). A note on a simple transmission formula. *Proceedings of the IRE*, 34(5), 254–256. <http://dx.doi.org/10.1109/JRPROC.1946.234568>
- Gulia, S., Ahmad, A., Singh, S. et Gupta, M. D. (2022). Interference management in backhaul constrained 5g hetnets through coordinated multipoint. *Computers and Electrical Engineering*, 100, 107982. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.107982>. Récupéré de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045790622002476>

- Humadi, K., Trigui, I., Zhu, W.-P. et Ajib, W. (2021). Dynamic base station clustering in user-centric mmwave networks : Performance analysis and optimization. *IEEE Transactions on Communications*, 69(7), 4847–4861. <http://dx.doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3070357>
- Jung Kim, S. et Gon Kim, J. (2020). Resource allocation in cluster based ultra dense network. Dans *2020 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 1128–1131. <http://dx.doi.org/10.1109/ICTC49870.2020.9289491>
- Kennedy, J. et Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. Dans *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, volume 4, 1942–1948 vol.4. <http://dx.doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- Kim, E.-H., Lee, J.-W., Kim, Y.-M. et Hong, E.-K. (2019). Analysis of the optimal number of clusters in udn environment. Dans *2019 IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS)*, 1–4. <http://dx.doi.org/10.1109/VTS-APWCS.2019.8851643>
- Kohler, M., Vellasco, M. M. et Tanscheit, R. (2019). Pso+ : A new particle swarm optimization algorithm for constrained problems. *Applied Soft Computing*, 85, 105865. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105865>. Récupéré de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494619306465>
- Kutty, S. et Sen, D. (2016). Beamforming for millimeter wave communications : An inclusive survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 18(2), 949–973.
- Lin, Y., Zhang, R., Li, C., Yang, L. et Hanzo, L. (2018). Graph-based joint user-

- centric overlapped clustering and resource allocation in ultradense networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(5), 4440–4453. <http://dx.doi.org/10.1109/TVT.2017.2787802>
- Ling, L., Zhou, Y., Vasilakos, A., Tian, L. et Shi, J. (2019). Time-domain icic and optimized designs for 5g and beyond : a survey. *Science China Information Sciences*, 62. <http://dx.doi.org/10.1007/s11432-017-9477-4>
- Liu, L., Garcia, V., Tian, L., Pan, Z. et Shi, J. (2015). Joint clustering and inter-cell resource allocation for comp in ultra dense cellular networks. Dans *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2560–2564. <http://dx.doi.org/10.1109/ICC.2015.7248710>
- Liu, R., Chen, Q., Yu, G. et Li, G. Y. (2019). Joint user association and resource allocation for multi-band millimeter-wave heterogeneous networks. *IEEE Transactions on Communications*, 67(12), 8502–8516. <http://dx.doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2943158>
- Liu, Y., Fang, X., Zhou, P. et Cheng, K. (2017). Coalition game for user association and bandwidth allocation in ultra-dense mmwave networks. Dans *2017 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, 1–5. <http://dx.doi.org/10.1109/ICCCChina.2017.8330377>
- Luo, Y. et Hua, C. (2016). Resource allocation and user-centric clustering in ultradense networks with wireless backhaul. Dans *2016 8th International Conference on Wireless Communications Signal Processing (WCSP)*, 1–5. <http://dx.doi.org/10.1109/WCSP.2016.7752602>
- López-Pérez, D., Ding, M., Claussen, H. et Jafari, A. H. (2015). Towards 1 gbps/ue

- in cellular systems : Understanding ultra-dense small cell deployments. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 17(4), 2078–2101. <http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2015.2439636>
- Maamari, D., Devroye, N. et Tuninetti, D. (2016). Coverage in mmwave cellular networks with base station co-operation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15(4), 2981–2994. <http://dx.doi.org/10.1109/TWC.2016.2514347>
- Mietzner, J., Schober, R., Lampe, L., Gerstacker, W. H. et Hoehner, P. A. (2009). Multiple-antenna techniques for wireless communications - a comprehensive literature survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 11(2), 87–105. <http://dx.doi.org/10.1109/SURV.2009.090207>
- Mlika, Z., Goonewardena, M., Ajib, W. et Elbiaze, H. (2017). User-base-station association in hetsnets : Complexity and efficient algorithms. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(2), 1484–1495. <http://dx.doi.org/10.1109/TVT.2016.2558501>
- Nigam, G., Minero, P. et Haenggi, M. (2014). Coordinated multipoint joint transmission in heterogeneous networks. *IEEE Transactions on Communications*, 62(11), 4134–4146. <http://dx.doi.org/10.1109/TCOMM.2014.2363660>
- Nordrum, A. et Clark, K. (2017a). 5g bytes : Full duplex explained. Récupéré de <https://spectrum.ieee.org/5g-bytes-full-duplex-explained>
- Nordrum, A. et Clark, K. (2017b). 5g bytes : Massive mimo explained. Récupéré de <https://spectrum.ieee.org/5g-bytes-massive-mimo-explained>
- Nordrum, A. et Clark, K. (2017c). 5g bytes : Millimeter waves explained. Récupéré de <https://spectrum.ieee.org/5g-bytes-millimeter-waves-explained>

- Nordrum, A. et Clark, K. (2017d). 5g bytes : Small cells explained. Récupéré de <https://spectrum.ieee.org/5g-bytes-full-duplex-explained>
- Pan, C., Liu, R. et Yu, G. (2021). Joint user association and resource allocation for mmwave communication : A neural network approach. *Journal of Communications and Information Networks*, 6(2), 125–133. <http://dx.doi.org/10.23919/JCIN.2021.9475122>
- Qolomany, B., Maabreh, M., Al-Fuqaha, A., Gupta, A. et Benhaddou, D. (2017). Parameters optimization of deep learning models using particle swarm optimization. Dans *2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 1285–1290. <http://dx.doi.org/10.1109/IWCMC.2017.7986470>
- Raitoharju, J., Samiee, K., Kiranyaz, S. et Gabbouj, M. (2017). Particle swarm clustering fitness evaluation with computational centroids. *Swarm and Evolutionary Computation*, 34, 103–118. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.swevo.2017.01.003>. Récupéré de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210650216302218>
- Rangan, S., Rappaport, T. S. et Erkip, E. (2014). Millimeter-wave cellular wireless networks : Potentials and challenges. *Proceedings of the IEEE*, 102(3), 366–385. <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2014.2299397>
- Shi, J., Pan, C., Zhang, W. et Chen, M. (2019). Performance analysis for user-centric dense networks with mmwave. *IEEE Access*, 7, 14537–14548. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2893403>
- Skouroumounis, C., Psomas, C. et Krikidis, I. (2017). Low-complexity base station

- selection scheme in mmwave cellular networks. *IEEE Transactions on Communications*, 65(9), 4049–4064. <http://dx.doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2713810>
- Soleimani, B. et Sabbaghian, M. (2020). Cluster-based resource allocation and user association in mmwave femtocell networks. *IEEE Transactions on Communications*, 68(3), 1746–1759. <http://dx.doi.org/10.1109/TCOMM.2018.2881464>
- Tasgetiren, M. et Liang, Y.-C. (2004). A Binary Particle Swarm Optimization Algorithm for Lot Sizing Problem. *Journal of Economic and Social Research*, 5.
- Tian, X. et Jia, W. (2020). Improved clustering and resource allocation for ultradense networks. *China Communications*, 17(2), 220–231. <http://dx.doi.org/10.23919/JCC.2020.02.017>
- Tomás, J. P. (2021). What is coordinated multipoint and how does it impact 5g manufacturing? Récupéré de <https://enterpriseiotinsights.com/20211022/5g/what-is-coordinated-multipoint-how-does-impact-5g-manufacturing>
- Uwaechia, A. et Mahyuddin, N. (2020). A comprehensive survey on millimeter wave communications for fifth-generation wireless networks : Feasibility and challenges. *IEEE Access*, 8, 62367 – 62414. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2984204>
- Wang, G. (2020). Analysis of site selection optimization of construction industrialization base via improved particle swarm optimization algorithm. Dans *2020 IEEE 3rd International Conference on Information Systems and Computer Aided Education (ICISCAE)*, 609–612. <http://dx.doi.org/10.1109/ICISCAE51034.2020.9236838>

- Wang, H.-M., Huang, K.-W. et Tsiftsis, T. A. (2018). Base station cooperation in millimeter wave cellular networks : Performance enhancement of cell-edge users. *IEEE Transactions on Communications*, 66(11), 5124–5139. <http://dx.doi.org/10.1109/TCOMM.2018.2848910>
- Yahaya, A. S., Javaid, N., Ullah, S., Khalid, R., Javed, M. U., Khan, R. U., Wadud, Z. et Khan, M. A. (2022). A secure and efficient energy trading model using blockchain for a 5g-deployed smart community. *Wireless Communications and Mobile Computing*.
- Yimin, Z., Guojun, S. et Xiaoguang, Y. (2018). Cloud service selection optimization method based on parallel discrete particle swarm optimization. Dans *2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 2103–2107. <http://dx.doi.org/10.1109/CCDC.2018.8407473>
- Zhang, H., Huang, S., Jiang, C., Long, K., Leung, V. C. M. et Poor, H. V. (2017). Energy efficient user association and power allocation in millimeter-wave-based ultra dense networks with energy harvesting base stations. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(9), 1936–1947. <http://dx.doi.org/10.1109/JSAC.2017.2720898>