

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Béjaia
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



MÉMOIRE
En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER

Domaine : Sciences et Technologies, Filière : Télécommunications,
Spécialité : Réseaux et Télécommunications.

Présenté par
ALKAMA Dina
BERKOUK Saida

Thème

Nouvelle approche pour l'optimisation de l'allocation des
ressources dans les réseaux cellulaires

Soutenu le 14/9/2020 devant le jury

Mr BERRAH Smail	Professeur	Univ. de Béjaia	Président
Mr AZNI Mohamed	M.C.A	Univ. de Béjaia	Examineur
Mr KHIREDINE Abdelkrim	Professeur	Univ. de Béjaia	Encadreur
Mlle ZENADJI Syla	Docteur	Univ. de Béjaia	Co-Encadreur

Année universitaire : 2019/2020

Remerciements

Il nous est agréable et important de réserver cette page comme un témoin de reconnaissance à toutes les personnes qui nous ont soutenu et encadré pour la réalisation de ce travail.

Nous remercions Dieu, le tout puissant de nous avoir accordé santé, volonté, courage et patience pour accomplir ce modeste travail, en dépit des contraintes causées par l'épidémie de Covid-19.

Nous tenons à exprimer notre gratitude et nos remerciements au membre de jury Pr S.Berrah et Dr M.Azni pour avoir accepté de participer et d'examiner notre mémoire. Veuillez accepter dans ce travail notre sincère respect et notre profonde reconnaissance.

Nous tenons à remercier nos encadreurs Pr A.Khireddine et Dr S.Zenadji pour nous avoir offert les conditions nécessaires et nous avoir guidé dans l'élaboration de ce travail.

Nous remercions vivement Dr S.Zenadji pour ses remarques objectives ses conseils et critiques sur le plan scientifique, ainsi que sa patience et tout le temps qu'elle nous a consacré afin de mener à bien ce travail.

À tous nos amis, à tous ceux qui nous ont aidés et à tous ceux qui nous aimons.

Merci

Dédicaces

*Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect et la reconnaissance
que nous avons, tout simplement nous dédions ce mémoire :*

*À nos chers parents qui n'ont pas cessés de nous encourager
sans vous rien ne n'aurait été possible,*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement
et le respect qu'on a pour vous ♡.*

À nos chers frères et sœurs que dieu vous procure bonne santé et une longue vie ♡.

*À nos familles et nous amis et à toute personne ayant contribué de près ou de loin
à la réalisation de ce travail ♡.*



Table des matières

Table des figures	iv
Liste des tableaux	vi
Liste des abréviations	vii
Introduction générale	1
1 Bases sur les communications sans fil 5G	3
1.1 Introduction	3
1.2 Bref historique des réseaux sans fil cellulaires	4
1.3 Vers la nouvelle génération des réseaux mobiles : 5G	6
1.3.1 Evolution de performances 4G en 5G	7
1.3.2 Nouvelles applications	8
1.3.3 Le spectre de la 5G : Vers de nouvelles fréquences	8
1.3.4 Exigences et défis de la 5G	9
1.3.4.1 Métriques d'évaluation	9
1.3.5 Les technologies clés	10
1.3.6 Type de modulation	12
1.4 Architecture radio des réseaux mobiles 5G	12
1.4.1 Du RAN au Cloud RAN	12
1.5 Le concept cellulaire	13
1.5.1 Cellule sectorielle	15
1.5.2 Station de base	16
1.5.3 Type d'antennes	16
1.5.4 Notion d'interférence	19
1.5.4.1 Interférence intracellulaire	20
1.5.4.2 Interférence ICIC	20
1.6 Conclusion	21
2 Stratégies d'allocation de ressources dans les réseaux cellulaires	22
2.1 Introduction	22
2.2 Les contraintes d'allocation de ressources	23
2.2.1 Les pertes de propagation (pathloss)	23
2.2.2 L'effet de masque (shadowing)	23
2.2.3 Multipath fading (Fast fading)	24

2.2.4	Effet doppler	25
2.2.5	Mobilité dans les réseaux cellulaires	26
2.2.5.1	Handover intracellulaire	26
2.2.5.2	Handover intercellulaire	26
2.3	Techniques d'allocation de ressources dans les réseaux 5G	27
2.3.1	La technologie OFDMA	27
2.3.2	La technologie NOMA	30
2.3.2.1	De l'OFDMA à NOMA	30
2.3.2.2	Concept de base de NOMA	30
2.3.2.3	Avantages de NOMA	35
2.3.3	Comparaison entre OMA et NOMA	35
2.4	Les ordonnanceurs d'allocation de ressources	36
2.4.1	Principe d'ordonnancement (scheduling)	36
2.4.2	Les algorithmes d'ordonnancement	38
2.4.2.1	Les algorithmes classiques	38
2.4.2.2	Les algorithmes équitables	39
2.4.2.3	Les algorithmes opportunistes	40
2.5	Algorithmes d'optimisation	42
2.5.1	Optimisation par essaim des particules (PSO)	42
2.5.1.1	Présentation du PSO	42
2.5.1.2	Fonctionnement de base du PSO	43
2.6	Conclusion	45
3	Modélisation mathématique et approche adoptée	46
3.1	Introduction	46
3.2	Description du problème d'allocation de ressources	47
3.3	Formulation des objectifs	48
3.3.1	Maximiser le débit	48
3.3.2	Optimiser l'équité	48
3.3.3	Minimiser le délai	48
3.3.4	Maximiser l'efficacité spectrale et énergétique	48
3.4	Modèle global du système	49
3.4.1	Localisation des utilisateurs dans la cellule	49
3.4.2	Modélisation du canal radio	50
3.4.3	Débit de données	52
3.5	Motivations et contexte de notre contribution	53
3.6	Implémentation de NOMA	53
3.7	Approche hybride PSO-PFS	54
3.7.1	Fonction d'optimisation « Fitness »	54
3.7.2	Processus de fonctionnement de l'algorithme PSO-PFS	55
3.8	Calcul des métriques d'évaluation de performances	59
3.9	Conclusion	60

4	Evaluation de performances	61
4.1	Introduction	61
4.2	Logiciel de simulation	62
4.3	Modèle et Hypothèses de simulation	62
4.3.1	Paramètres de simulation	63
4.4	Résultats, analyses et comparaison	64
4.4.1	Impact de la mobilité	64
4.4.2	Canal radio	65
4.4.3	L'utilité des utilisateurs	66
4.4.4	Débit	67
4.4.5	Equité	68
4.4.6	Contrainte du délai	69
4.4.6.1	Satisfaction des utilisateurs	71
4.4.7	Efficacité spectrale et énergétique	73
4.5	Bilan	75
4.6	Conclusion	75
	Conclusion générale et perspectives	76
	Bibliographie	78

Table des figures

1.1	Evolution des réseaux mobiles cellulaires.	4
1.2	Estimation de l'activité et des données générées sur internet en espace d'une minute (2020).	6
1.3	Applications des réseaux 5G.	8
1.4	Illustration du full-duplex, comparé au FDD et TDD Réseaux denses.	11
1.5	De RAN à C-RAN.	13
1.6	Réseau cellulaire avec des antennes omnidirectionnelles au centre des cellules.	14
1.7	Ingénierie cellulaire des stations de base sur une configuration trisectorielle.	15
1.8	Cellule trisectorielle.	15
1.9	Image réelle d'une station de base 5G.	16
1.10	Illustration du Tilt antennaire.	18
1.11	Azimut d'une antenne.	19
1.12	Interférence intracellulaire.	20
1.13	Interférence intercellulaire.	21
2.1	Evanouissement multi-trajet.	24
2.2	Description du mécanisme de propagation à trois échelles.	25
2.3	Handover Intracellulaire.	26
2.4	Handover Intercellulaire.	27
2.5	Trame et grille de ressource OFDMA en lien descendant.	28
2.6	Opération d'insertion du préfixe cyclique.	30
2.7	NOMA en liaison descendante dans une seule cellule avec une station de base et 2 utilisateurs.	33
2.8	OFDMA en liaison descendante dans une seule cellule avec une station de base et 2 utilisateurs.	34
2.9	Comparaison entre OMA et NOMA.	36
2.10	L'ordonnancement.	37

2.11	Fonctionnement de l'ordonnanceur pour les réseaux radios mobiles.	38
2.12	Décomposition du processus d'optimisation.	42
2.13	Volée d'Anser en formation en V.	43
2.14	Déplacement d'une particule.	45
3.1	L'architecture de la cellule de déploiement.	49
3.2	Bloc de fonctionnemnt de NOMA.	53
3.3	Organigramme de l'algorithme d'allocation PSO-PFS hybride.	58
4.1	Scénario de simulation avec 100 utilisateurs.	62
4.2	Réponse fréquentielle du canal simulé.	65
4.3	Convergence de l'algorithme PSO avec 100 itérations.	66
4.4	Performances en termes de débit.	67
4.5	Sous-porteuses allouées par rapport aux utilisateurs.	68
4.6	Performances en termes d'équité.	69
4.7	Probabilité de retard par rapport au temps.	70
4.8	Nombre d'utilisateurs servis par 1200 sous-porteuses.	71
4.9	Satisfaction des utilisateurs au fil du temps.	72
4.10	Efficacité énergétique en fonction des utilisateurs.	73
4.11	Efficacité spectrale en fonction des utilisateurs.	74

Liste des tableaux

1.1	Comparaison entre les performances de la 4G et de la 5G.	7
1.2	Le spectre 5G proposé.	9
1.3	Différents Types de cellules.	14
2.1	Relation entre le nombre de RBs et la bande passante du canal.	29
3.1	Valeurs typiques de l'exposant d'affaiblissement et de la déviation standard.	51
4.1	Paramètres de simulation.	63
4.2	Paramètres de l'algorithme PSO.	64

Liste des abréviations

AMPS	Advanced Mobile Phone System
AWGN	Additive white Gaussian Noise
BBU	Baseband Unit
BS	Base Station
CDMA2000	Code Division Multiple Access 2000
C-RAN	Cloud-RAN
CP	Cyclic Prefix
CQI	Channel Quality Indicator
D2D	Device-to-Device
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EE	Energy Efficiency
FDD	Frequency Division Duplex
FFT	Fast Fourier Transform
FQ	Fair Queuing
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile communication
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IMT-Advanced	International Mobile Telecommunications-Advanced
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunication Union
LOS	Line-of-sight
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	LTE-Advanced
MAC	Media Access Control
Max C/I	Maximum Carrier to Interference Ratio
Max SNR	Maximum Signal to Noise Ratio
METIS	Mobile and Wireless communications Enablers for the Twenty-Twenty Information Society
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MMF	Max-Min Fair
MMS	Multimedia Messaging Service

NGMN	Next Generation Mobile Networks
NLOS	Non-line-of-sight
NMT	Nordic Mobile Telephone
NOMA	Non Orthogonal Multiple Access
OEP	Optimisation par Essaim de Particules
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiple
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OMA	Orthogonal Multiple Access
PFS	Proportional Fair Scheduling
PSO	Particle Swarm Optimization
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
RB	Resource Block
RE	Resource Element
RF	Radio Frequency
RR	Round Robin
RRH	Remote Radio Head
SIC	Successive Interference Cancellation
SINR	Signal to Interference and Noise Ratio
SMS	Short Message Service
SNR	Signal to Noise Ratio
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TTI	Transmission Time Interval
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Télécommunications System
WCDMA	Wideband CDMA
WFQ	Weighted Fair Queuing
1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
4G	Fourth Generation
5G	Fifth Generation
3GPP	3 rd Generation Partnership Project

Introduction générale

De nos jours, les activités humaines deviennent très dépendantes des services Internet mobiles. Selon Cisco Visual Networking Index [1], il y aura 12,3 milliards d'appareils mobiles connectés d'ici 2022, avec une augmentation vertigineuse du trafic mondial de données mobiles, atteignant 77,5 exaoctets par mois d'ici 2022. L'expansion significative de la connectivité et de la densité du trafic caractérise les besoins d'une nouvelle génération (5G) dans les réseaux cellulaires, qui doit fournir une gamme beaucoup plus large d'exigences d'accès : débit très important, faible latence, garantie de qualité de service et capacité à gérer de multiples objets connectés [2].

Afin de répondre à ces exigences, les procédures d'allocation de ressources doivent évoluer, une utilisation efficace du spectre disponible limité doit être envisagée dans le développement de la prochaine génération. Cependant, accroître la capacité tout en améliorant la qualité de service (QoS) reste un défi important à relever. La dégradation du canal radio causée par plusieurs phénomènes (le pathloss, le shadowing le multipath fading) réduit la capacité de la transmission, ce qui a un grand impact sur la QoS et engendre une mauvaise distribution des ressources.

Pour ce faire, la 5G doit envisager une nouvelle technique d'accès multiple qui offre une efficacité spectrale élevée. En effet, au lieu d'OFDMA utilisée dans la norme LTE (4G), la technique Non Orthogonal Multiple Access (NOMA) est investiguée dans cette dissertation.

NOMA est basée sur un nouveau domaine de multiplexage qui est le domaine des puissances. Cette technique dessert plusieurs utilisateurs simultanément en utilisant les mêmes ressources spectrales ; cependant, au prix d'une augmentation des interférences intracellulaires. Pour atténuer ces interférences, NOMA exploite l'annulation d'interférence successive (SIC) au niveau des récepteurs [3].

En d'autres termes, les techniques utilisées pour l'attribution des ressources ne suffisent pas, elles doivent être combinées avec des ordonnanceurs. Malgré que ces ordonnanceurs soient efficaces, ils privent les utilisateurs ayant de mauvaises conditions de canal et qui sont dans des emplacements critiques à cause des interférences intersectorielles ce qui réduit le SINR.

Le modèle du système étudié dans ce mémoire est une seule cellule tri-sectorielle 5G. L'objectif de l'étude réalisée est le développement d'un algorithme d'allocation de ressources pour les réseaux NOMA, dans le but de maximiser le débit du système, l'efficacité spectrale et énergétique ainsi que l'équité entre les utilisateurs tout en minimisant le délai. Une nouvelle approche au problème d'optimisation est analysée.

Les contributions principales de ce mémoire peuvent être résumées comme suit :

- Une étude comparative a été faite entre la nouvelle technique NOMA et la technique OFDMA en utilisant la nouvelle approche hybride basée sur un algorithme d'optimisation PSO (Particle Swarm Optimization) et l'ordonnanceur PFS (Proportional Fair Scheduling) pour une distribution optimale de ressource,
- L'allocation de ressources tient compte de la charge des secteurs (nombre d'utilisateurs par secteur) ainsi que la position des utilisateurs dans la cellule,
- La totalité de la bande passante du système peut être utilisée afin d'augmenter la capacité du système.

Notre mémoire est structuré en quatre chapitres :

Le chapitre 1, aborde les principes de base de la nouvelle génération 5G, et de la planification radio cellulaire, incluant la notion d'interférence intercellulaire et intracellulaire.

Le chapitre 2, présente l'état de l'art des techniques d'allocation de ressources et les ordonnanceurs les plus connus dans les réseaux cellulaires. Une méthode d'optimisation a été présentée à la fin du chapitre afin de traiter le problème d'affectation des ressources.

Le chapitre 3, expose la problématique et le modèle étudié qui vise à minimiser l'utilisation du spectre tout en satisfaisant les utilisateurs, ainsi que les objectifs attendus de notre étude, En outre, une description de l'approche hybride pour une allocation optimale et une QoS élevée a été détaillée.

Le chapitre 4, concerne la partie simulation et résultats, une analyse et une comparaison a été faite pour évaluer les performances de l'approche hybride en utilisant les deux techniques NOMA et OFDMA.

Enfin, notre mémoire s'achève par une conclusion générale et quelques perspectives.

Chapitre 1

Bases sur les communications sans fil 5G

Sommaire

1.1 Introduction	3
1.2 Bref historique des réseaux sans fil cellulaires	4
1.3 Vers la nouvelle génération des réseaux mobiles : 5G	6
1.4 Architecture radio des réseaux mobiles 5G	12
1.5 Le concept cellulaire	13
1.6 Conclusion	21

1.1 Introduction

Les exigences de la connectivité mobile massive de différents appareils et de diverses applications déterminent les besoins des prochaines générations de technologies mobiles (5G) pour surmonter les demandes futures.

Afin de pouvoir optimiser cette nouvelle génération 5G, il est nécessaire d'adopter une approche pour l'allocation et la gestion du spectre qui se concentrera sur l'utilisation efficace et effective des ressources. Ainsi, de nouveaux mécanismes sont proposés pour améliorer la qualité de service et les performances pour l'intégration de nouveaux services.

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'évolution des générations des réseaux mobiles, en se focalisant sur la cinquième génération. Nous commençons par une simple comparaison entre ses performances avec celles de la 4G, ses exigences en termes de débit, latence et capacité. Ensuite, nous décrirons son architecture radio. Enfin, nous introduirons le concept des réseaux cellulaires.

1.2 Bref historique des réseaux sans fil cellulaires

Les réseaux de communication mobile ont toujours connu une évolution continue et rapide depuis leur lancement en tant que réseaux téléphoniques. D'une génération à l'autre, les services se sont multipliés et diversifiés pour inclure les données dans un premier temps puis la vidéo et de nombreux autres services au fur et à mesure.

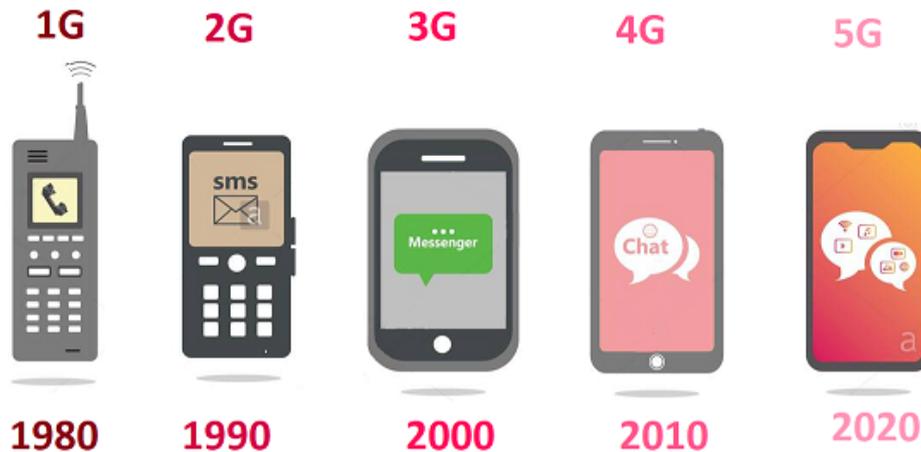


FIGURE 1.1 – Evolution des réseaux mobiles cellulaires.

1. Première génération 1G

Avec sa première apparition, le réseau mobile était une version analogique connue sous le nom de première génération (1G) dans les années 80. Il utilisait différents standards comme l'AMPS, le NMT et le Radiocom2000 [4].

La 1G était en mesure de gérer uniquement la voix, caractérisée par des communications non sécurisées entre les terminaux et les stations de bases, sans roaming vers l'international.

2. Deuxième génération : GSM (*Global System for Mobile communication*)

La deuxième génération (2G) repose sur une technologie numérique qui a été développée à la fin des années 1990. L'un de ses standards qui a rencontré le plus large succès est le GSM, idéal pour la communication de type voix où les ressources ne seront allouées que pour la durée de la conversation et qui permet également la transmission des données, notamment des messages courts (SMS) et des messages multimédias (MMS), et une itinérance internationale est assurée. Ce standard utilise les bandes de fréquences 900 MHz et 1800 MHz en Europe et permet un débit maximal de 9,6 Kbps. Afin d'accroître les débits fournis, GSM fut connecté à un réseau cœur appelé GPRS (2.5G) qui améliora la prise en charge des ser-

vices de données. En complément de ce développement, la technologie d'accès radio EDGE (2.75G) rendit possible des débits de l'ordre de 240 Kbit/s par cellule grâce à l'amélioration des techniques d'accès au canal radio [5] ainsi les premières connexions IP sont apparues.

3. Troisième génération 3G : UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*)

La troisième génération de réseaux mobiles regroupe deux familles de technologies ayant connu un succès commercial : l'UMTS issu du GSM et le CDMA2000, issu de l'IS-95.

La technologie UMTS utilise la bande de fréquence de 5 MHz pour le transfert de la voix et de données avec des débits pouvant aller de 384 kbps à 2 Mbps. Elle est basée sur la technique d'étalement de spectre WCMDA (*Wideband CDMA*) qui consiste à exploiter une plus large bande de fréquence pour envoyer un grand nombre de données par paquet.

L'UMTS ouvre la porte à des applications et services nouveaux, concernent surtout l'aspect vidéo : Visiophonie, MMS Vidéo, Vidéo à la demande et Télévision.

4. Quatrième génération 4G : LTE (*Long Term Evolution*)

L'organisme de standardisation 3GPP a défini la norme LTE commercialisée en octobre 2010, basée entièrement sur les protocoles IP. Cette norme opère sur une fréquence à large bande de 1,4 MHz à 20 MHz et un débit de 100 Mbit/s pour un utilisateur en mouvement et de 1 Gbit/s en mode stationnaire. L'architecture du LTE a permis de réduire la latence, de mieux gérer les utilisateurs en mobilité, d'offrir une meilleure qualité de service et une meilleure gestion de la sécurité [4]. Cette technologie utilise l'accès multiple par division de fréquence orthogonale (OFDMA) comme technique d'accès.

5. Cinquième génération 5G

La 5G ne consiste pas en une amélioration des normes précédentes de télécommunications, il s'agit plutôt d'une innovation de rupture qui va révolutionner les télécommunications et qui est susceptible d'apporter des changements radicaux dans les modèles commerciaux ayant cours chez les opérateurs [6].

L'arrivée de cette génération pourrait avoir un impact important sur la qualité de service, elle apporte des améliorations, notamment offre une capacité de cellule supérieure et des débits plus élevés supérieurs à 1Gbps. Cette technologie est adoptée dans diverses applications telles que l'Internet des objets industriel (IoT), la ville intelligente et le réseau intelligent.

1.3 Vers la nouvelle génération des réseaux mobiles : 5G

Nous vivons à l'ère numérique, Internet est devenue un élément essentiel de notre vie quotidienne. Aujourd'hui, plus de 4 millions de vidéos sont visionnées sur YouTube, 694444 images sont téléchargées sur Instagram et 190 millions d'emails sont envoyés toutes les minutes, d'après Lewis Loril, comme le montre la figure 1.2 [7].

Les fichiers que l'on télécharge sont de plus en plus lourds. La qualité des vidéos et du son dont on profite ne cesse d'augmenter, ce qui se traduit par un nombre de Go pour un élément toujours plus grand. De fait, pour que les téléchargements ne deviennent pas trop long, il y a nécessité de proposer des débits plus rapides. D'où l'apparition d'une nouvelle génération la 5G.



FIGURE 1.2 – Estimation de l'activité et des données générées sur internet en espace d'une minute (2020).

1.3.1 Evolution de performances 4G en 5G

La prolifération rapide des applications multimédias ainsi que l'augmentation vertigineuse du nombre d'abonnés aux services de communication radio-mobile ont abouti à une hausse de la demande en termes de débit. En effet, le trafic mondial de données mobiles augmentera de 46 % de 2017 à 2022, atteignant 77,5 exaocets par mois d'ici 2022 [1].

Cette augmentation rapide des demandes a conduit le 3GPP à concevoir les réseaux LTE/LTE-A afin de pouvoir satisfaire la QoS fournie aux utilisateurs. Cependant, l'amélioration incrémentale de la QoS en se basant sur le réseau cellulaire 4G n'est pas suffisante. Maintenant, nous faisons face à une évolution rapide des réseaux cellulaires à travers l'ère de la 5ème génération [8].

Les consommateurs s'attendent à ce que la 5G surpasse la 4G, bien que la 4G prenne en charge des débits de données de liaison descendante élevés pouvant atteindre 1 Gbit/s, les réseaux 5G doivent fournir un débit beaucoup plus élevé et une couverture étendue. Par conséquent, de nombreux intérêts vont au-delà des technologies 4G.

Le tableau 1.1 résume les performances attendues de la 5G et celles qui sont actuellement disponibles avec la 4G [9].

TABLE 1.1 – Comparaison entre les performances de la 4G et de la 5G.

Performances/Génération	4G	5G
1. Débit maximal (Gbit/s)	1	20
2. Débit aperçu par l'utilisateur (Mbit/s)	10	100
3. Efficacité spectrale	1x	3x
4. Vitesse (Km/h)	350	500
5. Latence (ms)	10	1
6. Nombre d'objets connectés sur une zone (quantité d'objets/ km^2)	10^5	10^6
7. Efficacité énergétique du réseau	1x	100x
8. Débit sur une zone ($Mbit/s/m^2$)	0.1	10

1.3.2 Nouvelles applications

L'essor de la 5G permettra le déploiement massif de l'Internet des objets (IoT), et il peut être très bénéfique s'il est utilisé à des fins industrielles ou dans des applications liées à la santé. Les différentes applications de la 5G sont illustrées par la figure 1.3.

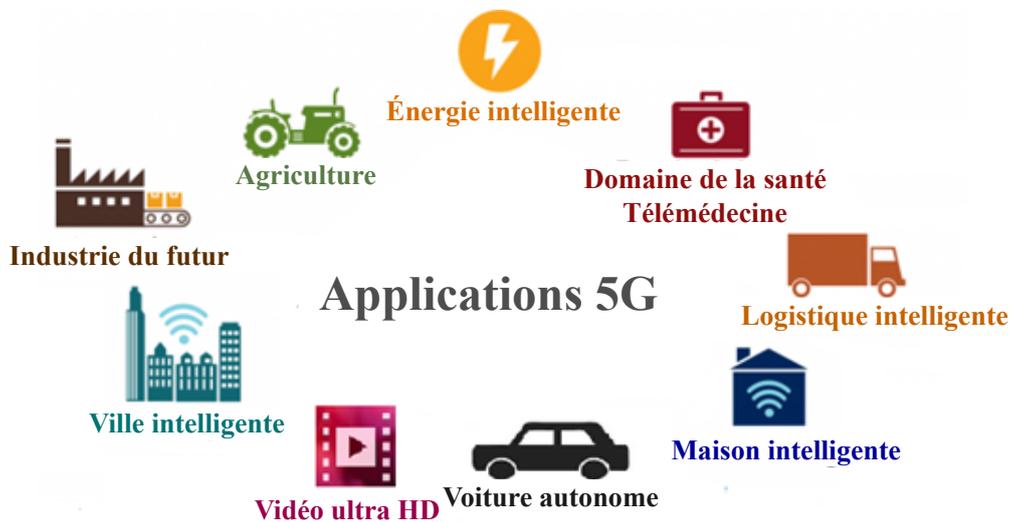


FIGURE 1.3 – Applications des réseaux 5G.

1.3.3 Le spectre de la 5G : Vers de nouvelles fréquences

La 5G est la première technologie mobile à fonctionner dans des fréquences à la fois basses, hautes, et surtout très hautes (6 GHz et plus). Ces dernières, ont subi une vraie rupture technologique utilisant des ondes millimétriques, caractérisées par une bande passante importante qui se traduit par un débit très élevé et une très faible longueur d'onde.

Selon Pi et al. [10], l'utilisation des ondes millimétriques offrira un nouveau spectre de 100 GHz pour la communication mobile, soit un spectre 200 fois plus grand que celui utilisé dans les bandes inférieures à 3GHz, même si ces fréquences sont à faible propagation en distance, mais elles répondent à l'incessante augmentation des débits et à l'inflation des volumes de données échangés.

Le tableau 1.2 présente les différentes bandes de fréquence que vont utiliser les réseaux 5G.

TABLE 1.2 – Le spectre 5G proposé.

Objectif principal	Bandes de fréquence	Avantages
Coverage Layer	Fréquences basses (< à 2 GHz) e.g. 700 MHz et 1400 MHz	Une couverture très importante
Coverage and Capacity Layer	Fréquences moyennes (2-6 GHz) e.g. 3400-3800 MHz	Meilleur compromis entre capacité et couverture
Super Data Layer	Fréquences hautes "mm" (> à 6 GHz) e.g. 24.25-29.5 GHz et 37-43.5 GHz	Adresser les cas d'usage exigeant des débits élevés.

1.3.4 Exigences et défis de la 5G

L'exigence de la 5G va au-delà de celles exigées par le secteur de la radiocommunication de l'ITU pour la 4G. Certaines des principales exigences de la 5G par rapport à la 4G discutées dans le livre blanc NGMN (*Next Generation Mobile Networks*) [2] sont :

- Une capacité en $Mbits/s/km^2$ multipliée par 1000,
- Un débit de données par utilisateur de 10 à 100 fois plus grand,
- Taux de connectivité plus élevé, 10 à 100 fois plus,
- Réduction du délai de 5 à 10 fois,
- Une durée de vie des équipements 10 fois plus élevée,
- Augmentation de 3 fois dans l'efficacité spectrale : une utilisation plus efficace de la bande passante.

1.3.4.1 Métriques d'évaluation

✧ Une plus grande capacité

Le nombre d'appareils mobiles qui devraient être connectés au réseau 5G est de l'ordre de milliards. Selon Cisco Visual Networking Index [1], il y aura 12,3 milliards d'appareils mobiles connectés d'ici 2022. La demande en capacité pourrait même attendre plus de 1000 fois la demande actuelle. La capacité requise pour gérer un si grand nombre de connexions, y compris la signalisation et le volume de trafic de données, constitue un défi technique très important. Cette exigence est considérée comme la plus difficile pour les réseaux 5G [11].

✧ **Un débit plus élevé**

Étant donné que la 5G est la prochaine évolution des réseaux cellulaires, elle devrait au moins être en mesure d'offrir un débit plus élevé par rapport à ses prédécesseurs. Selon Ericsson [12], un débit supérieur ou égal à 10 Gbps devrait être garanti aux utilisateurs mobiles dans les environnements intérieurs et extérieurs denses.

✧ **Une très faible latence**

Certaines applications à implémenter sur les réseaux 5G nécessitent un délai très faible, de l'ordre de millisecondes. Les jeux 3D interactifs et la réalité augmentée sont de très bons exemples de ce type d'applications. L'objectif a été fixé à une latence globale de l'ordre de 1ms, c'est-à-dire une réduction en latence de 5 à 10 fois par rapport aux générations précédentes des réseaux cellulaires.

En fournissant ces principales exigences pour les réseaux 5G, les utilisateurs bénéficieront d'une meilleure qualité de service en termes de connectivité et de débit.

1.3.5 Les technologies clés

✧ **MIMO massive**

Cette technologie se caractérise par l'utilisation d'un nombre élevé de micro antennes « intelligentes » sur un seul équipement (de 8 à 128 actuellement) [9]. Ces antennes permettent de former des faisceaux très directifs vers les terminaux, qu'ils soient fixes ou en mouvement. Les antennes Massive MIMO permettent d'atteindre un débit et une capacité de transmission de données inaccessibles aujourd'hui avec la 4G. En effet, cette technologie permet à la fois d'augmenter la portée des stations de base et d'améliorer l'efficacité énergétique.

✧ **Ondes millimétriques**

La majorité des réseaux cellulaires actuels opèrent dans des bandes particulièrement étroites en deçà des 2 GHz et dans laquelle les signaux se propagent sur une grande distance dans l'air libre, en demeurant, toutefois, dans un spectre quelque peu limité.

Les ondes millimétriques offrent une bande passante substantiellement plus grande que les bandes présentement utilisées dans les télécommunications. Cependant, l'utilisation de ces ondes nécessite l'installation de dizaines de milliers de nouvelles antennes.

❖ Les communications full duplex

Dans les systèmes classiques, l'émission et la réception se font, soit sur des bandes de fréquence différentes FDD (*Frequency Division Duplexing*), soit à des instants différents TDD (*Time Division Duplexing*). Le concept de développer le full duplex 5G est de pouvoir émettre et recevoir simultanément des données, sur la même fréquence, au même moment et au même endroit, [9] comme illustré par la figure 1.4.

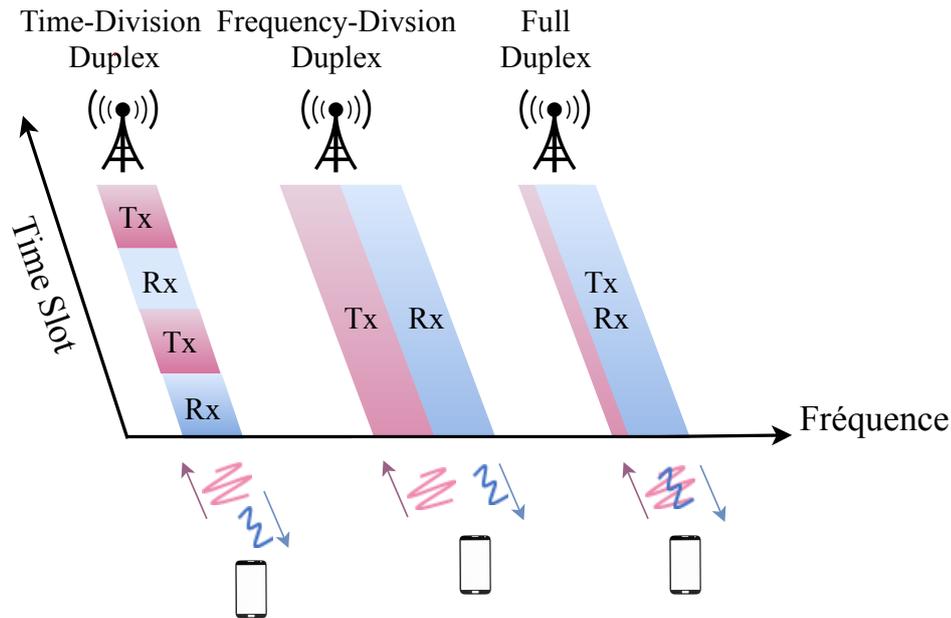


FIGURE 1.4 – Illustration du full-duplex, comparé au FDD et TDD Réseaux denses.

❖ Multiplexage NOMA

La technologie NOMA a récemment été proposée en tant que technique de transmission pour les réseaux 5G, et promet d'augmenter considérablement l'efficacité spectrale et énergétique par rapport à la norme 4G actuelle qui utilise le multiplexage sur fréquences orthogonales OFDM.

La principale raison de l'adoption de NOMA en 5G tient à sa capacité à servir plusieurs utilisateurs en utilisant les mêmes ressources de temps et de fréquence [3]. En NOMA, plusieurs utilisateurs sont multiplexés en puissance dans l'émetteur, et la séparation des signaux a lieu dans le récepteur, par des techniques d'annulation d'interférence. Cependant, la non-orthogonalité des signaux complique les tâches d'allocation du spectre et de la puissance, par rapport au cas de l'OFDM classique. Nous allons détailler encore plus sur cette technologie dans les prochains chapitres.

1.3.6 Type de modulation

Dans les systèmes sans fil, la principale limitation sur l'ordre de la QAM est le rapport signal-bruit, lorsqu'on envoie plusieurs informations simultanément, la transmission devient très sensible aux perturbations. Grâce à l'amélioration du bilan de liaison de la 5G, via des technologies de traitement de signal, la modulation pourra atteindre l'ordre QAM256, c'est-à-dire que 8 bits d'information seront transmis à chaque instant, soit une augmentation de la capacité maximale de 33% (dans des conditions idéales). Cette modulation améliorée offre une excellente efficacité spectrale et permet de réaliser des débits de données très élevés, elle sera également déployée sur les réseaux 4G évolués [9].

1.4 Architecture radio des réseaux mobiles 5G

Afin de toujours faire évoluer les débits ainsi que l'expérience des utilisateurs, les chercheurs et ingénieurs améliorent constamment l'architecture des réseaux mobiles. Ce qui distingue la structure d'un réseau 5G des réseaux de télécommunication connus jusqu'à maintenant est la séparation entre les différents systèmes constituant l'infrastructure réseau physique (relais, antennes, etc.) et l'architecture logicielle.

Nous nous intéressons dans ce mémoire à la partie réseaux d'accès radio de la 5G.

1.4.1 Du RAN au Cloud RAN

Dans l'architecture RAN traditionnelle, chaque station de base gère des signaux d'émission/réception pour un certain nombre d'utilisateurs sur une zone géographique spécifique. Avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs, cette architecture RAN fait face à de sérieux problèmes d'interférences et donc à la dégradation de la QoS [13].

Le réseau d'accès radio type cloud (C-RAN) a été présenté comme une technologie prometteuse qui améliore les performances du réseau et réduit les dépenses, elle joue un rôle primordial dans la gestion des ressources radios et des ressources de calcul du système.

Le concept clé du C-RAN est de décomposer la station de base conventionnelle en une entité de traitement en bande de base, connue sous le nom de *BaseBand Unit* (BBU), et en une tête de transmission radio à faible coût, appelée *Remote Radio Head* (RRH), comme le montre la figure 1.5. Alors que les RRHs sont réparties sur plusieurs sites, les BBU sont regroupées dans un

centre de données appelé BBU pool afin d'optimiser l'utilisation des BBU fortement et faiblement chargés. Le lien entre les deux entités est une interface en fibre optique [8].

Le réseau Cloud RAN consiste à virtualiser les fonctionnalités de bande de base dans le cloud pour une gestion centralisée. Il constitue le réseau d'accès le plus prometteur pour la nouvelle génération des réseaux 5G.

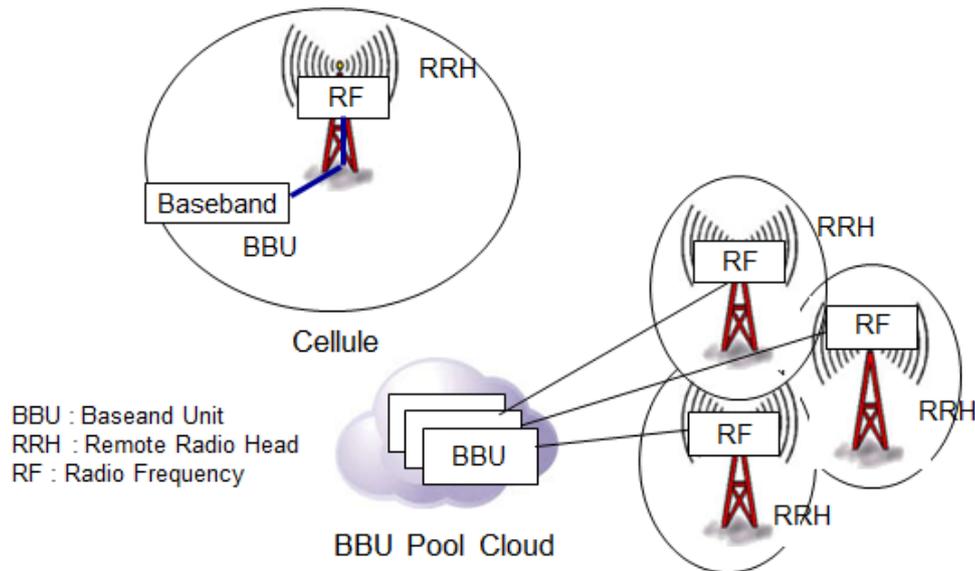


FIGURE 1.5 – De RAN à C-RAN.

1.5 Le concept cellulaire

Historiquement, un réseau cellulaire était constitué d'une seule station de base servant un grand nombre d'utilisateurs. Aujourd'hui, l'architecture moderne des réseaux cellulaires devient de plus en plus hétérogène, les stations de base sont souvent augmentées avec un grand nombre de petites cellules afin d'augmenter la couverture et la capacité du réseau.

Le concept de cellule est introduit comme une solution à la contrainte de la limitation de la ressource radio. La détermination de la taille et de la forme d'une cellule ainsi que l'allocation du spectre sont des critères très importants dans la planification des réseaux radios mobiles.

Généralement, les cellules sont représentées par des hexagones réguliers, comme le montre la figure 1.6, mais en raison des conditions topographiques et environnementales, ceci est seulement une représentation théorique. Dans le cas réel, les cellules ont des formes très irrégulières et se chevauchent, ce qui va permettre aux utilisateurs se trouvant aux extrémités de choisir la station de base avec laquelle ils pourraient se connecter [8] mais cela va accroître les problèmes potentiels d'interférences.

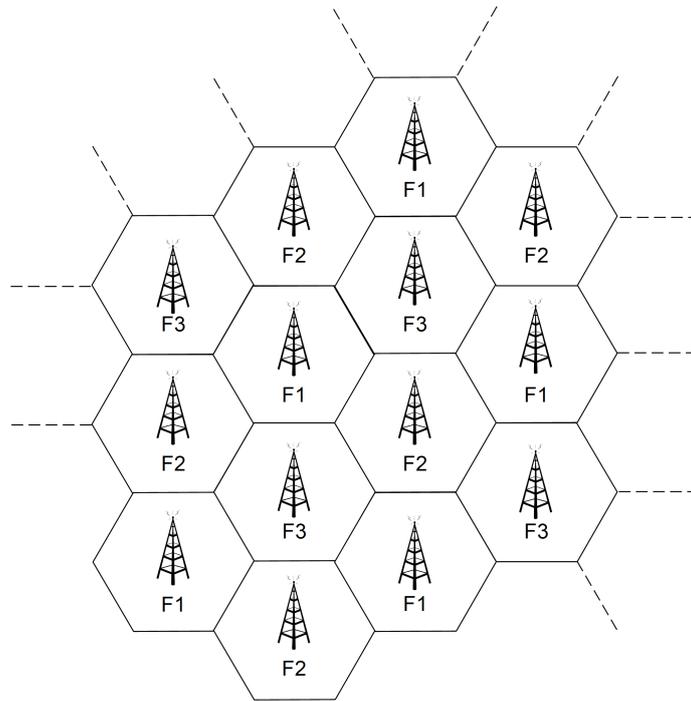


FIGURE 1.6 – Réseau cellulaire avec des antennes omnidirectionnelles au centre des cellules.

On distingue plusieurs types de cellules en fonction de leur rayon de couverture, lié à la puissance d'émission de la station de base, et de leur usage par les opérateurs. Ces différentes cellules sont données dans le tableau 1.3.

TABLE 1.3 – Différents Types de cellules.

Type de cellule	Puissance de sortie (W)	Rayon de cellule (Km)	Nombre d'utilisateurs	Emplacements
Femto Cellule	0.001 à 0.25	0.010 à 0.1	1 à 30	Intérieur
Pico Cellule	0.25 à 1	0.1 à 0.2	30 à 100	Intérieur/Extérieur
Micro Cellule	1 à 10	0.2 à 20	100 à 2000	Intérieur/Extérieur
Macro Cellule	10 à >50	8 à 30	>2000	Extérieur

1.5.1 Cellule sectorielle

Afin de minimiser le nombre de sites et avoir une meilleure capacité, pour un nombre de cellules donné, ainsi que réduire le coût d'exploitation d'un réseau, les opérateurs utilisent la sectorisation (le fait de couvrir une cellule par une antenne). Au lieu d'une antenne omnidirectionnelle, on place un ensemble d'antennes dont le diagramme de rayonnement couvre un secteur angulaire restreint. Ainsi, pour la même zone, trois sites étaient requis avec une configuration omnidirectionnelle (voir la figure précédente 1.6) et seulement un site l'est pour une configuration trisectorielle (Voir la figure 1.7).

Ainsi, la trisectorisation est devenue la règle de tous les réseaux cellulaires modernes.

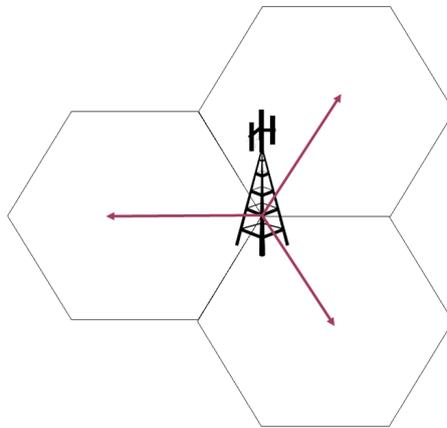


FIGURE 1.7 – Ingénierie cellulaire des stations de base sur une configuration trisectorielle.

On nomme cellule toute la zone couverte par l'ensemble des antennes dans le même site et on nomme secteur le territoire couvert par une antenne dans une direction directive comme le montre la figure 1.8.

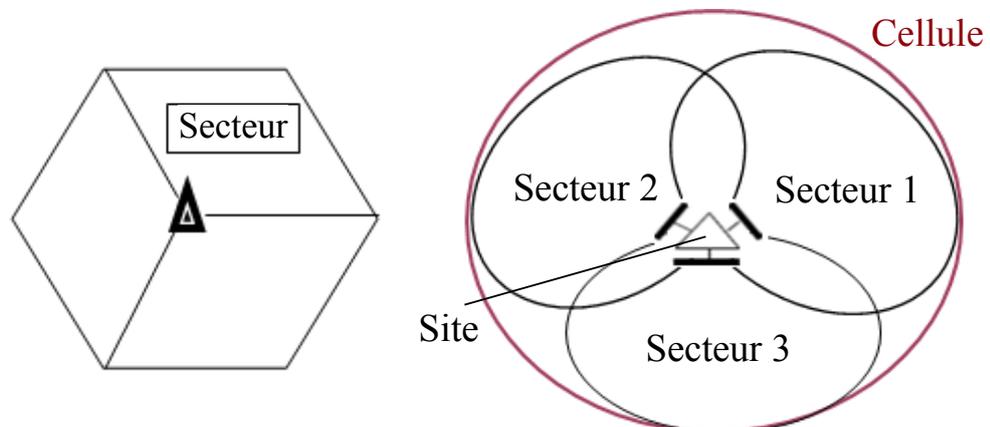


FIGURE 1.8 – Cellule trisectorielle.

1.5.2 Station de base

Une station de base (BS) est un point de communication fixe pour les téléphones cellulaires clients sur un réseau de transport. Chaque opérateur dispose de son propre parc de stations de base réparties sur tout le territoire, chargées de la liaison radio entre les usagers et le réseau.

Chaque station de base est caractérisée par son rayon de couverture ainsi que la capacité maximale des antennes. Elle doit être positionnée afin de bien couvrir la zone désirée. En outre, elle contient les algorithmes d'allocation de ressource radio.

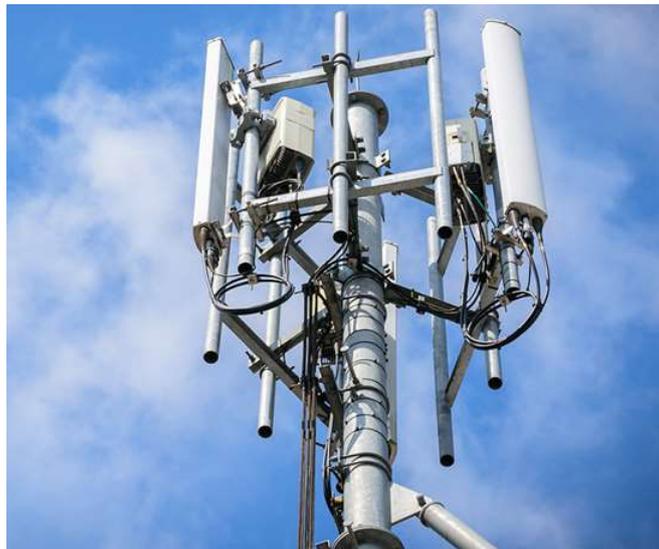


FIGURE 1.9 – Image réel d'une station de base 5G [14].

1.5.3 Type d'antennes

Il existe une quantité incroyable de variété d'antennes avec des formes plus ou moins surprenantes. On les voit un peu partout, souvent sur des hauts pylônes, sur des toits d'immeubles, contre des murs ou à l'intérieur des bâtiments.

Une antenne redirige simplement l'énergie qu'elle reçoit de l'émetteur. La redirection de cette énergie a l'effet de fournir plus d'énergie dans une direction, et moins d'énergie dans toutes les autres directions. Elle est caractérisée par sa bande de fréquences supportée, son diagramme de rayonnement, sa polarisation, son gain et sa puissance maximale d'utilisation. En outre, chaque station de base possède une antenne.

Cependant, trois types d'antennes sont disponibles dans les réseaux cellulaires, à savoir l'antenne omnidirectionnelle, directionnelle et sectorielle.

1. Antenne omnidirectionnelle

Une antenne dont les propriétés sont identiques quelle que soit la direction, elle émet des ondes de manière également efficace dans toutes les directions, et fournit un diagramme de rayonnement horizontal de 360 degrés. L'antenne omnidirectionnelle est particularisée principalement par sa puissance d'émission allant de 26 à 55 dBm, son gain de transmission $G_A = 11.15$ dB et les pertes de diagramme vertical de l'antenne [15].

2. Antenne directionnelle

Une antenne qui rayonne une plus grande puissance dans une seule direction permettant une performance accrue lors de l'émission et de la réception. D'autre part, elle permet d'éliminer les parasites qui viennent d'autres directions. Ces antennes peuvent détourner l'énergie dans une direction particulière à des distances plus lointaines. Par conséquent, on peut couvrir de longues portées, mais la largeur de faisceau pertinente diminue [16].

3. Antenne sectorielle

Une antenne sectorielle est une antenne directionnelle pour les applications extérieures. Ces antennes sont principalement utilisées pour les sites de stations de base de téléphones portables. Elles sont également utilisées pour d'autres types de communications mobiles, par exemple dans les réseaux Wi-Fi. Ce sont des antennes longues et étroites avec des gains élevés, elles rayonnent principalement dans un secteur spécifique. Le faisceau peut être aussi large que 180 degrés ou aussi étroit que 60 à 70 degrés.

Dans notre cas d'étude, seule l'antenne sectorielle a été considérée, car nous utilisons une cellule à trois secteurs. Les antennes sectorielles sont particularisées principalement par leur puissance de transmission, le tilt et l'azimut qui sont des paramètres décisifs pour la couverture des émetteurs.

✧ Puissance d'émission

Les puissances radio permettent de couvrir un territoire de plus grande dimension. Le nombre de récepteurs pouvant capter un signal dépend de la qualité de l'antenne réceptrice et de la puissance de l'émetteur. En voie descendante, la puissance d'émission est contrôlée par la station de base, et elle est limitée pour des raisons environnementales. Elle est souvent exprimée en décibel par milliwatt (dBm) où le dBm est une échelle logarithmique par rapport au milliwatt (mW).

Nous avons [17] :

$$P[dBm] = 10 \log_{10}(P[mW]), \quad (1.1)$$

$$P[mW] = 10^{\frac{P[dBm]}{10}}, \quad (1.2)$$

La puissance de transmission varie entre 35 et 55 dBm avec un pas de 5dBm [18].

❖ Tilt

Le tilt d'antenne correspond à l'angle entre le faisceau principal de l'antenne et le plan horizontal. Un tilt élevé crée une petite cellule tandis qu'une antenne faiblement tiltée présente une portée de communication importante. Il est mesuré en degrés et peut avoir des valeurs positives qui signifient que le faisceau est dirigé vers le bas (downtilt), comme il peut avoir des valeurs négatives lorsque le faisceau est dirigé vers le haut (Uptilt). Le tilt ajuste la radiation de l'antenne en modifiant le diagramme de rayonnement, dans le but de diminuer l'interférence, et d'améliorer la couverture [18, 19].

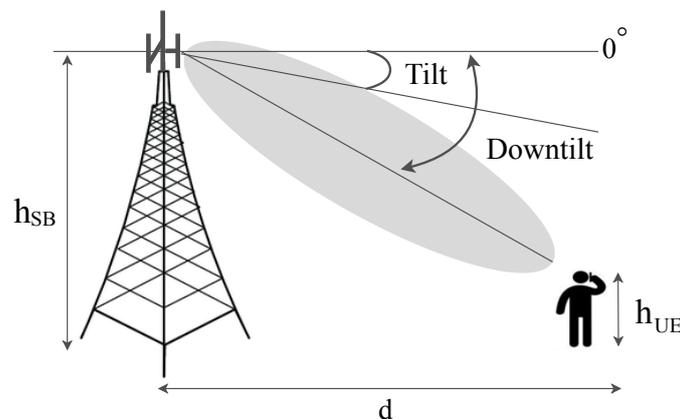


FIGURE 1.10 – Illustration du Tilt antennaire.

❖ Azimut

L'azimut est un paramètre qui a toute son importance. L'azimut de l'antenne est la direction vers laquelle pointe l'antenne (uniquement pour les antennes directionnelles, pas pour les antennes omnidirectionnelles), il s'exprime en degrés et désigne l'angle entre le nord géographique et la direction préférentielle de l'antenne dans le plan vertical, qui est définie par la puissance d'émission maximale [17]. Il permet d'orienter les secteurs vers des zones précises du plan [18].

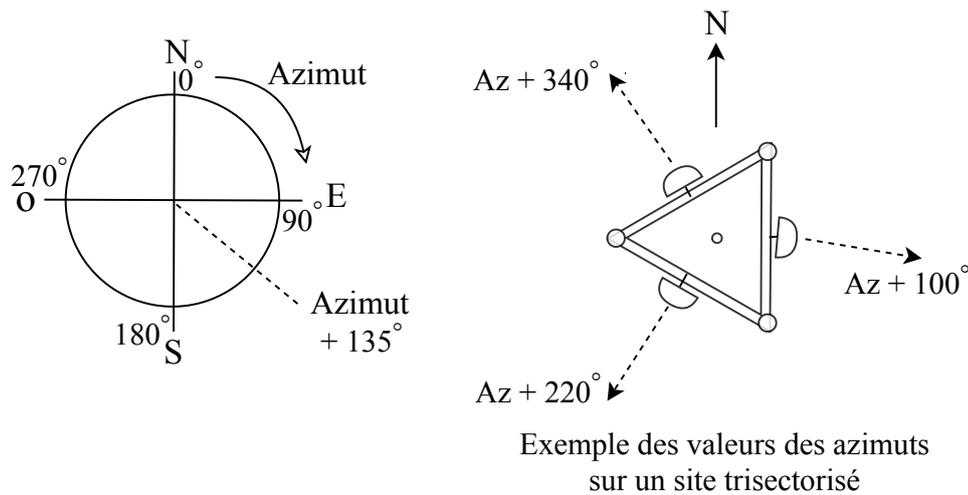


FIGURE 1.11 – Azimut d’une antenne.

1.5.4 Notion d’interférence

Le canal de transmission est affecté par plusieurs perturbations comme les interférences créées par des transmissions différentes du signal attendu et le bruit thermique causé par les équipements électroniques au niveau de la réception. Ainsi, on définit la qualité du canal par le rapport signal sur interférence et bruit (*Signal to Interference and Noise Ratio, SINR*). Il s’agit du rapport entre la puissance maximale du signal qu’une connexion sans fil peut atteindre et du bruit présent dans la connexion ainsi que des interférences.

En effet, à un instant donné, une ressource peut être de bonne qualité pour un utilisateur (i.e. l’utilisateur bénéficie d’un haut SINR sur cette ressource), et de mauvaise qualité pour un autre [20].

L’expression SINR générale pour les réseaux homogènes est la suivante :

$$SINR_i = \frac{P_{r,i}}{\sum_{m \neq i}^M I_m + N_0}, \quad (1.3)$$

Où $P_{r,i}$ représente la puissance reçue de l’utilisateur i souhaité, I_m est l’interférence des autres utilisateurs qui sont dans la même cellule, M est le nombre total des utilisateurs et N_0 un bruit blanc.

Plusieurs sortes d’interférences viennent s’ajouter au bruit thermique, telles que :

- L’interférence entre symboles,
- L’interférence intracellulaire,
- L’interférence intercellulaire.

1.5.4.1 Interférence intracellulaire

L'interférence intracellulaire est un problème majeur pour les réseaux cellulaires. La variation des interférences entre secteurs est supérieure à 30 dB, en fonction de la position de l'utilisateur. En limite de secteur, le niveau d'interférences est relativement plus élevé que celui d'autres endroits, mais la distance entre l'utilisateur et la station de base est le facteur le plus déterminant pour l'interférence intersectorielle [21].

Comme le montre la figure 1.12, dans la même cellule un utilisateur reçoit le signal utile, ainsi que les signaux destinés aux autres utilisateurs provenant de la station de base.

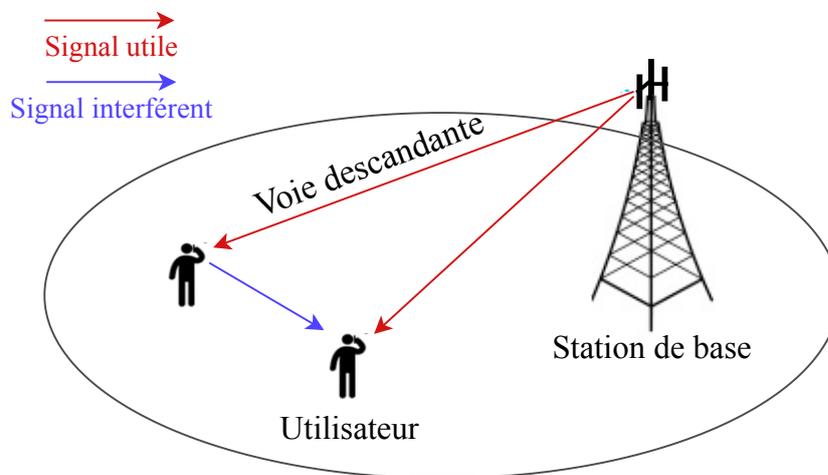


FIGURE 1.12 – Interférence intracellulaire.

1.5.4.2 Interférence ICIC

Les techniques de coordination des interférences intercellulaires (*Intercell Interference Coordination techniques*, ICIC) ont été conçues afin de réduire les interférences intercellulaires, en se basant sur la coordination de la bande et de la puissance de transmission. En fait, cette coordination se fait à l'échelle du réseau en ajustant l'allocation des ressources fréquentielles et les puissances de transmission entre les différentes cellules.

Les techniques ICIC consistent à partager la bande en deux sous-bandes. De même, les utilisateurs sont classifiés en deux groupes, le premier est formé par les utilisateurs centraux et le second contient les mobiles frontaliers. Chaque sous-bande est associée à chaque groupe d'utilisateur [8].

Bien que les solutions ICIC permettent de protéger les utilisateurs frontaliers contre les interférences, elles ne sont efficaces que lorsque les mobiles sont uniformément distribués entre les zones et donc ICIC elle seule sera insuffisante pour garantir une bonne QoS.

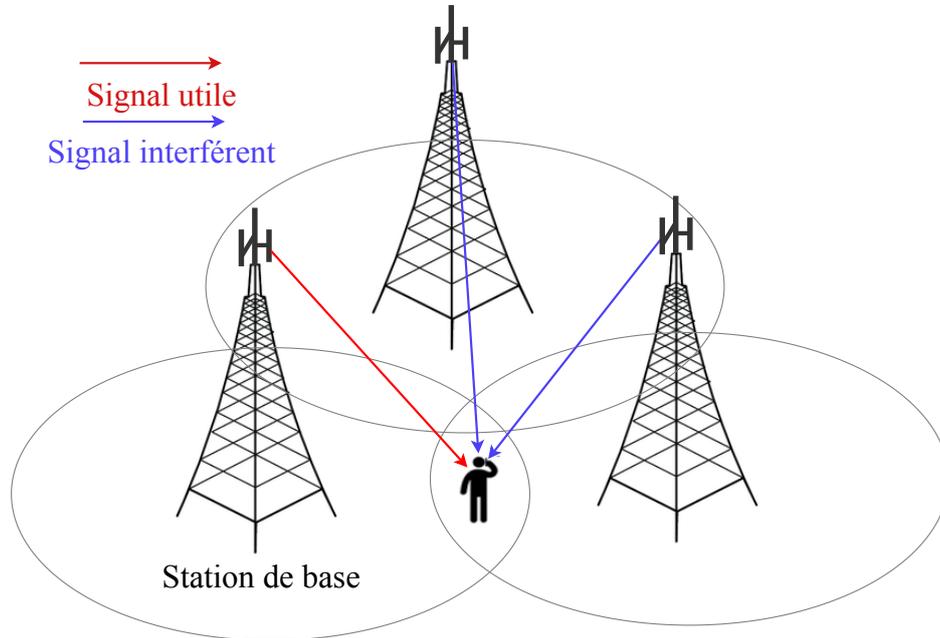


FIGURE 1.13 – Interférence intercellulaire.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit quelques bases sur les réseaux 5G, ses défis et exigences, ainsi que, son architecture radio C-RAN. Par la suite, nous avons élaboré le concept cellulaire ainsi que les types d'interférences existantes dans les réseaux cellulaires.

Les recherches sur cette nouvelle génération ne cessent de s'arrêter, elles sont en évolution croissante jour après jour afin d'atteindre les exigences voulues. En occurrence, pour répondre à ces exigences et obtenir une meilleure qualité de service, une stratégie d'allocation de ressource utilisant la technique NOMA doit être mise en œuvre, ainsi les principaux algorithmes d'allocation de ressource sont présentés dans le prochain chapitre.

Chapitre 2

Stratégies d'allocation de ressources dans les réseaux cellulaires

Sommaire

2.1 Introduction	22
2.2 Les contraintes d'allocation de ressources	23
2.3 Techniques d'allocation de ressources dans les réseaux 5G	27
2.4 Les ordonnanceurs d'allocation de ressources	36
2.5 Algorithmes d'optimisation	42
2.6 Conclusion	45

2.1 Introduction

À l'origine, l'allocation de ressources est une branche de la théorie de l'ordonnancement, elle est considérée comme une solution à l'optimisation des ressources limitées, en fréquence, puissance et temps, afin d'obtenir les performances souhaitées tout en tenant compte des contraintes réalistes [22].

Ainsi, différents mécanismes de gestion des ressources radios ont été largement étudiés au sein des milieux industriels et académiques. Cependant, leur efficacité actuelle reste toujours à perfectionner et de nouvelles techniques d'allocation de ressources radios sont requises afin de satisfaire les contraintes prédéfinies des futurs systèmes de communication sans fil.

L'objectif de l'allocation de ressources est de garantir une meilleure qualité de service qui est évalué sous trois propriétés, assurer une distribution équitable de ressources, maximiser le débit et minimiser le délai, ainsi, satisfaire tous les utilisateurs.

Ce chapitre traite les différentes contraintes d'allocation de ressources. Parmi ces contraintes les phénomènes générés par le canal de propagation. Nous présentons les techniques d'allocation de ressources OFDMA et principalement NOMA dans les réseaux 5G. Nous parlons aussi du concept de l'ordonnancement puis aborder les méthodes d'optimisation pour traiter le problème d'affectation des ressources.

2.2 Les contraintes d'allocation de ressources

Dans un système de communication sans fil, le signal est transmis sous forme d'une onde électromagnétique entre un émetteur et un récepteur. Ces transmissions dépendent fortement des variations du canal de propagation. À cause de plusieurs phénomènes générés par ce dernier (le pathloss, le shadowing et le multipath fading), la qualité du signal radio est fortement détériorée. Ce qui réduit la capacité de la transmission et complique l'allocation des ressources.

2.2.1 Les pertes de propagation (pathloss)

Les pertes de propagation caractérisent l'atténuation du signal à cause du trajet séparant l'émetteur du récepteur et de l'environnement de propagation [8]. En effet, le signal émis est souvent soumis à plusieurs phénomènes liés à l'environnement de propagation (Réflexion, Diffraction, Diffusion). Pour un environnement donné, les pertes de propagation dépendent de la distance de référence $d_0 = 1Km$, la distance entre un utilisateur et une station de base notée d , la fréquence et la hauteur de la station de base ainsi que la hauteur de la station mobile [23]. Ces pertes sont généralement exprimées en décibels.

2.2.2 L'effet de masque (shadowing)

L'effet de masquage ou zone d'ombre est dû à la présence d'obstacles importants entre l'émetteur et le récepteur (immeubles ou forêts). L'onde électromagnétique traversant ces obstacles subit une atténuation de puissance en fonction de la nature du matériau traversé [24].

Le shadowing est souvent décrit sous la forme d'une variable aléatoire, de type log-normale [25].

2.2.3 Multipath fading (Fast fading)

L'évanouissement du signal est un phénomène qui perturbe fortement la transmission et limite les performances d'un système de communication. C'est un effet aléatoire et souvent résultant des trajets multiples. Ces différents trajets génèreront à la réception, plusieurs versions du signal transmis, possédant chacune une atténuation spécifique [24]. La figure 2.1 décrit ce phénomène d'évanouissement du signal.

Différents modèles de variables aléatoires sont utilisés pour modéliser le phénomène d'évanouissement, les plus courants étant le canal avec un évanouissement de Rayleigh, de Rice ou de Nakagami [15].

Lors de la propagation multi-trajets, deux situations de propagation sont généralement distinguées, LOS (Line Of Sight), lors de la présence d'une ligne de vue directe entre l'émetteur et le récepteur et NLOS (None Line Of Sight), lors de l'absence d'une visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur. Une fonction de probabilité du signal reçu dans l'environnement LOS suit la distribution de Rice, tandis que dans l'environnement NLOS elle suit la distribution de Rayleigh.

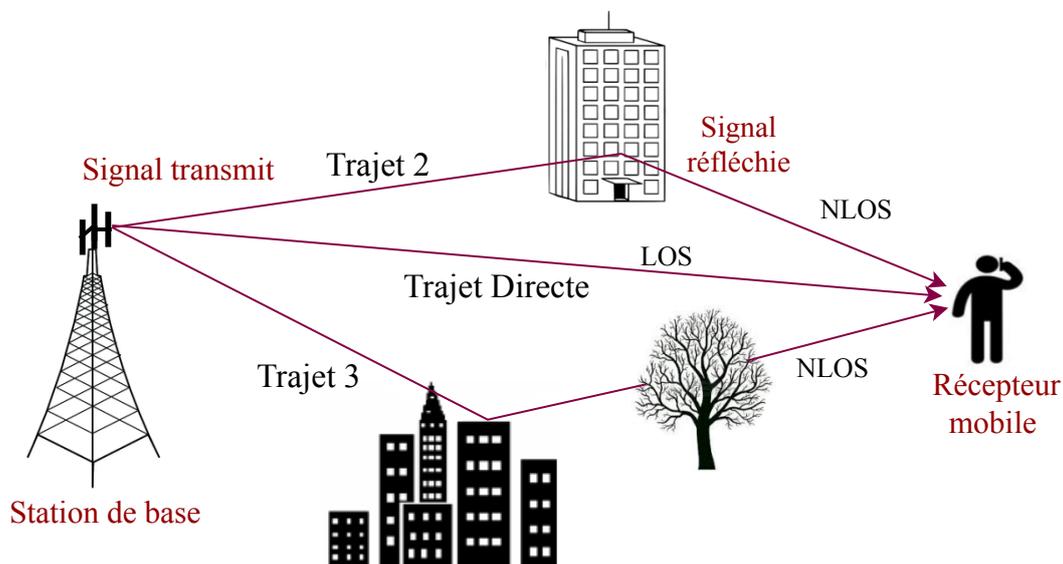


FIGURE 2.1 – Evanouissement multi-trajet.

La figure 2.2 illustre un exemple des trois processus d'évanouissement, qui montre un signal simulé, mais néanmoins réaliste, reçu par un récepteur mobile s'éloignant d'une station de base d'émission [26].

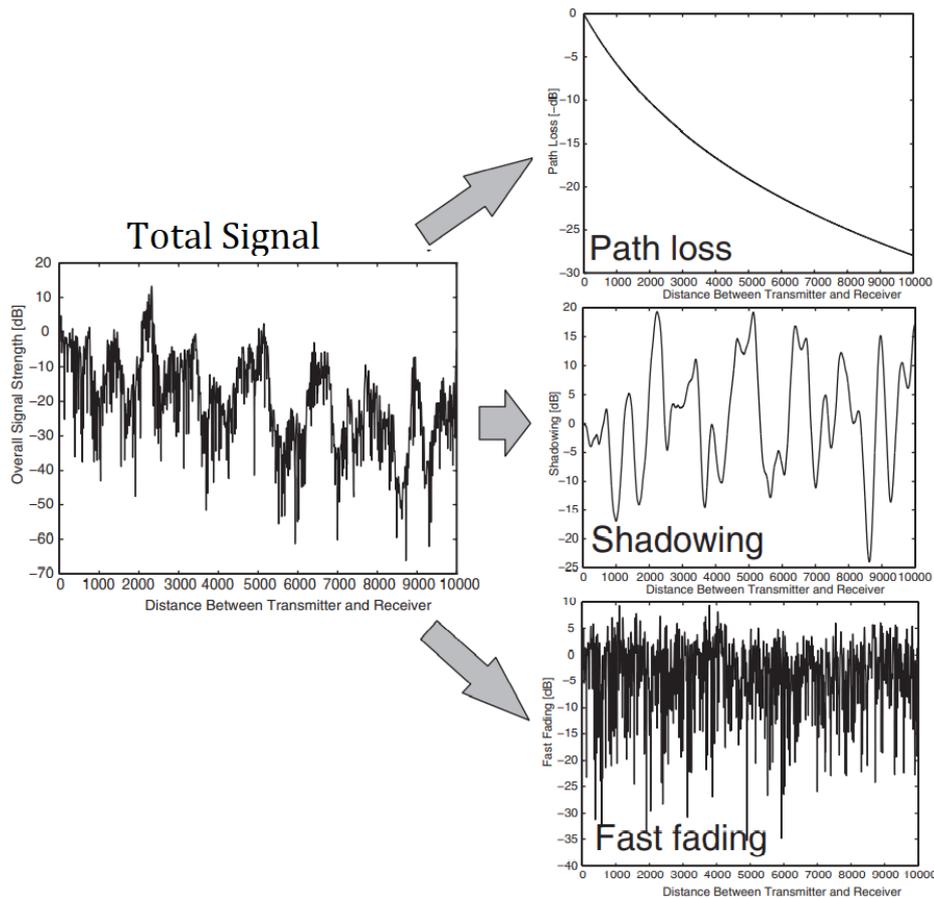


FIGURE 2.2 – Description du mécanisme de propagation à trois échelles.

2.2.4 Effet doppler

Dans un environnement urbain au centre-ville, les véhicules sont toujours en mouvement, les piétons se déplacent continuellement, par conséquent, ce mouvement relatif de l'émetteur et du récepteur provoque un décalage en fréquence. Ce phénomène est appelé l'étalement Doppler.

La fréquence apparente à la réception est décalée de l'écart Doppler qui vaut $\frac{v \cos(\alpha) f_p}{c}$ avec v la vitesse du récepteur, c la vitesse de la lumière, α l'angle entre la vitesse et la droite reliant l'émetteur au récepteur et f_p la fréquence à l'émission. Le décalage Doppler peut être très élevé lorsque la vitesse relative est plus élevée, par conséquent, le récepteur peut devenir incapable de détecter la fréquence du signal transmis.

La fréquence du signal reçu F_{recu} peut être modélisée comme suit [27] :

$$F_{recu} = f_p + \frac{v \cos(\alpha) f_p}{c}, \quad (2.1)$$

2.2.5 Mobilité dans les réseaux cellulaires

La mobilité dans les réseaux cellulaires est l'ensemble des aspects qui sont liés aux déplacements des utilisateurs ou des routeurs dans le réseau tout en assurant une continuité du service en tout lieu et à tout moment de manière transparente. Ce phénomène est appelé transfert cellulaire ou bien handover.

Le handover est le processus qui permet à un nœud mobile de changer son point d'attachement. Un nœud mobile connecté sur un réseau peut avoir le besoin de se connecter à une autre cellule soit du même réseau, soit d'un nouveau réseau, dans le but d'améliorer sa qualité de service. En général, deux types de handover sont utilisés dans les systèmes cellulaires à savoir intra et inter cellulaire.

2.2.5.1 Handover intracellulaire

Le handover intracellulaire est le transfert d'utilisateurs vers un autre meilleur canal de fréquence lorsque la qualité du canal utilisé devient trop faible pour supporter la connexion actuelle du mobile, et peut se situer entre les secteurs d'une cellule lorsqu'un utilisateur se déplace d'un secteur à un autre dans la même cellule [19], comme illustré par la figure 2.3.

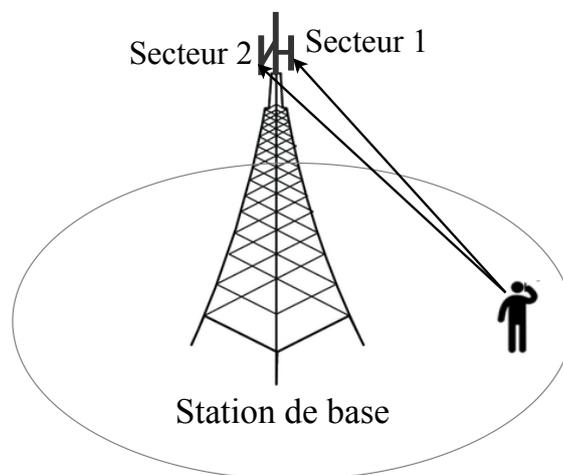


FIGURE 2.3 – Handover Intracellulaire.

2.2.5.2 Handover intercellulaire

Le transfert intercellulaire est le déplacement de l'utilisateur de la couverture radio d'une station de base (la station de base servie) à la couverture radio d'une autre station de base, comme le montre la figure 2.4. En effet, si le nombre d'utilisateurs est trop important dans la cellule et cause une congestion, alors qu'il existe des cellules voisines pouvant accueillir de nouvelles

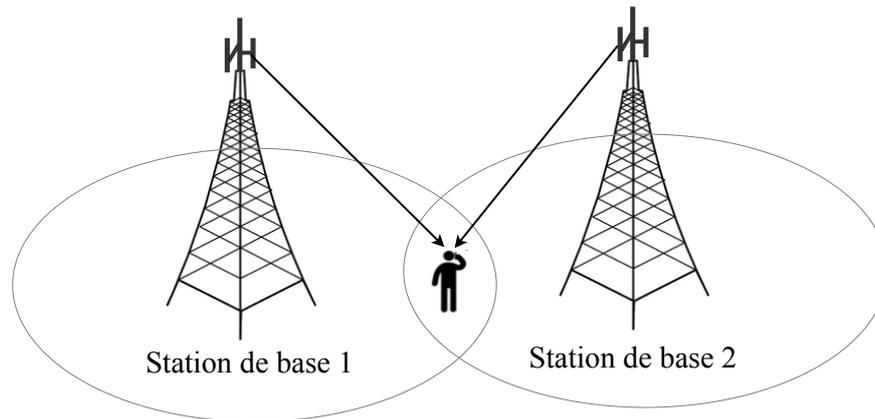


FIGURE 2.4 – Handover Intercellulaire.

stations mobiles, le mécanisme du transfert intercellulaire est réalisable [19].

La coupure de communication causée par la non disponibilité des ressources, est conçue comme le problème majeur du handover. Ce problème peut être résolu par l'introduction d'un critère de priorité concernant l'allocation des ressources. En effet, l'objectif de ce mémoire est d'assurer une distribution optimale et équitable des ressources, qui pourra s'appliquer au réseau multicellulaires.

2.3 Techniques d'allocation de ressources dans les réseaux 5G

Afin de pouvoir optimiser les réseaux des prochaines générations, il faut adopter une approche différente visant à gérer les ressources radio cruciales et rares. Ainsi, les fournisseurs de services mobiles doivent savoir comment partager les ressources du réseau, tout en déployant des efforts inlassables pour optimiser l'utilisation de leurs propres atouts.

2.3.1 La technologie OFDMA

L'OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) est une technique de modulation multi-porteuses à base de transformée de Fourier rapide. L'OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) est basée sur la technologie OFDM qui subdivise la bande passante disponible en une multitude de sous-porteuses mutuellement orthogonales plus étroites, qui peuvent transporter des flux d'informations indépendants [22].

L'OFDMA peut assigner une sous-porteuse à plusieurs utilisateurs à des intervalles de temps différents avec des caractéristiques variables.

Le bloc de ressource (RB) est le plus petit élément qui constitue les ressources physiques en LTE et 5G, c'est une grille, composée d'éléments de ressource (RE). Dans le domaine des fréquences, comme le montre la figure 2.5, la largeur de bande du système OFDMA est de 180 kHz et comprend 12 sous-porteuses de 15 kHz dans chaque RB. L'espacement est effectué de telle sorte que les sous-porteuses restent orthogonales et n'interfèrent pas l'une avec l'autre.

Dans le domaine temporel, le temps de transmission est divisé en trames d'une longueur de 10 millisecondes (ms), chaque trame est divisée en 10 sous-trames de longueur égale de 1 ms. Chaque sous-trame, correspondant à un intervalle de temps de transmission (TTI) est divisée en deux tranches de temps de taille égale de 0,5 ms, chacune d'elles se compose de sept symboles OFDM en fonction du choix du préfixe cyclique, comme le montre la figure 2.5.

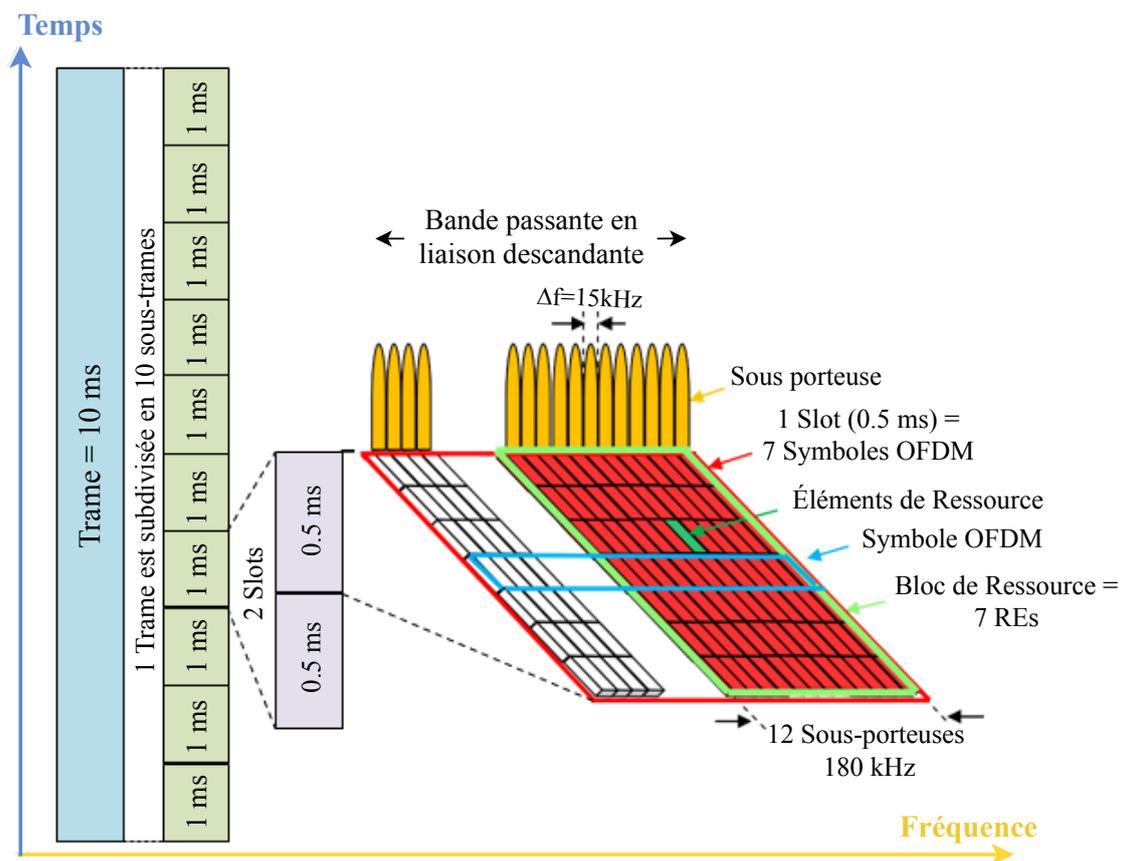


FIGURE 2.5 – Trame et grille de ressource OFDMA en lien descendant.

La technique OFDMA a été largement adoptée comme technique de multiplexage parmi ses avantages : elle offre une uniformité entre les sous-canaux et prend en charge les utilisateurs avec des exigences de qualité de service (QoS) diverses.

Le tableau 2.1, représente la relation entre le nombre de blocs de ressources (RB) transmis et la taille de la bande passante du canal [28].

TABLE 2.1 – Relation entre le nombre de RBs et la bande passante du canal.

Bande (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Nombre de RBs	6	15	25	50	75	100
Nombre de sous-porteuses occupées	72	180	300	600	900	1200

✧ Modulation multiporteuse OFDM

La modulation OFDM peut s’implanter de façon efficace en utilisant les algorithmes de transformée de Fourier rapide IFFT et FFT. C’est la disponibilité de cette technique, et la technologie, qui a permis de développer OFDM à ce jour.

Le principe de cette modulation multiporteuse consiste à transmettre les données de manière simultanée sur N sous-porteuses. Le débit global reste inchangé mais chaque porteuse est moins sensible à l’étalement des trajets sur le canal de propagation.

L’expression mathématique d’un symbole OFDM est la suivante [23] :

$$S(t) = \frac{1}{\sqrt{T_{sym}}} \sum_0^{K-1} M_k e^{\frac{j2\pi kt}{T_{sym}}} \quad 0 < t < T_s, \quad (2.2)$$

Où, T_{sym} correspond à la période du symbole et M_k est le $k^{ème}$ symbole complexe.

✧ Notion de l’intervalle de garde

Les symboles qui passent dans le canal à trajets multiples subissent des échos, un symbole émis peut parvenir au récepteur sous forme de plusieurs symboles atténués et retardés. Pour s’affranchir de ces interférences entre symboles un émetteur OFDM insère au début de chaque symbole une copie de la dernière partie du même symbole (un intervalle de garde T_G).

Grâce à cette extension, la période du symbole est plus longue, mais cela n’a aucune influence sur le spectre fréquentiel du signal. La durée totale du symbole transmis est donnée par :

$$T_{sym} = T_{sub} + T_G, \quad (2.3)$$

Il est nécessaire de choisir un temps de garde plus grand que le délai d’étalement maximal du canal τ_{max} où $T_G > \tau_{max}$.

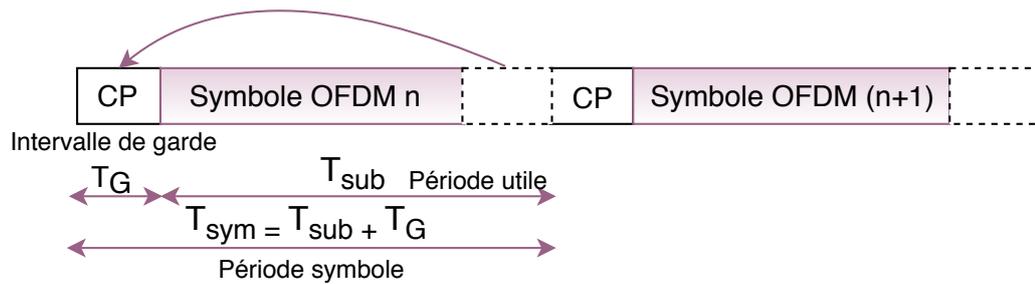


FIGURE 2.6 – Opération d’insertion du préfixe cyclique.

2.3.2 La technologie NOMA

Dans le cadre du projet METIS (*Mobile and Wireless communications Enablers for the Twenty-Two (2020) Information Society*), NTT DoCoMo a proposé NOMA une technique d’accès multiple non orthogonale comme candidat potentiel pour la technologie d’accès radio 5G [3].

2.3.2.1 De l’OFDMA à NOMA

Malgré tous les avantages que l’OFDMA apporte à un système, elle ne permet pas la réutilisation des fréquences au sein d’une cellule, car une sous-porteuse dans une cellule OFDMA est allouée à un seul utilisateur, ce qui limite le débit cellulaire. Contrairement à la technique d’accès NOMA qui permet à plusieurs utilisateurs de partager la sous-porteuse en même temps au sein d’une cellule, ce qui offre un débit et une équité plus élevés [22].

NOMA consiste à exploiter un nouveau domaine de multiplexage utilisateur, le domaine de la puissance, en avantage de la différence de gain de canal entre les utilisateurs appariés sur la même sous-porteuse [29]. Cependant, la conception d’un ordonnanceur appliquant un multiplexage non orthogonal doit être soigneusement adressé pour permettre une exploitation complète des potentiels NOMA [30].

2.3.2.2 Concept de base de NOMA

NOMA exploite le codage de superposition à l’émetteur et l’annulation d’interférence successive (SIC) au récepteur, multiplexant ainsi les utilisateurs dans le domaine de la puissance.

Dans ce mémoire, nous considérons seulement l’allocation de ressources dans un réseau cellulaire à liaison descendante, car c’est le point d’intérêt de notre étude.

❖ Downlink NOMA

En liaison descendante, NOMA utilise un mécanisme d'allocation de puissance où des puissances de transmission élevées sont utilisées pour les utilisateurs avec de mauvaises conditions de canal et vice versa [3]. En effet, les utilisateurs peuvent être servis par la BS en même temps/code/fréquence, mais avec un niveau de puissance différent. Cependant, les signaux de message de forte puissance provoquent des signaux parasites forts.

Supposant un système NOMA avec une seule BS desservant K utilisateurs, B est la bande passante du système et N le nombre des sous-porteuses. Spécifiquement la BS va transmettre dans chaque sous-porteuse n un signal superposé S_n qui peut être exprimé comme suit [31] :

$$S_n = \sum_{i=1}^{k_n} \sqrt{p_{i,n}} x_{i,n}, \quad (2.4)$$

Où, $x_{i,n}$ représente le signal de message modulé destiné à l'utilisateur i dans la $n^{\text{ème}}$ sous porteuse, $p_{i,n}$ est la puissance allouée à l'utilisateur i dans la $n^{\text{ème}}$ sous-porteuse, k_n représente le nombre total d'utilisateurs dans la même sous-porteuse n .

La puissance allouée à un utilisateur dépend des puissances des autres utilisateurs, dans la même sous-porteuse n , la puissance allouée P_n est donnée par [30] :

$$P_n = \sum_{i=1}^{k_n} p_{i,n}, \quad (2.5)$$

La puissance totale transmise de la station de base P_{tot} est donc :

$$P_{tot} = \sum_{n=1}^N P_n, \quad (2.6)$$

Dans la $n^{\text{ème}}$ sous-porteuse le signal reçu obtenu par la superposition des signaux des k_n utilisateurs à travers le canal de transmission est donné par :

$$y_{i,n} = h_{i,n} \sum_{j=1}^{k_n} \sqrt{p_{j,n}} x_{j,n} + w_{i,n} = h_{i,n} \sqrt{p_{i,n}} x_{i,n} + h_{i,n} \sum_{j=1, j \neq i}^{k_n} \sqrt{p_{j,n}} x_{j,n} + w_{i,n}, \quad (2.7)$$

Où j représente l'utilisateur autre que le i qui se trouve dans la même sous-porteuse, $h_{i,n}$ correspond au gain du canal modélisé comme un canal à évanouissement de rayleigh entre la BS et l'utilisateur i et $w_{i,n}$ représente le bruit blanc gaussien additif (AWGN) plus les interférences (avec une densité spectrale de puissance N_0).

On peut voir d'après l'équation (2.7) qu'à la fin de la réception, le signal reçu par l'utilisateur inclut son signal souhaité, mais également les signaux d'interférences provenant d'autres utilisateurs. Pour avoir le signal utile, le récepteur utilise l'annulation d'interférence successive (SIC).

Pour les utilisateurs avec un faible SINR, les signaux des autres utilisateurs peuvent être directement détectés comme du bruit pour démoduler leurs propres signaux. Pour les utilisateurs avec un SINR élevé, les signaux de tous les utilisateurs dont le SINR est inférieur au leur sont démodulés et supprimés du signal superposé reçu pour éliminer les interférences, puis détectent leur propre signal souhaité.

L'ordre de décodage optimal de SIC dans la $n^{\text{ème}}$ sous porteuse est dans l'ordre décroissant des forces des canaux des utilisateurs, déterminé par $\varphi_{i,n} = |h_{i,n}|^2/N_0$, tel que $\varphi_{1,n} \geq \varphi_{2,n} \geq \dots \geq \varphi_{i,n}$.

Si le SIC est parfait, le SINR de l' $i^{\text{ème}}$ utilisateur dans la $n^{\text{ème}}$ sous-porteuse, $\gamma_{i,n}$ peut ainsi s'écrire [31] :

$$\gamma_{i,n} = \frac{p_{i,n}|h_{i,n}|^2}{\sum_{j=1, j \neq i}^{k_n} p_{j,n}|h_{i,n}|^2 + N_0}, \quad (2.8)$$

En utilisant la formule de Shannon, le débit de données réalisable de l'utilisateur i dans la $n^{\text{ème}}$ sous-porteuse peut être exprimé comme suit :

$$R_{i,n} = B \log_2(1 + \gamma_{i,n}), \quad (2.9)$$

Le débit total dans la $n^{\text{ème}}$ sous-porteuse est donné par :

$$R_n = \sum_{i=1}^{k_n} R_{i,n}, \quad (2.10)$$

- **NOMA avec deux utilisateurs**

La figure 2.7 présente un système NOMA simple composé d'une seule BS et de deux utilisateurs l'un au centre de la cellule (utilisateur 1) et l'autre au bord de la cellule (utilisateur 2), chacun équipé avec une seule antenne. La largeur de bande de transmission globale du système B est supposée être de 1 Hz.

D'après la figure 2.7, l'utilisateur 1 a un gain de canal plus élevé que l'utilisateur 2, $|h_1|^2/N_0 > |h_2|^2/N_0$, dans ce cas seul l'utilisateur 1 exécute le SIC. Il décode d'abord x_2 , le signal de l'utilisateur 2, et le soustrait du signal reçu y_1 , puis décode son propre signal ; l'utilisateur 2 considère le signal de l'utilisateur 1 comme du bruit et détecte directement son propre signal [32].

Avec un gain de canal plus faible et plus d'interférences, l'utilisateur 2 se voit attribuer une puissance plus élevée par rapport à l'utilisateur 1 afin d'augmenter son SINR et garantir ainsi l'équité.

Le débit de chacun des utilisateurs 1 et 2 est donné respectivement :

$$R_1 = \log_2\left(1 + \frac{p_1|h_1|^2}{N_0}\right), \quad (2.11)$$

$$R_2 = \log_2\left(1 + \frac{p_2|h_2|^2}{p_1|h_2|^2 + N_0}\right), \quad (2.12)$$

D'après les équations (2.11) et (2.12), nous constatons que la BS peut contrôler de manière flexible le débit de chaque utilisateur en ajustant le rapport d'allocation de puissances, P_1/P_2 . De toute évidence, le débit cellulaire global, le débit de bord de cellule et l'équité entre les utilisateurs sont étroitement liés au regroupement d'utilisateurs et au schéma d'allocation de puissance selon leurs positions dans la cellule, par conséquent, une interface radio flexible est nécessaire pour utiliser le gain potentiel du NOMA.

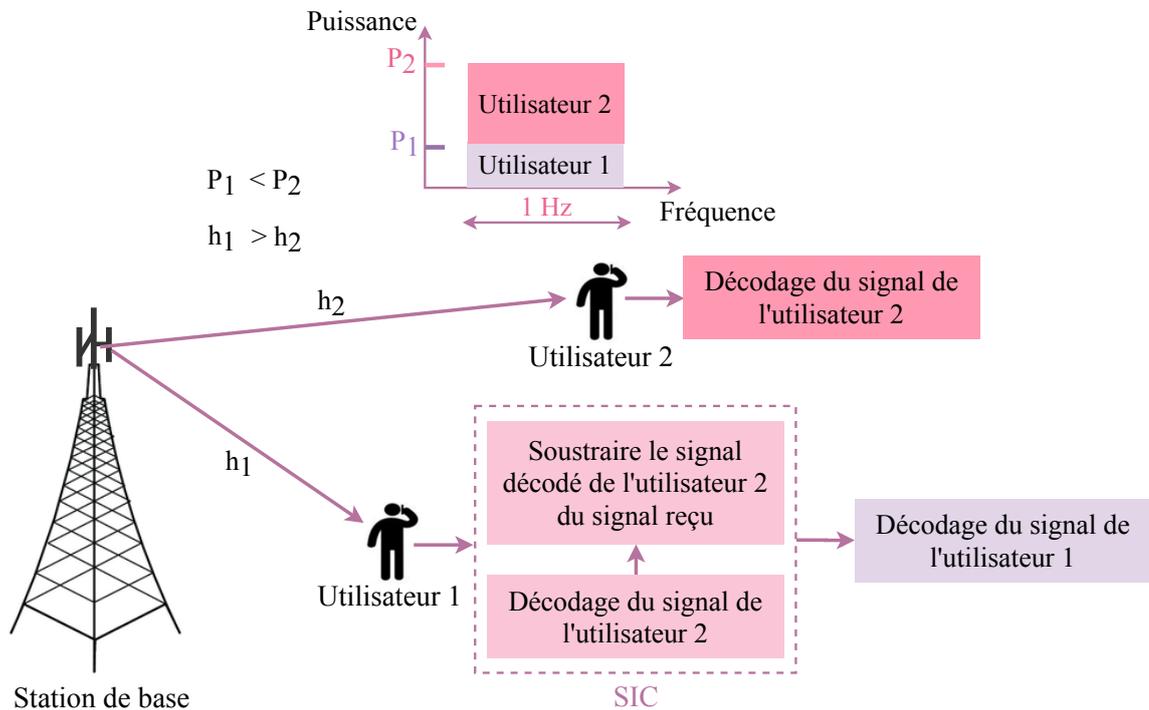


FIGURE 2.7 – NOMA en liaison descendante dans une seule cellule avec une station de base et 2 utilisateurs.

- **Comparaison avec OFDMA**

Dans OFDMA, différents signaux UE sont émis à des ressources de fréquence différentes mais avec la même puissance, contrairement à NOMA, différents signaux UE sont transmis à la même fréquence mais à des niveaux de puissance différents selon la position de l'UE dans la cellule. Selon [29], le gain de performance de la technologie NOMA par rapport à celui de la technologie OFDMA augmente lorsque la différence dans le gain de canal est importante.

Dans le cas général où il y a K utilisateurs dans la cellule le débit de chaque utilisateur i dans la $n^{\text{ème}}$ sous-porteuse, est donné par :

$$R_{i,n} = B \log_2 \left(1 + \frac{P_{i,n} |h_{i,n}|^2}{N_0} \right), \quad (2.13)$$

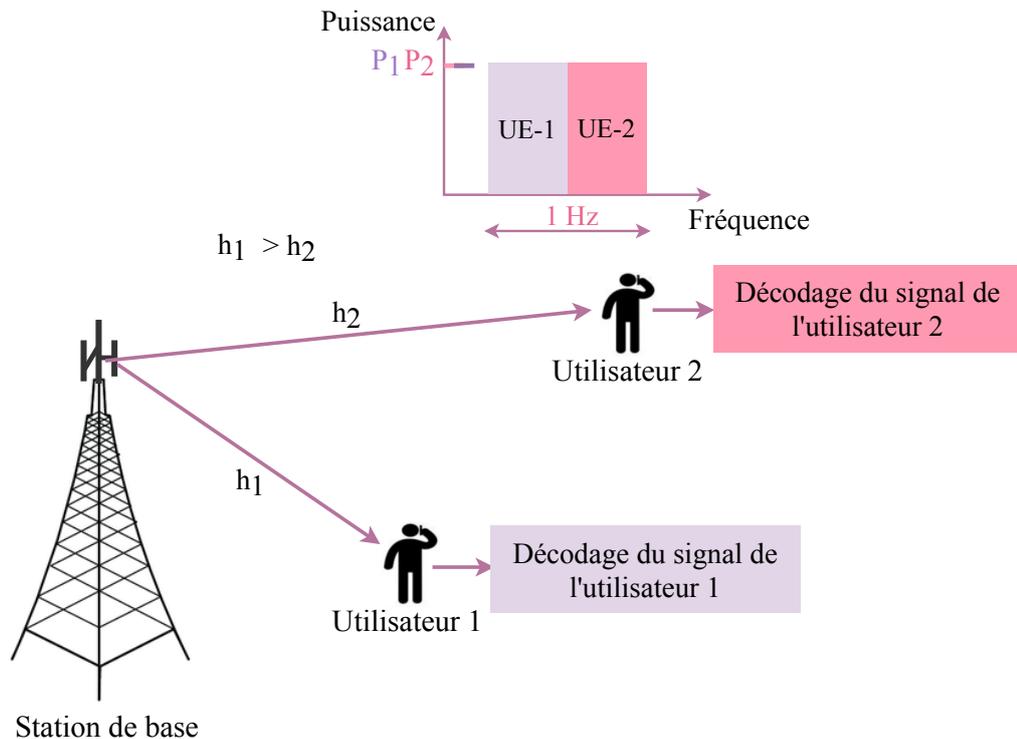


FIGURE 2.8 – OFDMA en liaison descendante dans une seule cellule avec une station de base et 2 utilisateurs.

2.3.2.3 Avantages de NOMA

NOMA domine l'accès multiple orthogonal (OMA) sous plusieurs aspects, tels que [33] :

- Elle atteint une efficacité spectrale supérieure en desservant plusieurs utilisateurs en même temps et avec la même ressource de fréquence, et en atténuant les interférences via SIC,
- Elle augmente le nombre d'utilisateurs servis simultanément et peut ainsi prendre en charge une connectivité massive,
- L'utilisateur n'a pas besoin de passer par un intervalle de temps programmé pour transmettre ses informations, par conséquent, il subit une latence plus faible,
- NOMA peut maintenir l'équité des utilisateurs et une qualité de service diversifiée par un contrôle flexible de la puissance entre les utilisateurs forts et faibles.

2.3.3 Comparaison entre OMA et NOMA

Jusqu'à très récemment, les systèmes de communication sans fil utilisaient des techniques orthogonales à accès multiple (OMA), dans lesquelles les ressources sont allouées orthogonalement à plusieurs utilisateurs. (FDMA, TDMA, CDMA, OFDMA), ces ressources peuvent être dans le domaine du temps, de la fréquence ou du code.

Idéalement, en OMA, l'interférence intracellulaire n'existe pas en raison de l'allocation orthogonale des ressources entre les utilisateurs. Pour cette raison, les informations de plusieurs utilisateurs peuvent être récupérées avec une faible complexité. Néanmoins, le nombre d'utilisateurs desservis est limité par le nombre de ressources orthogonales.

Inversement, NOMA dessert plusieurs utilisateurs simultanément en utilisant les mêmes ressources spectrales ; cependant, au prix d'une augmentation des interférences intracellulaires. Pour atténuer ces dernières, NOMA exploite l'annulation d'interférence successive (SIC) au niveau des récepteurs [29].

De plus, NOMA prend en charge une faible latence de transmission et le coût de la signalisation par rapport à OMA conventionnel où chaque utilisateur est obligé d'envoyer une demande de programmation de canal à sa station de base de desserte [3].

Bien que les techniques OMA aient fourni des gains acceptables, pour la 5G compte tenu de l'efficacité spectrale et des exigences de l'Internet des objets (IoT), les techniques NOMA apportent un meilleur choix en matière de qualité de service.

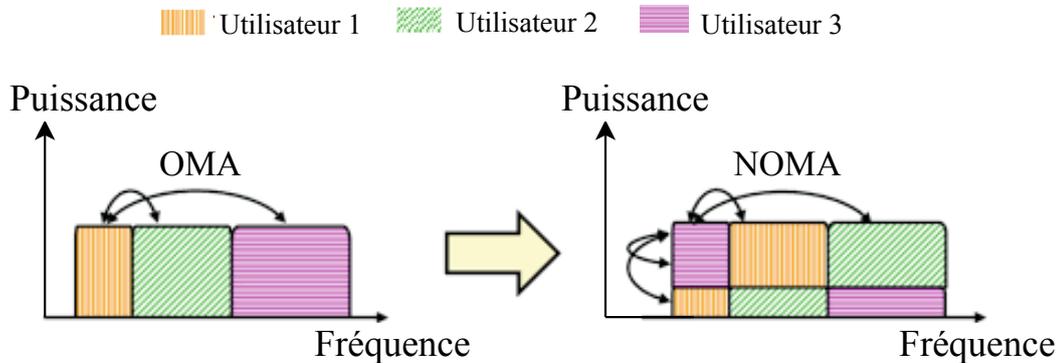


FIGURE 2.9 – Comparaison entre OMA et NOMA.

2.4 Les ordonnanceurs d'allocation de ressources

Afin de répondre aux exigences de plus en plus croissantes des réseaux sans fil, les techniques de multiplexage OFDMA et NOMA ne suffisent pas à elles seules. En effet, elles doivent être combinées avec des algorithmes d'allocation de ressources efficaces qu'on appelle ordonnanceur ou *scheduler* en anglais, dans le but d'améliorer les performances du système en augmentant l'efficacité spectrale et l'équité dans le réseau. Il est donc essentiel de trouver un compromis entre l'efficacité (augmentation en débit) et l'équité entre les utilisateurs.

2.4.1 Principe d'ordonnancement (scheduling)

Plusieurs définitions ont été proposées pour l'ordonnancement. Pinedo [34] l'a défini comme suit « Ordonnancement concerne l'affectation de ressources limitées aux tâches dans le temps, c'est un processus de prise de décision dont le but est d'optimiser un ou plusieurs objectifs ».

L'ordonnanceur doit être implémenté au niveau de la station de base, il est chargé de faire le lien entre les buffers et l'interface radio, c'est le responsable de l'allocation des ressources radios, comme il est montré par la figure 2.10.

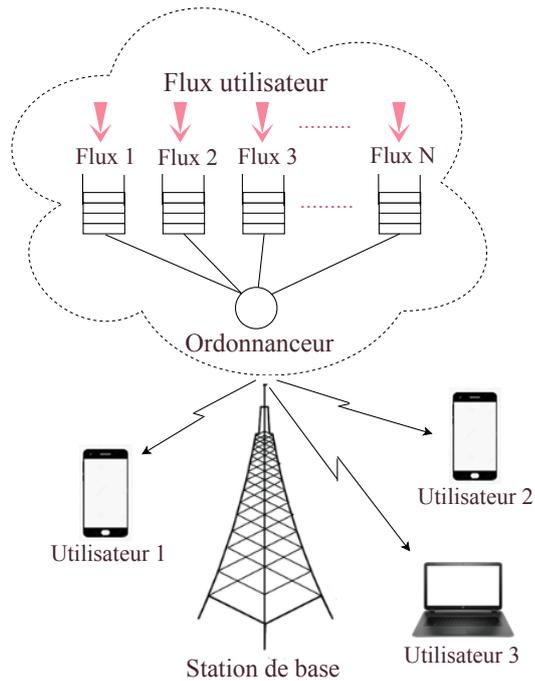


FIGURE 2.10 – L’ordonnancement.

Dans les réseaux cellulaires l’accès au canal est déterminé par l’ordonnanceur, il exploite les informations sur l’état du canal CQI (*Channel Quality Indicator*) ; qui sont dérivées en fonction de l’estimation du SINR, c’est-à-dire le gain de canal sur chaque sous-porteuse à cause des pertes de trajets, de l’effet de masque et de l’évanouissement par trajets Multiples. Ces informations sont supposées être connues à la fois dans la station mobile et dans la station de base.

L’attribution des sous-porteuses est effectuée dans la BS et les utilisateurs sont informés des sous-porteuses choisies pour eux [35].

L’objectif est de trouver une allocation de sous-porteuses, qui permet à chaque utilisateur de satisfaire ses exigences de débit, sans compromettre l’équité.

Le système est illustré par la figure 2.11.

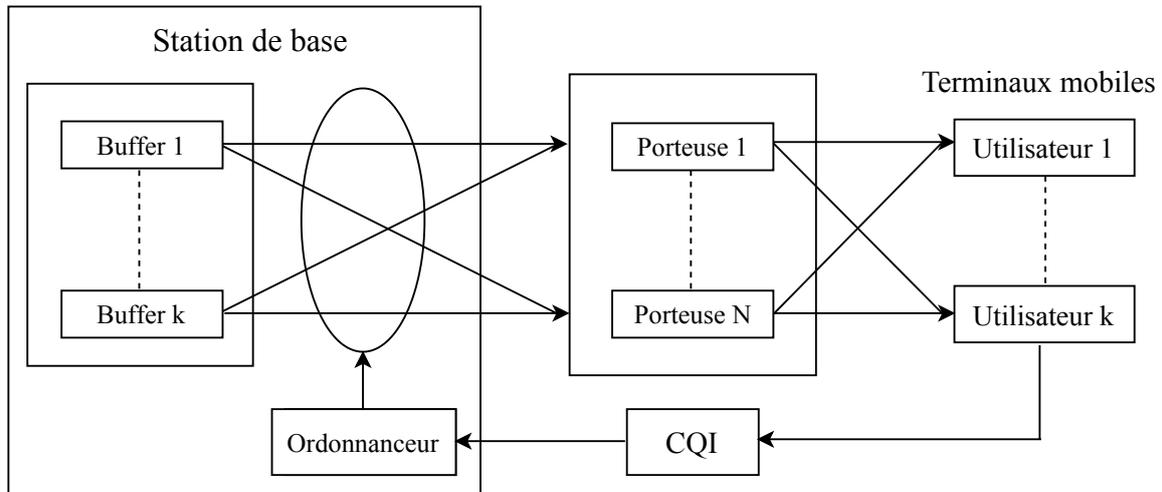


FIGURE 2.11 – Fonctionnement de l'ordonnanceur pour les réseaux radios mobiles.

2.4.2 Les algorithmes d'ordonnement

Les algorithmes d'ordonnement sont utilisés pour distribuer les ressources parmi les parties qui les demandent de manière simultanée et asynchrone.

Ces algorithmes sont répartis en trois grandes familles, à savoir les algorithmes classiques, les algorithmes équitables qui sont des algorithmes d'ordonnement non-opportunistes, ils ne prennent pas en compte la qualité du canal, et enfin, les algorithmes opportunistes qui sont plus complexes.

2.4.2.1 Les algorithmes classiques

• Round Robin (RR)

C'est le plus simple et le plus connu des algorithmes d'ordonnement qui différencie les flux. Les ressources radio (ou time slots) sont allouées une par une, tour à tour, et distribuées équitablement entre les utilisateurs d'une cellule.

Cependant, dans un contexte radio, il n'y a aucune équité en termes de débit ou tout autre métrique de qualité de service, de plus cet ordonnanceur ne tient pas en compte des capacités fluctuantes des interfaces ni des exigences des applications en termes de QoS, de ce fait, il est considéré moins efficace. N'empêche la facilité d'implémentation de cet algorithme dans le cadre des réseaux cellulaires reste un grand avantage.

2.4.2.2 Les algorithmes équitables

Plusieurs efforts ont été effectués afin de corriger les insuffisances des algorithmes précédents, et concevoir des algorithmes d'ordonnancement plus améliorés. Certes ils sont plus complexes mais ils permettent une meilleure efficacité et équité.

• **Fair Queuing (FQ)**

Le principe de fonctionnement de l'algorithme FQ consiste à partager les ressources de façon à obtenir un débit équitable entre tous les utilisateurs. En effet, pour K utilisateurs et pour un lien qui supporte un débit D , chaque utilisateur est servi avec un débit D/K .

Le FQ assure une meilleure équité que le Round Robin puisqu'il assure le même débit à chaque utilisateur. Cependant, la différenciation de services est complètement ignorée. En effet, si un utilisateur justifie un besoin en matière de débit supérieur au débit moyen D/K , il reste toujours pénalisé face aux autres, par conséquent, sa demande ne pourra pas être satisfaite et la qualité de service reste inexistante [20].

• **Weighted Fair Queuing (WFQ)**

L'algorithme WFQ est une variante du Fair Queuing, permet de spécifier, pour chaque flux, quelle ressource sera allouée. Il tient en compte une différenciation entre les services en donnant la priorité aux utilisateurs qui ont besoin d'un débit plus élevé.

Cet algorithme utilise des poids pour privilégier certains utilisateurs en leur accordant d'avantage de ressources et ainsi garantir des différents débits entre chaque utilisateur ce qui permet de contrôler la qualité de service.

Cependant cet ordonnanceur ne tient pas compte de l'état du canal qui sépare la station de base des utilisateurs et c'est le même défaut pour les autres ordonnanceurs classiques.

• **Max-Min Fair (MMF)**

Son principe consiste à distribuer les ressources entre les utilisateurs d'une manière successive et cyclique. Les ressources allouées aux utilisateurs ne s'arrêtent jusqu'à satisfaire tous les utilisateurs, quand chacun atteint son débit souhaité ou jusqu'à l'épuisement des ressources. L'algorithme se termine donc lorsque la capacité du lien est atteinte.

Les utilisateurs qui demandent de faibles débits seront pratiquement toujours satisfaits et le reste des ressources non consommées par ces derniers seront à leur tour équitablement partagées entre les utilisateurs non satisfaits ceux qui demandent plus de débit mais elles restent toujours insuffisantes à leur satisfaction [36].

2.4.2.3 Les algorithmes opportunistes

Dans ces ordonnanceurs la priorité est donnée aux utilisateurs avec un état de canal relativement favorable dans le but d'optimiser l'allocation des ressources et de maximiser le débit des réseaux sans fil. Parmi les algorithmes opportunistes : *Maximum Signal-to-Noise* (MaxSNR), et *Proportional Fair* (PF).

• **Maximum Signal to Noise Ratio (MaxSNR)**

Les ressources sont allouées une par une à l'utilisateur qui a la plus grande valeur de SNR sur la ressource considérée. Cette stratégie est également connue sous le nom de *Maximum Carrier to Interference ratio* (MaxC/I).

Le principe de cet ordonnanceur est de maximiser le nombre de bits qui peuvent être transmis pendant un intervalle de temps sur la sous-porteuse n vers l'utilisateur i .

La métrique de priorité pour l'ordonnanceur MaxSNR pour l' $i^{\text{ème}}$ utilisateur est exprimée comme suit [37] :

$$i^* = \underset{i}{\operatorname{argmax}} (r_{i,n}) \quad i = 1 \dots K, \quad (2.14)$$

Où i^* est l'utilisateur sélectionné par l'ordonnanceur, $r_{i,n}$ représente le débit instantané de l' $i^{\text{ème}}$ utilisateur et K représente le nombre total d'utilisateurs actifs.

Les ressources seront toujours allouées en priorité à l'utilisateur qui a la meilleure qualité de canal (par exemple, l'utilisateur le plus proche de la station de base). Par conséquent, les autres mobiles ne pourront pas accéder au canal [20]. Cette approche est donc loin d'être équitable.

• **Proportional Fair (PF)**

Le PF a été conçu pour résoudre le problème mis en avant avec le MaxSNR, Permet d'incorporer un certain degré d'équité tout en gardant les bénéfices du MaxSNR en termes de maximisation du débit.

L'algorithme PF est le plus couramment utilisé dans la majorité des travaux qui traitent de NOMA [29], Il est reconnu pour sa simplicité et ses très bonnes performances.

Le principe de cet ordonnanceur consiste à attribuer un intervalle de temps de la sous-porteuse n à l' $i^{\text{ème}}$ utilisateur qui présente les conditions de canal les plus favorables (un CQI élevé) par rapport à sa moyenne [37]. En effet, à chaque TTI, la station de base connaît l'état de canal de chaque utilisateur (de manière équivalente son débit réalisable).

L'algorithme d'ordonnancement garde une trace du débit moyen de chaque utilisateur dans une fenêtre de longueur T_c . Dans le temps slot t , l'utilisateur i^* est sélectionné pour être servi basé sur [38] :

$$i^* = \underset{i}{\operatorname{argmax}} \left(\frac{r_{i,n}}{M_{i,n}} \right) \quad i = 1 \dots K, \quad (2.15)$$

Où, $r_{i,n}$ correspond au débit instantané de l' $i^{\text{ème}}$ utilisateur dans la $n^{\text{ème}}$ sous-porteuse au $t^{\text{ème}}$ intervalle de temps de transmission, $M_{i,n}$ est le débit moyen de l'utilisateur i calculé sur une fenêtre glissante de longueur T_c .

Après qu'un morceau est alloué à un utilisateur spécifique, le débit de données moyen sur cet utilisateur sera mis à jour par l'équation suivante [35] :

$$M_{i,n}(t+1) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{T_c}\right) M_{i,n}(t) + \frac{1}{T_c} r_{i,n}(t) & i = i^* \\ \left(1 - \frac{1}{T_c}\right) M_{i,n}(t) & i \neq i^*, \end{cases} \quad (2.16)$$

Ainsi, un utilisateur est choisi par l'ordonnanceur si le débit instantané obtenu est bon par rapport à son débit moyen. De cette façon, chaque utilisateur a une chance d'être élu et de se voir allouer des ressources.

Grâce à cette stratégie d'allocation, le PF attribue une part égale de bande passante à tous les mobiles. Par conséquent, une hiérarchie d'équité de niveau 1 est fournie par l'ordonnanceur PF, ce qui constitue une véritable percée par rapport au MaxSNR [37].

Cependant, un inconvénient majeur persiste, il est impossible de gérer les utilisateurs ayant un type de trafic non-uniforme avec des débits variables et/ou de différentes contraintes de QoS telles que le retard minimal à ne pas dépasser. De ce fait, il n'est pas adapté aux services multimédias.

2.5 Algorithmes d'optimisation

L'optimisation est une branche des mathématiques qui permet de résoudre des problèmes en déterminant le meilleur élément d'un ensemble selon certains critères prédéfinis [39].

Malgré la création d'ordinateurs de plus en plus performants, il n'existe pas de solution déterministe qui donne le résultat en un temps raisonnable. Pour pallier à ce problème, on a recours à des méthodes dites heuristiques, c'est-à-dire des méthodes qui fournissent une solution approchée. Plusieurs algorithmes heuristiques ont été adoptés dans les scénarios NOMA pour l'allocation des ressources [32].

On retrouve parmi ces heuristiques certains algorithmes qui s'appliquent à plusieurs problèmes d'optimisation. On les appelle des méta-heuristiques. La majorité des algorithmes utilisés sont les métaheuristiques à population. Parmi celles-ci, nous intéressons dans ce mémoire à l'Optimisation par Essaim PSO, pour la résolution du problème d'allocation de ressources par les algorithmes d'ordonnancement vu précédemment.

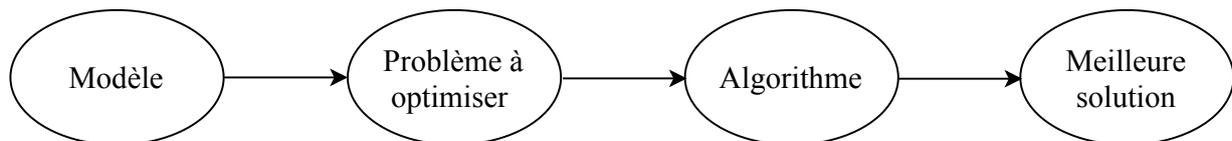


FIGURE 2.12 – Décomposition du processus d'optimisation.

2.5.1 Optimisation par essaim des particules (PSO)

2.5.1.1 Présentation du PSO

L'Optimisation par Essaim de Particules (OEP), connue sous le nom anglophone de Particle Swarm Optimization (PSO), est un algorithme inscrit dans la famille des algorithmes évolutionnaires, et se révèle particulièrement efficace pour les problèmes d'optimisation à variables continues. Il a été proposé par Russel Eberhart et James Kennedy en 1995 [40].

PSO, dérive de la descente stochastique : on part d'une solution initiale, on la compare à tous ses voisins en conservant à chaque fois le meilleur résultat.

Cette méthode s'inspire fortement de l'observation des relations grégaires d'oiseaux migrateurs, qui pour parcourir de longues distances, doivent optimiser leurs déplacements en termes d'énergie dépensée, de temps, (etc.), comme par exemple la formation en forme de V présentée dans la Figure 2.13



FIGURE 2.13 – Volée d’Anser en formation en V [41].

2.5.1.2 Fonctionnement de base du PSO

En réalité, il existe deux types d’algorithmes de PSO : le PSO discret, et le PSO continu, Dans ce mémoire nous allons nous intéresser uniquement au PSO continu.

L’algorithme PSO travaille sur une population appelée essaim de solutions possibles, chaque individu du groupe est dit particule qui est considérée comme une solution du problème. Ces particules sont placées aléatoirement dans l’espace de recherche de la fonction objectif « fitness », qui permet de mesurer le degré d’optimalité [39].

Tout au long de l’exécution de cet algorithme, les particules se déplacent dans l’espace de recherche et évaluent constamment la valeur de leur position courante. Si cette valeur respecte un certain seuil, la particule s’établit alors à ce point. Autrement dit lorsque la fitness d’une position pour une particule augmente sa vitesse diminue.

Cependant, chacune des particules dispose d’un sous-ensemble d’autres particules avec lesquelles elle est en interaction, c’est le voisinage de la particule.

Une particule j de l’essaim dans un espace de recherche D , est modélisée par son vecteur position et son vecteur vitesse respectivement ; formulés ainsi [42] :

$$X_j = (x_j^1, x_j^2, \dots, x_j^D), \quad (2.17)$$

$$V_j = (v_j^1, v_j^2, \dots, v_j^D), \quad (2.18)$$

L’essaim dans PSO ne se limite pas à ses mouvements, mais recherche en permanence la solution optimale dans son voisinage.

Au cours des itérations, chaque particule j change de position, et garde en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, également appelée la meilleure position de l'historique local notée $lpbest_j$, en vue d'atteindre la meilleure position globale qui est la meilleure position de son voisinage notée $gbest$.

$$lpbest_j(ite\text{r}) = (lpbest_j^1, lpbest_j^2, \dots, lpbest_j^D), \quad (2.19)$$

$$gbest(ite\text{r}) = \max(lpbest_j(ite\text{r})), \quad (2.20)$$

Les équations de mise à jour pour la vitesse et la position des particules sont les suivantes [43] :

$$v_j(ite\text{r} + 1) = z(w v_j(ite\text{r}) + c_1 r_1(lpbest_j - x_j(ite\text{r})) + c_2 r_2(gbest - x_j(ite\text{r}))), \quad (2.21)$$

$$x_j(ite\text{r} + 1) = x_j(ite\text{r}) + v_j(ite\text{r} + 1), \quad (2.22)$$

Où, $ite\text{r}$ est le numéro d'itération, z est le facteur de construction, c_1 et c_2 sont les coefficients d'accélération, r_1 et r_2 sont des nombres aléatoires uniformément répartis dans la plage $[0, 1]$, w est une constante, appelée coefficient d'inertie. C'est un paramètre variable permettant de bien contrôler le déplacement de la particule à la prochaine itération, et de bien contrôler la vitesse trouvée à chaque itération il est calculé par la formule suivante [23] :

$$w = \frac{\max_{ite\text{r}} - ite\text{r}}{\max_{ite\text{r}}}, \quad (2.23)$$

Le processus de mise à jour est essentiellement basé sur trois composantes [44] :

1. Le premier terme $w v_j(ite\text{r})$ représente la composante d'inertie du déplacement, $V_j(ite\text{r})$ est la vitesse précédente de la particule ; il sert de mémoire en empêchant la particule de changer radicalement de direction.
2. Le second terme $c_1 r_1(lpbest_j - x_j(ite\text{r}))$ est une expérience personnelle de la particule, également appelée composante cognitive. Ce terme a pour effet de ramener la particule à sa meilleure position, en modélisant sa tendance à revenir aux endroits les plus satisfaisants du passé.
3. Le troisième terme $c_2 r_2(gbest_j - x_j(ite\text{r}))$ représente la coopération entre particules, également appelée composante sociale. Ce terme a pour effet que chaque particule est également attirée vers la meilleure position trouvée par sa voisine.

La stratégie de déplacement d'une particule est illustrée dans la figure 2.14

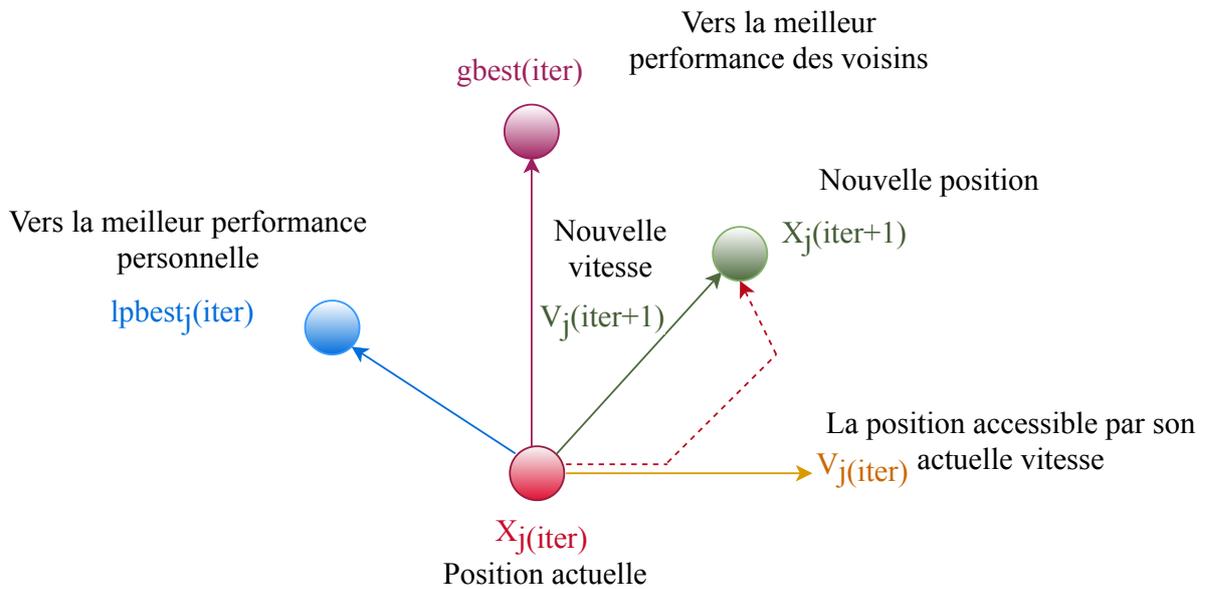


FIGURE 2.14 – Déplacement d'une particule.

Pour réaliser son prochain mouvement, chaque particule combine trois tendances :

- Suivre sa vitesse actuelle,
- Revenir vers la meilleure performance personnelle,
- Aller vers la meilleure performance des voisins.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit en général les contraintes qu'un utilisateur peut subir lors de l'allocation de ressources. Nous avons présenté la nouvelle technique NOMA ainsi que ses grands avantages qui fait d'elle une technique appropriée pour la 5G et au-delà.

Par ailleurs, nous nous sommes focalisées sur les mécanismes de gestion des ressources radios à travers les ordonnanceurs, qui permettent une meilleure efficacité et équité entre les utilisateurs. Cependant, ces algorithmes ne sont pas efficaces pour les utilisateurs ayant une mauvaise condition de canal et également lors des périodes de surcharge de la cellule.

Afin de résoudre ces problèmes d'optimisation qui est l'objectif principal de ce mémoire nous avons fait recours aux algorithmes métaheuristiques. Dans ce contexte, l'algorithme évolutionnaire PSO est proposé.

Chapitre 3

Modélisation mathématique et approche adoptée

Sommaire

3.1 Introduction	46
3.2 Description du problème d'allocation de ressources	47
3.3 Formulation des objectifs	48
3.4 Modèle global du système	49
3.5 Motivations et contexte de notre contribution	53
3.6 Implémentation de NOMA	53
3.7 Approche hybride PSO-PFS	54
3.8 Calcul des métriques d'évaluation de performances	59
3.9 Conclusion	60

3.1 Introduction

Trouver un moyen permettant de gérer au mieux les ressources est un défi majeur pour les réseaux sans fil. En effet, plusieurs approches et algorithmes ont été proposés dans la littérature pour répondre au besoin d'allouer efficacement les ressources radio.

Précédemment nous avons vu que dans le système NOMA le débit total de la cellule, le débit des utilisateurs situés au bord de la cellule et l'équité dépendent fortement de la façon dont la puissance et la bande passante sont allouées aux utilisateurs par le scheduler, il est donc important de trouver un bon compromis entre le débit total et l'équité des utilisateurs.

Cependant, dans la majorité des travaux précédents utilisant NOMA, l'ordonnanceur d'équité proportionnelle (PF) [29], est adopté, bien qu'il soit le mieux adapté comparé aux autres ordonnan-

ceurs opportunistes mais ils n'offrent pas de solution pour augmenter l'équité sans réduire le débit de chaque utilisateur.

Dans [45] une nouvelle stratégie d'allocation des ressources hybride dans les réseaux cellulaires sectoriels est proposée, basée sur l'algorithme PSO-PFS utilisant la technique OFDM, pour aider les utilisateurs qui se trouvent dans un emplacement critique. Dans ce mémoire, nous nous sommes inspirées des méthodes méta heuristiques, en appliquant la nouvelle approche d'allocation de ressources dans le système NOMA et faire une étude comparative avec le système OFDMA.

3.2 Description du problème d'allocation de ressources

L'une des exigences principales qui devrait être remplie dans les futurs réseaux mobiles est la capacité à accueillir un grand nombre d'utilisateurs avec des exigences de QoS différentes, ce qui ne peut être atteint sans des techniques spectrales efficaces.

Dans les stations de base les ordonnanceurs opportunistes utilisés pour l'allocation des ressources donnent la priorité aux utilisateurs ayant une meilleure condition de canal, les utilisateurs qui se trouvent dans des endroits critiques de la cellule où le SINR est faible, leur débit moyen chute. Cette mauvaise distribution de ressources engendre une diminution du débit et donc une diminution de la QoS. En outre, l'efficacité spectrale dans les techniques OFDMA devient faible lorsque certaines ressources, sont attribuées aux utilisateurs avec de mauvaises conditions de canal.

En d'autres termes, NOMA peut servir les utilisateurs avec différentes conditions de canal en temps opportun et leur permet d'accéder à toutes les sous-porteuses. Ce qui permet d'établir un bon équilibre entre le débit et l'équité, avec une latence ultra-faible et une efficacité spectacle élevée. Cependant, ces techniques doivent être combinées avec des ordonnanceurs.

La problématique de notre étude consiste donc à établir un bon équilibre entre le débit du système et l'équité entre les utilisateurs, tout en minimisant le délai, en utilisant une nouvelle approche basée sur deux algorithmes l'ordonnanceur opportuniste PF et l'algorithme d'optimisation PSO combinée avec la technique NOMA et observer ses performances par rapport à l'OFDMA.

3.3 Formulation des objectifs

L'objectif principal de toutes les stratégies d'allocation de ressources est d'optimiser l'utilisation du spectre fréquentiel qui est à la fois rare et parfois encombré, les objectifs attendus de cette étude sont les suivant :

3.3.1 Maximiser le débit

Aujourd'hui, ce paramètre est largement limité par les réseaux d'accès de type radio, où les ressources disponibles, malgré leur croissance d'une génération à une autre, restent limitées et coûteuses, et avec la prolifération rapide des applications multimédias ainsi que l'augmentation vertigineuse du nombre d'abonnés et leurs demandes, il est devenu une nécessité de garantir un débit maximum à chaque utilisateur du réseau.

3.3.2 Optimiser l'équité

L'équité d'un système, n'est pas toujours exprimée en termes de valeur quantitative. Il existe plusieurs sortes d'équité, on peut citer l'équité en bande et l'équité en débit. En réalité, l'équité optimale n'est pas d'assurer à tous les utilisateurs le même nombre de porteuse et le même débit mais plutôt de leur assurer le même degré de satisfaction. L'une des caractéristiques clé de NOMA est qu'elle permet d'allouer plus de puissance aux utilisateurs faibles. Par conséquent, NOMA est en mesure de garantir un compromis intéressant d'équité entre les utilisateurs en terme de débit.

3.3.3 Minimiser le délai

Différentes applications ont des délais différents qui devraient être garantis par le système, et parmi les attentes de la 5G, fournir un débit élevé avec un très faible délai pour chaque utilisateur et chaque service, afin de maintenir une meilleure qualité de service.

3.3.4 Maximiser l'efficacité spectrale et énergétique

L'efficacité spectrale (SE) et énergétique (EE) sera également un enjeu clé dans les futurs réseaux cellulaires 5G. Les efforts les plus importants pour augmenter l'efficacité énergétique d'un réseau sans fil se concentrent sur le réseau d'accès, car il consomme la plus grande partie de l'énergie.

3.4 Modèle global du système

Le système étudié est modélisé comme un système de liaison descendante dans une seule cellule tri-sectorielle avec une station de base centrée au milieu de la cellule représentant la source, et dispose de trois antennes sectorielles, comme le montre la figure 3.1. Les secteurs sont desservis par la BS ayant son propre ordonnanceur, elle transmet ses signaux aux K utilisateurs mobiles qui sont uniformément répartis sur la surface de la cellule, à travers les N sous-porteuses.

Dans ce modèle, nous proposons une allocation de ressources en tenant compte de la position des utilisateurs ainsi que la charge des secteurs. Cependant, la qualité de service ne peut être garantie lorsque les utilisateurs se trouvent dans des endroits critiques, dans les régions de chevauchement des secteurs qui sont sujette à des interférences ou à la limite de la cellule.

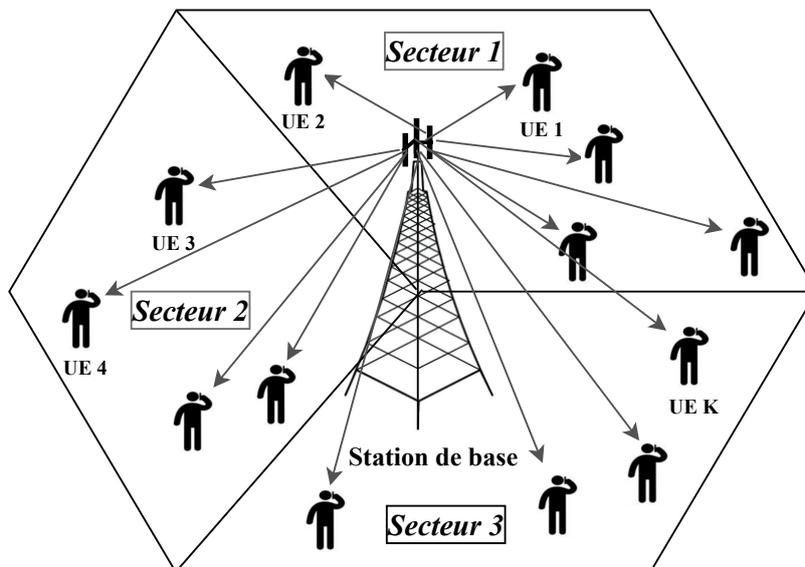


FIGURE 3.1 – L'architecture de la cellule de déploiement.

3.4.1 Localisation des utilisateurs dans la cellule

Une fois que les utilisateurs sont répartis aléatoirement dans la cellule, nous calculons la distance entre chaque utilisateur i et la BS notée par $d_{i,s}$, en fonction du secteur s , afin de trouver la position de chaque utilisateur qui a une relation directe avec l'état de canal (SINR), elle est calculée par la formule suivante :

$$d_{i,s} = \sqrt{(x_s - x_i)^2 + (y_s - y_i)^2}, \quad (3.1)$$

3.4.2 Modélisation du canal radio

Dans ce mémoire nous nous intéressons à l'environnement NLOS, notre simulation sera donc modélisée par un canal d'évanouissement Rayleigh.

Le gain de canal $G_{i,n}$, entre la BS et l'utilisateur i est donné par [23] :

$$G_{i,n}^s(t) = G_A \cdot |h_{i,n}(t)|^2 \cdot G_s \cdot G_p, \quad (3.2)$$

Le paramètre G_A représente le gain d'antenne de chaque secteur de la station de base, il est calculé comme la somme des gains individuels :

$$G_A = G_{max} + G_{AH} + G_{AV}, \quad (3.3)$$

Où, $G_{max} = 15.5 \text{ dBi}$ est le gain d'antenne maximal, G_{AH} et G_{AV} représentent respectivement le gain de l'antenne horizontale et verticale :

$$G_{AH} = -\min(12(\varphi/\alpha_h)^2, A_m), \quad (3.4)$$

$$G_{AV} = -\min(12(\theta/\alpha_v)^2, SLA_v), \quad (3.5)$$

Où, φ ($-180^\circ < \varphi < 180^\circ$) est l'angle d'azimut, $\alpha_h = 65^\circ$ est la largeur de faisceau horizontal, et $A_m = 30 \text{ dB}$, est l'atténuation avant/arrière de l'antenne.

Et θ ($-180^\circ < \theta < 180^\circ$) est l'angle de tilt, $\alpha_v = 10^\circ$ est la largeur de faisceau vertical et $SLA_v = 10^\circ$ est l'atténuation du lobe latéral.

Le paramètre $h_{i,n}(t)$ représente le canal d'évanouissement de Rayleigh variant dans le temps, cette variation temporelle due au mouvement du mobile et des objets dans le canal. Il est modélisé par une distribution exponentielle.

Les canaux d'évanouissement de Rayleigh conformes à un spectre Doppler donné sont générés par une synthèse d'onde sinusoïdale complexe, en utilisant soit la méthode de Jakes ou la méthode de filtrage.

La réponse impulsionnelle engendrée suit la formule suivante [46] :

$$h(t, \tau) = \sum_{l=0}^{L-1} h_l(t) \delta(\tau - \tau_l) \quad (3.6)$$

Où, $h_l(t)$ est l'amplitude complexe du trajet l et τ_l correspond au retard. Avec δ est la fonction de Dirac. Après avoir appliqué la transformée de Fourier de 3.6, nous obtenons la réponse en fréquence du canal variant dans le temps à un moment donné, comme suite :

$$H(t, f) = \sum_{l=0}^{L-1} h_l(t) e^{-i\omega\tau_l} \quad (3.7)$$

L'effet de masque $G_s = 10^{X_\sigma/10}$ est généré en utilisant une distribution log-normale X_σ qui est une variable aléatoire gaussienne de moyenne zéro, avec un écart type σ [47].

L'affaiblissement sur le trajet de propagation $G_p = \left(\frac{d_0}{d_{i,s}}\right)^\alpha$ [47], dépend de la distance de référence d_0 qui est égale à 1Km, de la distance entre l'utilisateur et la station de base $d_{i,s}$ et de l'exposant d'affaiblissement sur le trajet α .

Les valeurs typiques de l'exposant α ainsi que l'écart type σ varient selon l'environnement de propagation, comme le représente le tableau 3.1 [48].

TABLE 3.1 – Valeurs typiques de l'exposant d'affaiblissement et de la déviation standard.

Environnement	Exposant α	Écart type $\sigma(dB)$
Espace libre	2	4 à 12
Urbain	2.7 à 3.5	4 à 12
Suburbain	3 à 5	4 à 12
Visibilité directe (LOS)	1.6 à 1.8	3 à 6
Obstruction	4 à 6	6.8

3.4.3 Débit de données

Nous avons ciblé l'optimisation du débit et de l'équité dans un contexte où la totalité de la bande passante peut être utilisée dans le but d'augmenter la capacité du système.

Afin d'assurer un meilleur débit, un facteur très important est pris en compte le SINR qui représente l'indicateur de l'état des utilisateurs, en fonction de leurs position dans la cellule. Dans cette approche, les utilisateurs qui subissent de fortes interférences entre les secteurs et à la limite de la cellule bénéficieront de la même qualité de service que les utilisateurs dont le SINR est élevé.

Dans le contexte de notre travail, chaque utilisateur i calcule son SINR reçu à chaque sous porteuse et à chaque time slot pour les deux systèmes NOMA et OFDMA, en utilisant les expressions suivantes :

$$\gamma_{ofdma\ i,n}^s(t) = \frac{p_{i,n}^s(t) G_{i,n}^s(t)}{\sum_{m=1, m \neq n}^M p_{i,m}^s(t) G_{i,m}^s(t) + N_{0,t}} \quad (3.8)$$

$$\gamma_{noma\ i,n}^s(t) = \frac{p_{i,n}^s(t) G_{i,n}^s(t)}{\sum_{m=1, m \neq n}^M p_{i,m}^s(t) G_{i,m}^s(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^K p_{j,n}^s(t) G_{i,n}^s(t) + N_{0,t}} \quad (3.9)$$

Où, $p_{i,n}^s(t)$ et $G_{i,n}^s(t)$ sont respectivement la puissance de transmission et le gain du canal pour l' $i^{\text{ème}}$ utilisateur, dans chaque sous porteuses n et chaque secteur s en fonction du temps t , $p_{i,m}^s(t)$ et $G_{i,m}^s(t)$ sont respectivement la puissance d'émission et le gain du canal sur la sous-porteuse m pour l' $i^{\text{ème}}$ utilisateur, $p_{j,n}^s(t)$ est la puissance d'émission de l'utilisateur j , $N_{0,t}$ est la densité spectrale de puissance du bruit gaussien en fonction du temps.

Le débit de données transmis pour chaque utilisateur i sur la $n^{\text{ème}}$ sous-porteuse et dans chaque time slot, est obtenu par la formule suivante [31] :

$$r_{i,n}^s(t) = B \log_2(1 + \gamma_{i,n}^s(t)), \quad (3.10)$$

où, B représente la bande de fréquence du système.

Le débit alloué à l'utilisateur sélectionné est donné par :

$$R_{i,n}^s(t) = \xi_{i,n}^s r_{i,n}^s, \quad (3.11)$$

Où $\xi_{i,n}^s \in \{1, 0\}$, indique si la sous-porteuse n est allouée à l'utilisateur i (par 1) ou non (par 0).

3.5 Motivations et contexte de notre contribution

Dans le cadre de ce mémoire nous avons exploité la nouvelle stratégie NOMA dans le but d'obtenir une allocation de ressource bien meilleure que l'OFDMA, afin de remédier au problème d'allocation et avoir un partage optimale de ressources dans le réseau cellulaire 5G basé sur un algorithme hybride d'optimisation PSO-PFS proposé dans [45]. Cet algorithme combine les avantages de PSO et PFS et présente différents avantages de simplicité, de flexibilité et de haute précision qui peuvent être appliqués à d'autres scénarios.

3.6 Implémentation de NOMA

Dans NOMA le gain de canal est calculé en fonction de la position de l'utilisateur dans la cellule et dans chaque secteur, et à partir du signal superposé émit par la BS $S_n = \sum_{i=1}^{k^n} \sqrt{p_{i,n}} x_{i,n}$, en utilisant la distribution de gauss. La puissance allouée aux utilisateurs doit répondre à la contrainte suivante [45] :

$$\sum_{n=1}^N P_{i,n}^s \leq P_{max} \quad (3.12)$$

La figure 3.2 représente le bloc de fonctionnement des systèmes NOMA.

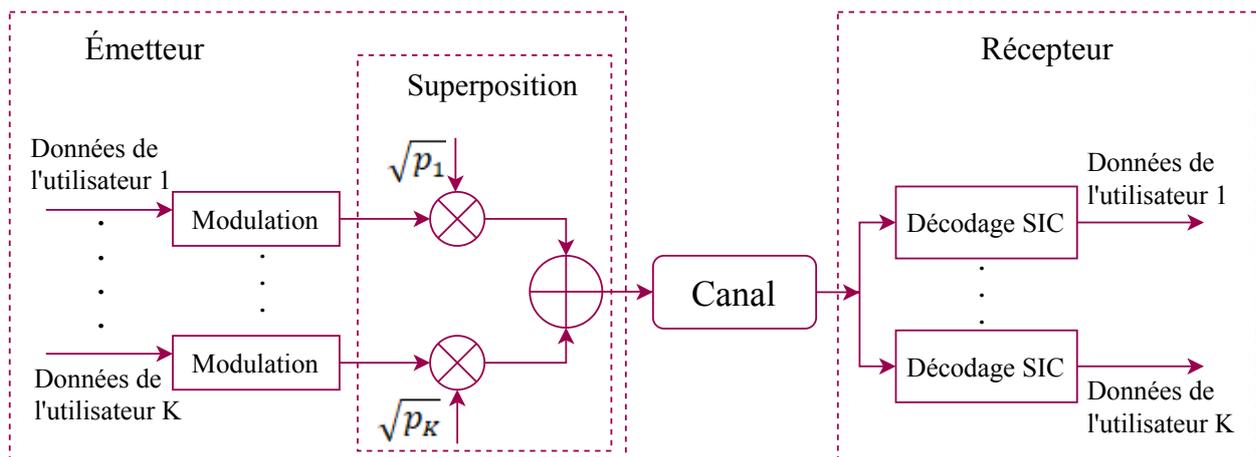


FIGURE 3.2 – Bloc de fonctionnemnt de NOMA.

3.7 Approche hybride PSO-PFS

Comme nous l'avons déjà vu dans le chapitre 2 l'algorithme PSO a besoin de certains facteurs pour pouvoir être utilisé :

- Le 1er est l'espace de recherche qui contient la gamme des solutions possibles et une fonction objectif à optimiser.
- Le 2ème est celui d'une population, l'ensemble de particules indispensables au bon fonctionnement de l'algorithme PSO (leur étape d'initialisation est très importante).
- Enfin, le 3ème est la condition d'arrêt de l'algorithme.

Pour une étude comparative, la condition d'arrêt s'active lorsque le nombre maximal d'itérations est atteint.

3.7.1 Fonction d'optimisation « Fitness »

L'espace de recherche D dans notre cas d'étude représente les utilisateurs K , la population est représentée par la matrice des ressources A_i (qui représente le nombre de sous-porteuses allouées aux utilisateurs ainsi que le débit de données) en fonction de la charge des secteurs et de la position des utilisateurs en tenant compte des interférences entre secteurs, elle est formulée comme suit :

$$A_i = \{a_i^1, a_i^2, \dots, a_i^D\}, \quad (3.13)$$

$$A_i^j = \{a_{i,1}^j, a_{i,2}^j, \dots, a_{i,D}^j\}, \quad (3.14)$$

Où, A_i^j est le vecteur des ressources de la $j^{\text{ème}}$ particule.

Notre objectif est de maximiser l'utilité de tous les utilisateurs en termes de débit et équité et avoir un très faible délai, pour représenter le degré de satisfaction des utilisateurs attribués. La variation temporelle de la condition du canal est prise en compte, puisque le canal change en raison du mouvement des utilisateurs ou des objets environnants. Le problème d'optimisation peut être exprimé comme suit :

$$f_{\text{débit}} = \max u_i(A_i) \quad (3.15)$$

$$f_{\text{équité}} = \text{mean } u_i(A_i) \quad (3.16)$$

Où, f est la fonction fitness et u représente l'utilité des utilisateurs.

3.7.2 Processus de fonctionnement de l'algorithme PSO-PFS

Dans le cadre de notre étude l'algorithme PSO-PFS cherche à optimiser l'allocation des ressources dans les réseaux cellulaires spécifiquement pour les utilisateurs qui sont dans un emplacement critique.

- **Déroulement de l'algorithme**

L'algorithme PFS ne prend pas en compte les exigences du débit, il fonctionne en gardant une trace du débit moyen $M_{i,n}(t)$ de chaque utilisateur dans une fenêtre antérieure de longueur T_c et en attribuant des sous-porteuses à l'utilisateur avec le rapport $\frac{r_{i,n}(t)}{M_{i,n}(t)}$ maximal, après avoir obtenu des informations sur la qualité du canal de propagation. Ainsi, l'algorithme PFS traite les sous-porteuses indépendamment les unes des autres, et met à jour le système à chaque intervalle de temps.

Le fonctionnement de l'ordonnanceur PFS est décrit dans l'algorithme 1.

Algorithm 1 Allocation de ressources avec PF Scheduling

Paramétrage : Nombre des utilisateurs K , sous-porteuses N , temps slot T , la fenêtre T_c

for $i = 1$ **to** K **do**

Trouver la localisation de chaque utilisateur dans la cellule en fonction du secteur s en utilisant l'équation 3.1

for $t = 1$ **to** T **do**

for $n = 1$ **to** N **do**

Générer les différents gains de canal pour les deux systèmes OFDMA et NOMA en fonction de la position de l'utilisateur en utilisant l'équation 3.2

Calculer le débit de données : $r_{i,n}^s(t) \leftarrow B \log_2(1 + \gamma_{i,n}^s(t))$

end

end

Initialiser le débit moyen $M_{i,n}(t)$ pour tous les utilisateurs

for $t = 1$ **to** T **do**

for $n = 1$ **to** N **do**

if $t^* = \operatorname{argmax} \frac{r_{i,n}(t)}{M_{i,n}(t)}$ **then**

Allouer la sous-porteuse n et le débit $r_{i,n}(t)$ à l'utilisateur sélectionné i^*

Stocker les ressources dans une matrice

Mettre à jour le débit moyen : $M_{i,n}(t+1) \leftarrow (1 - \frac{1}{T_c}) M_{i,n}(t) + \frac{1}{T_c} r_{i,n}(t)$

else

$M_{i,n}(t+1) \leftarrow (1 - \frac{1}{T_c}) M_{i,n}(t)$

end

end

end

end

Calculer les métriques de performances

Une fois que la première population (la matrice des ressources) pour les deux techniques OFDMA et NOMA est générée avec l'algorithme 1, une évaluation de la fonction de fitness est effectuée.

Après la mise à jour des particules, à chaque itération les nouvelles populations sont évaluées par la fonction fitness et les deux vecteurs $lpbest_j$ et $gbest$ sont mis à jour par les équations suivantes :

$$lpbest_j^{iter+1} = \begin{cases} x_j^{iter+1} & \text{si } f(x_j^{iter+1}) \geq lpbest_j^{iter} \\ lpbest_j^{iter} & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.17)$$

$$gbest^{iter+1} = \max f(lpbest_j^{iter+1}) \quad (3.18)$$

La solution proposée pour l'allocation des ressources à l'aide de PSO-PFS hybride est décrite dans l'algorithme 2.

Algorithm 2 Allocation de ressources avec PSO-PFS hybride

Paramètres de PSO : c_1, c_2, z , Nombre de particules : J , Espace de recherche : D , Nombre d'itérations : max_{iter} .

Générer la matrice de ressources (première population) à partir de l'algorithme PFS 1

Initialiser la vitesse et la position de la particule j dans D

Evaluer la première population dans l'espace de recherche D

Initialiser $lpbest$ et $gbest$

Trouver la meilleure position de chaque particule dans la population initiale

Début des itérations

$iter \leftarrow 0$

while $iter < max_{iter}$ **do**

$iter \leftarrow iter + 1$

Calculer le facteur d'inertie : $w \leftarrow \frac{max_{iter} - iter}{max_{iter}}$

Générer aléatoirement r_1, r_2

for $j = 1$ to J **do**

Générer une nouvelle population avec l'algorithme 1

Mettre à jour la vitesse $v_j(iter + 1)$ et la position $x_j(iter + 1)$ de la particule j en utilisant les équations (2.21) (2.22)

Calculer la fonction d'optimisation fitness (débit et équité) selon les équations (3.15) (3.16)

Mettre à jour $lpbest$ selon l'équation (3.17)

end

Mettre à jour $gbest$ selon la valeur fitness (Débit et équité) en utilisant l'équation (3.18)

end

Afficher la meilleure solution $gbest$

Calculer les métriques d'évaluation de performances

L'organigramme suivant résume toutes les étapes de fonctionnement de l'algorithme PSO-PFS hybride.

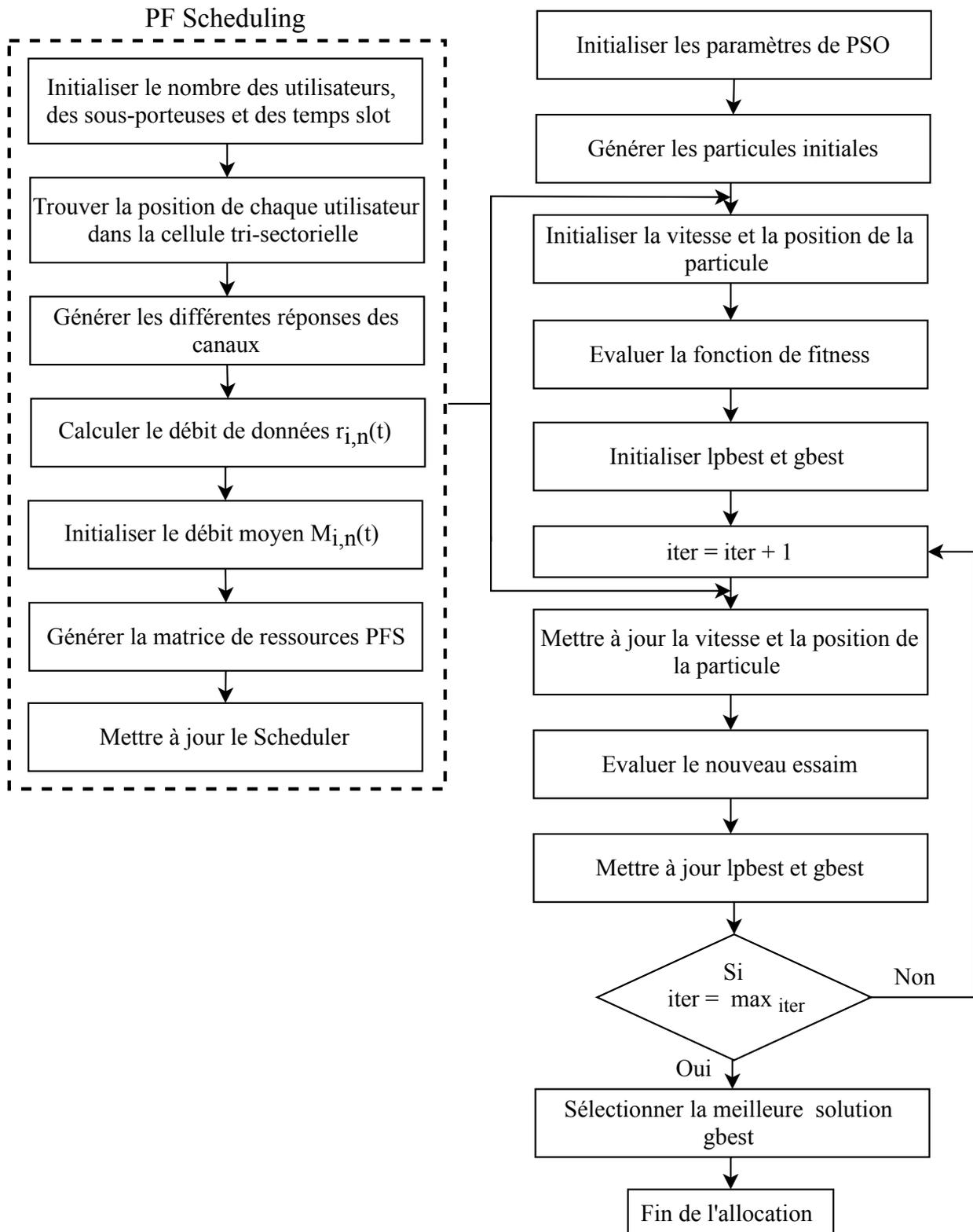


FIGURE 3.3 – Organigramme de l’algorithme d’allocation PSO-PFS hybride.

3.8 Calcul des métriques d'évaluation de performances

- **Calcul du Débit**

Pour calculer le débit du système, dans un premier temps, les schémas d'allocations sont pris pour connaître les sous-porteuses sur lesquelles l'utilisateur transmet. Après cela, la capacité de canal est calculée à chaque sous-porteuse. Enfin, la valeur moyenne de tous les intervalles de temps simulés est calculée.

L'objectif est de maximiser le débit total pour tous les utilisateurs en même temps que chaque utilisateur reçoit une quantité suffisante de débit. La performance du débit du système est donnée comme suit [45] :

$$D_s = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (i^*, gbest) \quad (\text{Bits/seconde}) \quad (3.19)$$

- **Calcul d'équité**

L'équité c'est d'assurer un degré de satisfaction des utilisateurs en termes de débit. La valeur 1 correspond à sa valeur optimale qui correspond à la satisfaction de tous les utilisateurs. Une meilleure équité est comprise entre $0.9 \leq F \leq 1$. L'équité de chaque utilisateur i est donnée par [35] :

$$F_i = \frac{-\log A_i}{-\log\left(\frac{1}{K}\right)} = -\frac{\log A_i}{\log K} \quad (3.20)$$

Où A_i , représente la proportion des ressources allouées à l'utilisateur i , et $\log K$ représente un facteur normalisé.

L'équité moyenne du système de K utilisateurs peut être définie comme suit :

$$\bar{F} = \sum_{i=1}^K A_i F_i \quad (3.21)$$

- **Calcul d'efficacité spectrale et énergétique**

L'efficacité spectrale consiste à optimiser l'utilisation du spectre afin qu'une quantité maximale de données puissent être transmises avec moins d'erreurs. L'efficacité énergétique consiste à utiliser moins d'énergie pour produire le même rendement utile, elles sont définies comme suit [49] :

$$\eta_{SE} = \frac{\sum_{i=1}^K R_i}{f_p} \quad (3.22)$$

$$\eta_{EE} = \frac{\sum_{i=1}^K R_i}{\sum_{s=1}^S \sum_{n=1}^N P_n^s} \quad (3.23)$$

Où, R_i est le débit moyen atteint par l'utilisateur i , f_p est la fréquence de la porteuse.

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle global étudié dans une cellule tri-sectorielle. En outre, une description de la nouvelle stratégie d'allocation de ressources en étudiant les conditions d'état des canaux a été donnée. Cette stratégie est basée sur un algorithme hybride PSO-PFS en utilisant la nouvelle technique NOMA ainsi que l'OFDMA pour une étude comparative.

L'algorithme PSO-PFS évalue la fonction objectif adaptée à notre modèle en utilisant la fonction fitness pour une répartition optimale des ressources. Les utilisateurs qui se trouvent dans un emplacement critique bénéficieront d'une amélioration de la qualité de service tout en respectant les contraintes de retard.

Chapitre 4

Evaluation de performances

Sommaire

4.1 Introduction	61
4.2 Logiciel de simulation	62
4.3 Modèle et Hypothèses de simulation	62
4.4 Résultats, analyses et comparaison	64
4.5 Bilan	75
4.6 Conclusion	75

4.1 Introduction

Assurer une véritable QoS dans les transmissions mobiles multimédias constitue un défi important. À cause de certaines contraintes les ressources radio ne sont pas également partagées entre les utilisateurs, ces derniers ne peuvent pas donc bénéficier de la même capacité de transport.

Pour satisfaire ses utilisateurs nous avons mis au point la nouvelle technique d'allocation de ressources NOMA dans une cellule tri-sectorielle basée sur l'algorithme hybride PSO-PFS à liaison descendante, et exploiter ainsi les avantages de NOMA pour une meilleure performance du réseau. Le schéma proposé doit offrir différents niveaux de QoS et satisfaire ainsi les besoins des utilisateurs quelque soit leurs position et le nombre de stations mobiles dans la cellule.

Ce dernier chapitre présente les résultats et les analyses de la simulation du nouvel algorithme, évalué sur quatre critères de performances : débit, équité, délai et efficacité spectrale et énergétique.

4.2 Logiciel de simulation

Les simulations ont été réalisées par le logiciel MATLAB dans sa version R2014b, sur un processeur Intel i7. Ce logiciel est souvent utilisé dans la recherche sur la communication sans fil, notamment lorsque les travaux au niveau de la couche physique et la couche MAC. Les programmes simulés peuvent être implémentés facilement dans un système réel.

4.3 Modèle et Hypothèses de simulation

Cette section fournit une description de l'environnement de simulation ainsi que les paramètres de la simulation utilisés.

Nous avons conçu une seule cellule tri-sectorielle, avec une station de base centrée au milieu en bleu, et 100 utilisateurs mobiles distribués aléatoirement sur la cellule, comme il est illustré par la figure 4.1. La réutilisation de fréquence 1 est appliquée, afin d'affecter toutes les sous-porteuses dans la cellule. L'allocation a été faite en tenant compte du nombre d'utilisateurs dans les secteurs ainsi que leurs positions et leurs différents services. Nous considérons un canal de liaison descendante, d'autre part, ce canal souffre de perte de propagation, de l'évanouissement par trajets multiples et l'effet de masque.

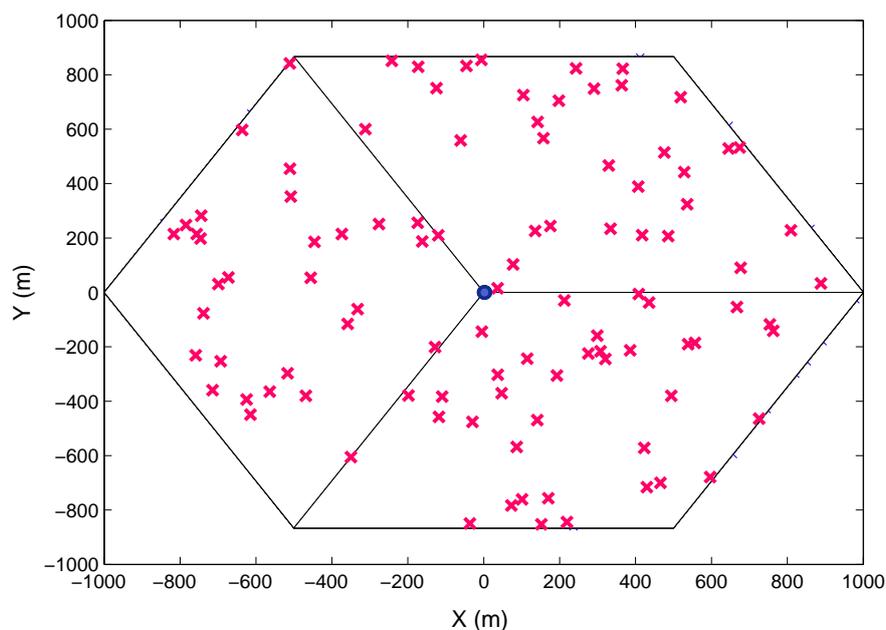


FIGURE 4.1 – Scénario de simulation avec 100 utilisateurs.

Dans notre cas d'étude nous avons considéré trois types de services voix, vidéo, et données. Des simulations ont été effectuées pour évaluer les performances de l'algorithme PSO-PFS en termes d'équité de délai et de débit ainsi que l'efficacité spectrale et énergétique sur la liaison descendante dans les systèmes NOMA ainsi que l'OFDMA. Les acronymes suivants seront utilisés pour désigner les principales méthodes étudiées :

- PSO-PFS^{noma} : L'algorithme hybride PSO-PFS combiné avec le système NOMA,
- PSO-PFS^{ofdma} : L'algorithme hybride PSO-PFS combiné avec le système OFDMA,
- PFS^{noma} : L'algorithme PFS combiné avec le système NOMA,
- PFS^{ofdma} : L'algorithme PFS combiné avec le système OFDMA.

Une comparaison des performances a été analysée entre ces quatre schémas.

4.3.1 Paramètres de simulation

Les paramètres considérés au niveau du système sont résumés dans le tableau 4.1.

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation.

Paramètres	Valeurs
Bande de fréquence du système	20 MHz
Largeur de la sous-porteuse	3.6 GHz
Nombre de sous-porteuses	1200
Nombre de cellule	1 cellule tri-sectorielle
Rayon de la cellule	1Km
Type d'antennes	Antennes sectorielles
Nombre de secteurs	3 secteurs
Nombre d'utilisateurs dans la cellule	20,40,60,80,100
Vitesse de l'utilisateur	36 km/h
Type de modulation utilisé	64QAM
Puissance de transmission de la BS	43 dBm
Nombre de Time slot	100
Largeur de la fenêtre Tc	20
Déviatoin standard du shadowing	8.9
Exposant du path loss	3.5 (environnement urbain)

Les paramètres utilisés pour la simulation de l'algorithme évolutionnaire PSO sont donnés dans le tableau ci-dessous :

TABLE 4.2 – Paramètres de l'algorithme PSO.

Paramètres	Valeurs
Taille de l'essaim (Nombre de particules)	50
Nombre d'itérations	100
Coefficients d'accélération c_1 , c_2	1
Facteur de construction Z	0.7

4.4 Résultats, analyses et comparaison

4.4.1 Impact de la mobilité

L'optimisation de l'allocation des sous-porteuses reste un problème difficile, en particulier lorsque les utilisateurs se déplacent rapidement dans le réseau. Cette mobilité influence grandement la qualité du canal perçue.

Dans l'ensemble de ce mémoire nos simulations ont été réalisées avec des utilisateurs qui se déplacent aléatoirement au sein de la cellule avec une vitesse de 36 km/h. Comme nous l'avons déjà cité, l'allocation de ressources a été réalisée en tenant compte de la position des utilisateurs.

En effet, le schéma proposé exploite l'algorithme PFS qui tient en compte les conditions d'état des canaux des utilisateurs. Les utilisateurs situés à la limite de la cellule ou entre les secteurs subissent de fortes interférences. Le but de cette approche est d'assurer une équité entre ses utilisateurs et leur garantir une même qualité de service que les utilisateurs dont le SINR est élevé.

4.4.2 Canal radio

La simulation du canal radio à évanouissement a été réalisée avec un signal d'évanouissement construit à partir de sources de bruit gaussiennes en phase et en quadrature. Dans la figure 4.2, la réponse du canal de fréquence a été tracée. Grâce à la superposition du signal émis le système NOMA présente une réponse supérieure à celle d'OFDMA, les deux canaux fluctuent en raison de l'évanouissement par trajets multiples.

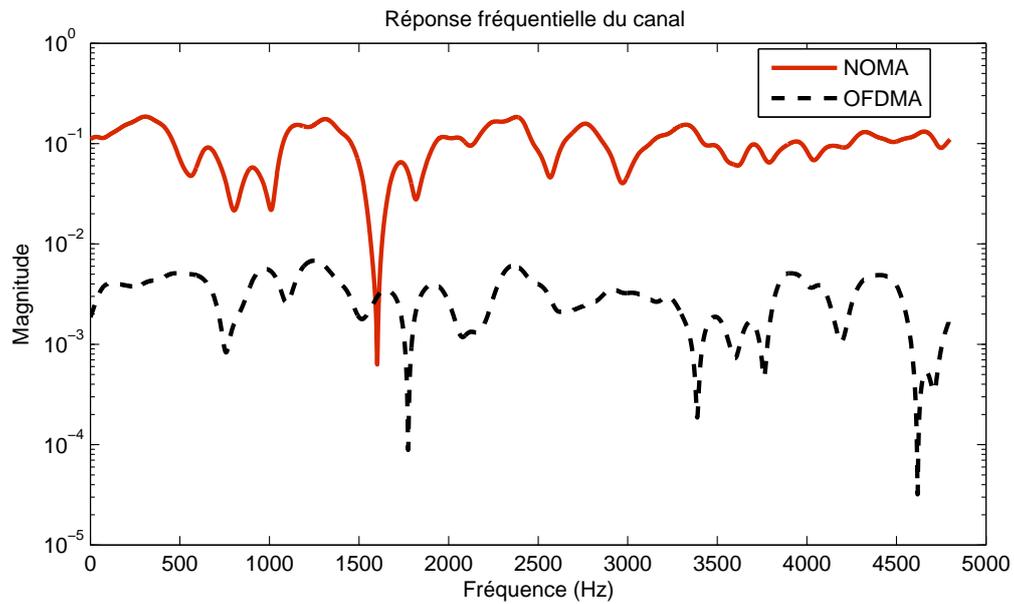


FIGURE 4.2 – Réponse fréquentielle du canal simulé.

4.4.3 L'utilité des utilisateurs

La figure 4.3 illustre la propriété de convergence de l'algorithme PSO ainsi que l'utilité de tous les utilisateurs dans l'espace de recherche. À chaque itération, PSO tend vers la meilleure solution en vue d'atteindre la meilleure solution globale, il exploite l'espace de recherche où la particule charge toutes les ressources du système et cherche à maximiser la fonction d'utilité calculée par la fonction fitness pour une meilleure distribution des ressources.

D'après la figure 4.3 on voit qu'avec seulement 50 itérations PSO peut déjà garantir l'utilité des utilisateurs. Cependant, pour avoir des meilleurs résultats il est préférable d'utiliser 100 itérations. Par conséquent, cet algorithme est comme une solution pour le problème d'optimisation de l'allocation de ressources et améliorer les performances de l'ordonnanceur PFS.

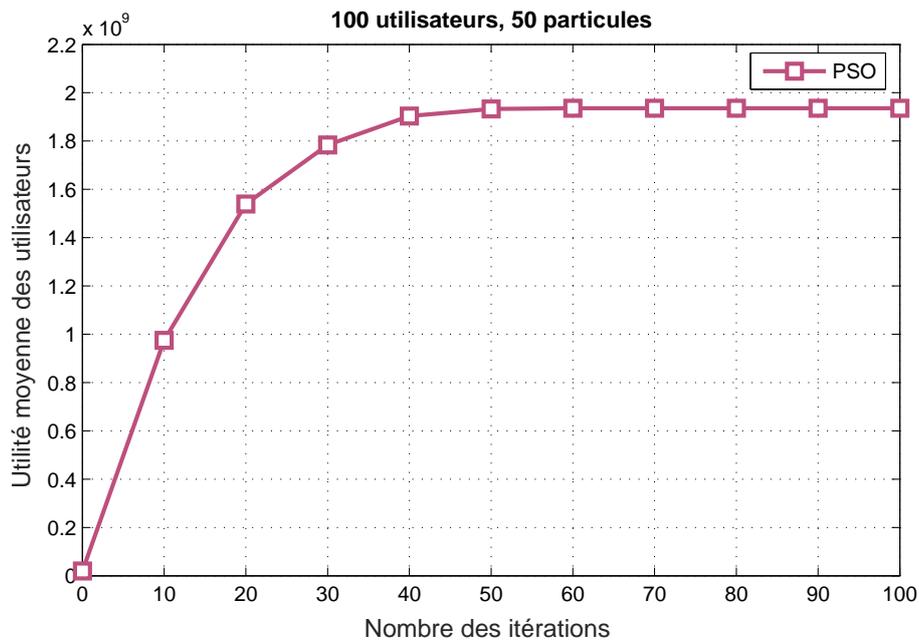


FIGURE 4.3 – Convergence de l'algorithme PSO avec 100 itérations.

4.4.4 Débit

La figure 4.4 montre le débit de performance de l'allocation de ressource obtenu par chacune des méthodes simulées en fonction du nombre d'utilisateurs dans la cellule tri-sectorielle pour 1200 sous-porteuses.

On peut clairement remarquer que plus le nombre d'utilisateurs dans la cellule est élevé, plus le débit du système est important grâce à la diversité multi-utilisateur. D'autre part, on remarque que NOMA donne un débit plus élevé qu'OFDMA atteignant un débit de 32 Gbps avec le schéma PSO-PFS^{noma}.

En effet, NOMA dessert plus d'utilisateurs que l'OFDMA ce qui permet d'avoir des sous-porteuses suffisantes pour l'allocation, également la superposition et le nouveau domaine de puissance dans les systèmes NOMA permettent d'avoir des débits supérieurs.

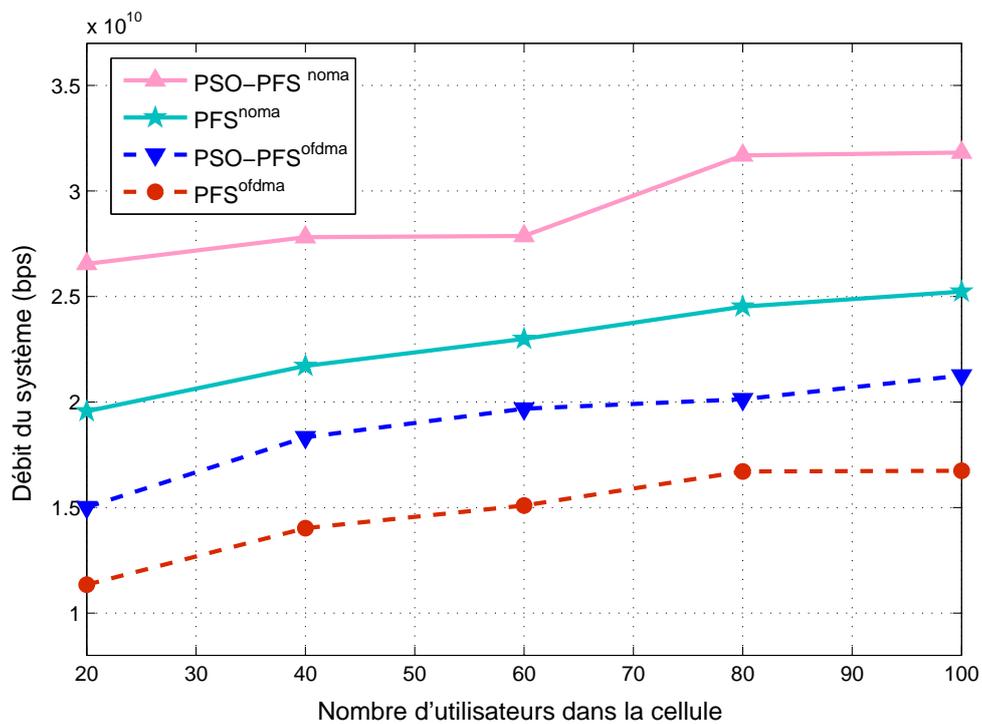


FIGURE 4.4 – Performances en termes de débit.

Un autre résultat important à noter, l'hybridation PSO-PFS surpasse le schéma d'ordonnement PF pour les deux systèmes. En effet, les métriques de l'algorithme PSO-PFS tentent d'assurer une distribution optimale de ressources à tous les utilisateurs, même ceux qui sont confrontés à de mauvaises conditions de canal il cherche toujours la meilleure solution dans l'espace de recherche.

4.4.5 Equité

L'équité est un évaluateur important pour la performance du processus d'allocation. Optimiser l'équité permettra d'éviter l'occurrence d'un débit de données de transmission nul pour n'importe quel utilisateur à n'importe quelle échelle de temps.

- **Test préliminaire**

Afin de voir l'efficacité de l'algorithme PSO-PFS qui permet de surmonter les problèmes que subit l'ordonnanceur PFS, nous avons effectué un test préliminaire pour faire une comparaison entre eux, et voir comment est effectuée la distribution des sous-porteuses entre les utilisateurs. Nous avons pris 40 utilisateurs dans la cellule avec 300 sous-porteuses.

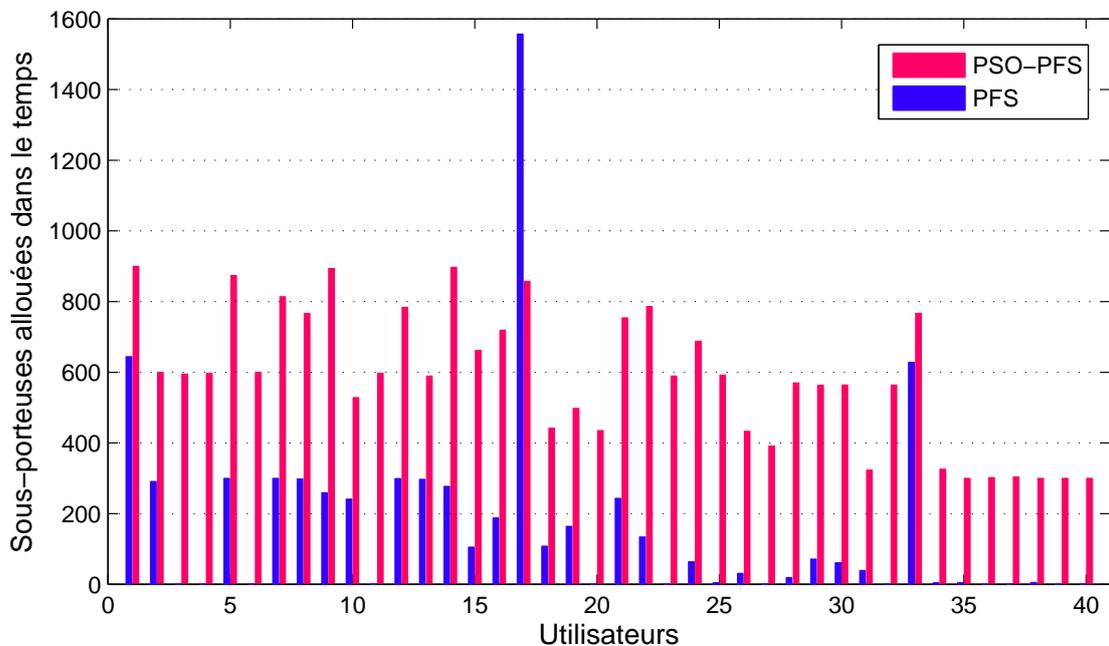


FIGURE 4.5 – Sous-porteuses allouées par rapport aux utilisateurs.

Comme le montre la figure 4.5, avec PSO-PFS les 40 utilisateurs ont été desservis au fil du temps par les sous-porteuses avec une distribution équitable des ressources sans priver l'un des utilisateurs. Par ailleurs, avec PFS seulement 29 utilisateurs ont leur part attribuée des sous-porteuses (SINR élevé) et 11 restent en attente pour être desservis, aucun débit ne leur a été alloué (mauvaise condition de canal), de plus la distribution des ressources n'est pas vraiment équitable, en effet le 17^{ème} utilisateur a été sélectionné plusieurs fois et plusieurs sous-porteuses lui ont été attribuées.

Ce comportement peut être très problématique pour les applications multimédia qui nécessitent une QoS constante ce qui limite les performances de l'algorithme PFS.

En ce qui concerne l'équité par rapport aux utilisateurs, la figure 4.6 montre une convergence rapide vers un niveau d'équité élevé (indice 1) et assure une meilleure équité pour des mobiles ayant une qualité du canal radio différente pour les quatre schémas.

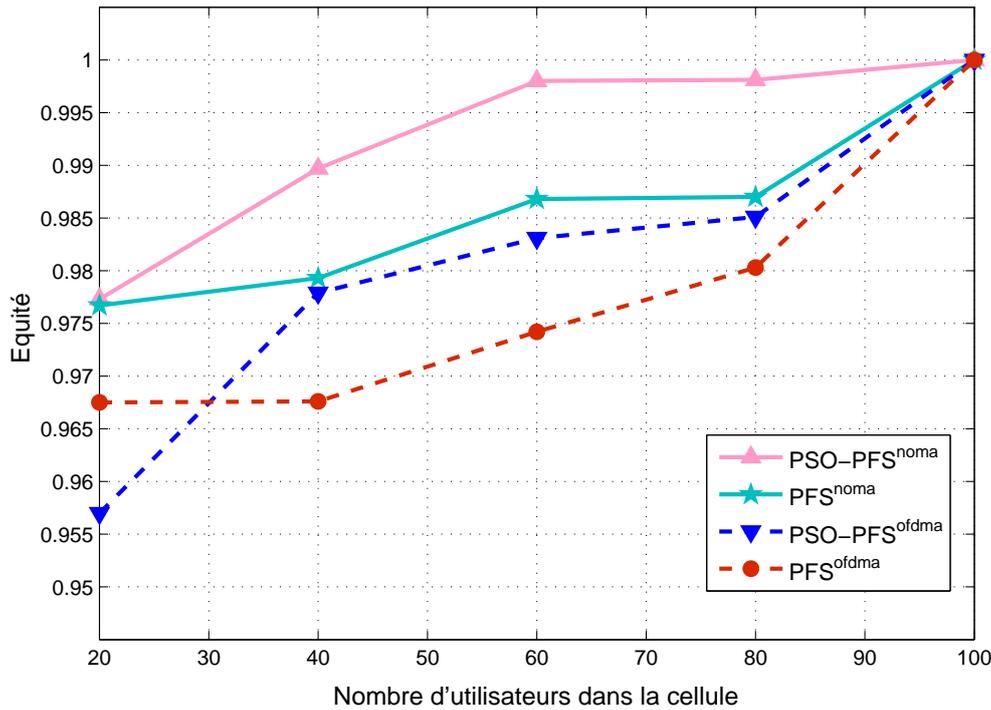


FIGURE 4.6 – Performances en termes d'équité.

Il est à noter que l'allocation par PSO-PFS^{nomma} donne les meilleures performances (l'indice de l'équité est très proche de 1, ce qui indique un haut niveau d'équité) et cela malgré l'augmentation du nombre d'utilisateurs. De plus, les métriques de PSO-PFS surpassent la métrique PF pour les deux systèmes (OFDMA et NOMA). N'empêche que PFS donne une bonne équité en revanche avec une diminution du débit car il est indépendant des exigences du débit des applications.

4.4.6 Contrainte du délai

Différentes applications ont des exigences de délai différentes qui devraient être garanties par le système. Dans notre cas d'étude nous avons considéré trois types de services voix, vidéo, et données, tel que 10% des utilisateurs vont transmettre de la vidéo avec un débit de 15 Mbps, 40% vont transmettre la voix avec un débit de 9 Mbps, et 50% vont transmettre les données avec un débit distribué de façon exponentielle avec une moyenne de 40 Mbps.

Pour calculer la probabilité de retard, nous avons comparé le débit alloué à chaque utilisateur au débit minimal nécessaire pour transmettre chaque application selon ses exigences.

La figure 4.7 montre les performances obtenues en matière de délai pour 100 utilisateurs qui représente la probabilité pour qu'il n'y ait pas de retard.

Il est clair que le système NOMA atteint une probabilité de délai nulle plus rapidement qu'OFDMA et cela pour les deux schémas d'allocation de ressources (PSO-PFS^{noma} et PFS^{noma}) avec une avance de 6 ms pour PSO-PFS^{noma} en raison de sa convergence vers la solution optimale.

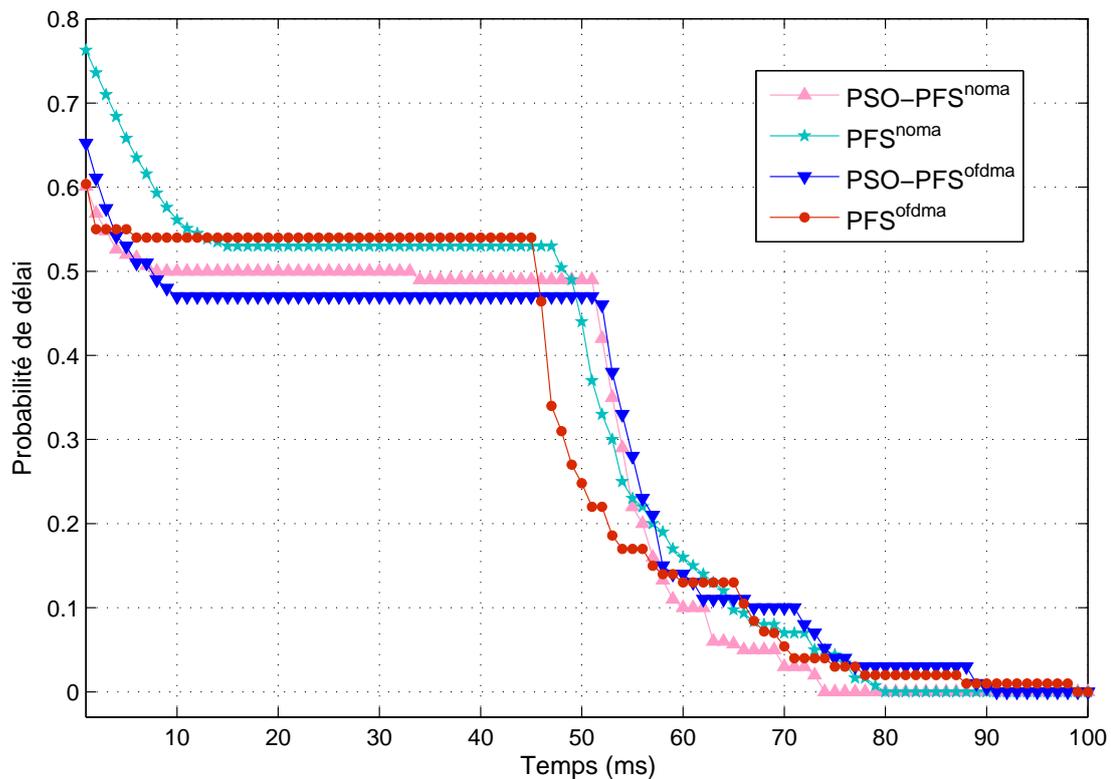


FIGURE 4.7 – Probabilité de retard par rapport au temps.

En effet, pour 74 ms le schéma PSO-PFS^{noma} atteint une probabilité nulle comparé à 91 ms pour PSO-PFS^{ofdma} cela lui permet de transmettre un plus grand nombre de ressources que PSO-PFS^{ofdma} avec une meilleure qualité de service et satisfaire ainsi un grand pourcentage d'utilisateurs. En ce qui concerne le schéma PFS^{ofdma} il est très lent il atteint une probabilité nulle pour un temps de 99 ms, de ce fait, ce schéma n'est pas vraiment adapté aux services multimédias.

4.4.6.1 Satisfaction des utilisateurs

Comme nous l'avons déjà vu dans le 2ème chapitre, la technique NOMA dessert plusieurs utilisateurs simultanément en utilisant les mêmes ressources spectrales ; ce qui est un grand avantage comparé à OFDMA vu la rareté du spectre. La figure 4.8 montre le nombre d'utilisateurs desservis par les 1200 sous-porteuses pendant des intervalles de temps différents.

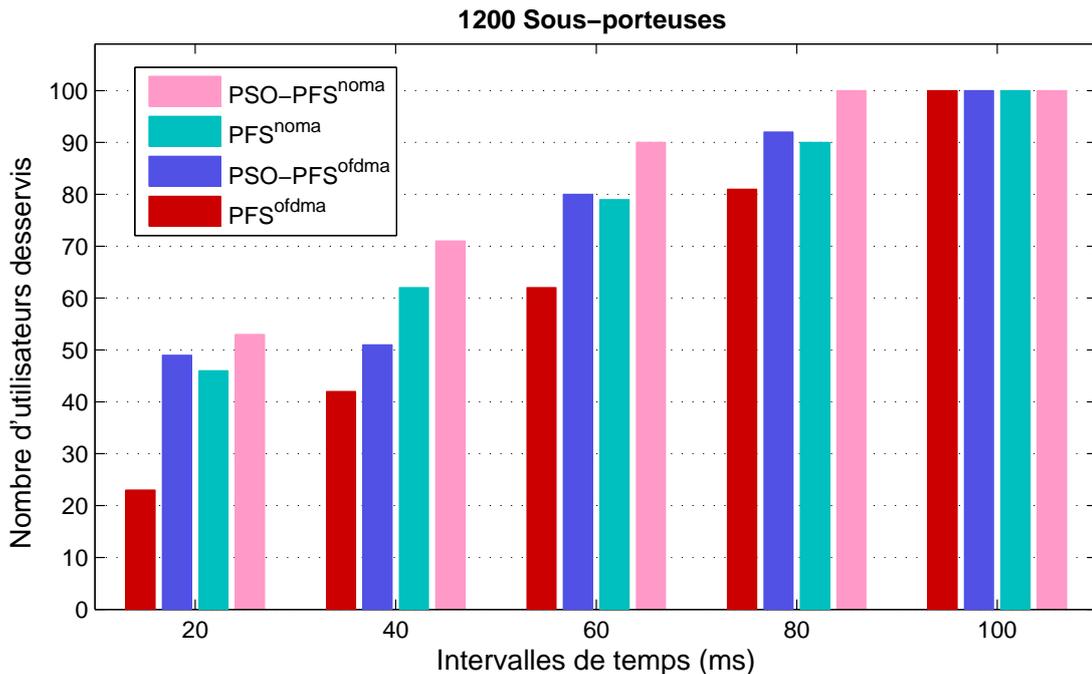


FIGURE 4.8 – Nombre d'utilisateurs servis par 1200 sous-porteuses.

Dans un premier temps, on remarque que le nombre d'utilisateurs desservis par les sous-porteuses augmente avec l'augmentation des intervalles de temps ce qui est évident, Cependant, le système NOMA surclasse le système OFDMA surtout combiné avec le schéma PSO-PFS en raison de sa convergence vers la meilleure solution.

Le schéma PSO-PFS^{nomad}, permet de répondre aux besoins des utilisateurs en leur allouant des sous-porteuses suffisantes pendant un temps opportun, en effet, pour 80 temps slots il permet déjà de servir tous les utilisateurs qui se trouvent dans la même cellule contrairement aux autres schémas jusqu'à 100 TTI qu'ils ont pu servir les 100 utilisateurs.

Avec l'expansion significative de la connectivité et de la densité du trafic le PSO-PFS^{nomad} est une solution très efficace pour répondre à ces exigences.

Pour voir l'efficacité des algorithmes nous avons calculé le pourcentage de satisfaction des utilisateurs à contrainte de délai pour les quatre schémas, comme le montre la figure 4.9.

D'après la figure, le schéma PSO-PFS^{noma} satisfait un plus grand pourcentage d'utilisateurs 80% comparé à 40% pour le schéma PSO-PFS^{ofdma}, ce qui signifie qu'il dispose de beaucoup plus de ressources avec une distribution optimale pour satisfaire les besoins des utilisateurs. Un point important à noter, plus le nombre d'utilisateurs dans le système est grand, plus le délai est important.

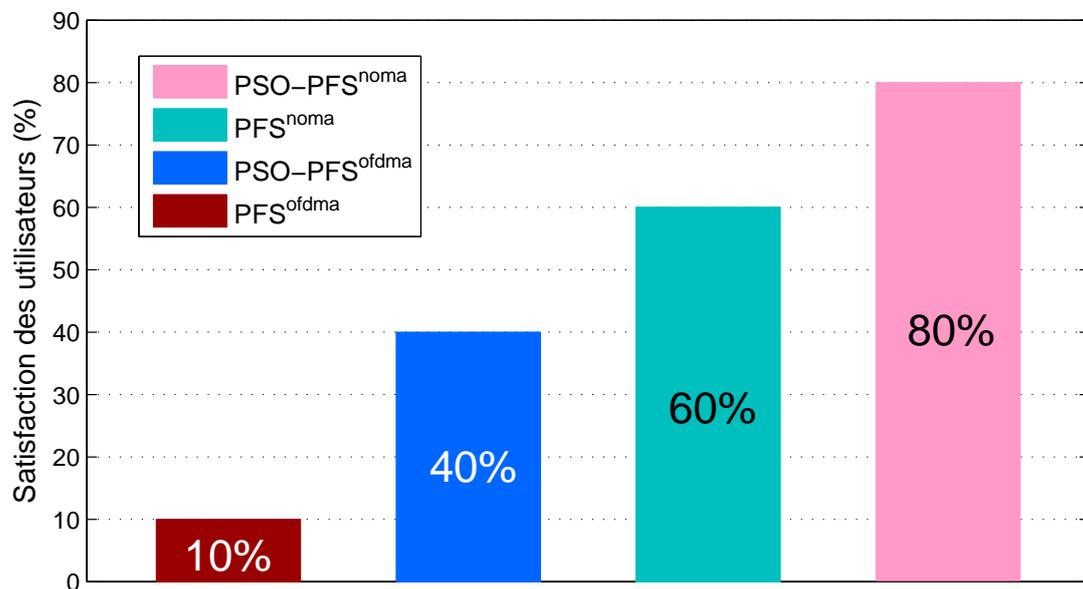


FIGURE 4.9 – Satisfaction des utilisateurs au fil du temps.

4.4.7 Efficacité spectrale et énergétique

Dans cette section, nous analysons les performances de l'efficacité spectrale SE et énergétique EE dans les systèmes NOMA et OFDMA.

- **Efficacité énergétique**

Dans la figure 4.10, les schémas PSO-PFS^{noma} et PFS^{noma} présentent une efficacité énergétique très remarquable et supérieure aux autres schémas de l'ordre de 1.75 Gbps/s/w et de 1.3 Gbps/s/w respectivement. Pour les schémas d'OFDMA, l'efficacité augmente faiblement pour atteindre une efficacité maximale de 0.5 Gbps/s/w.

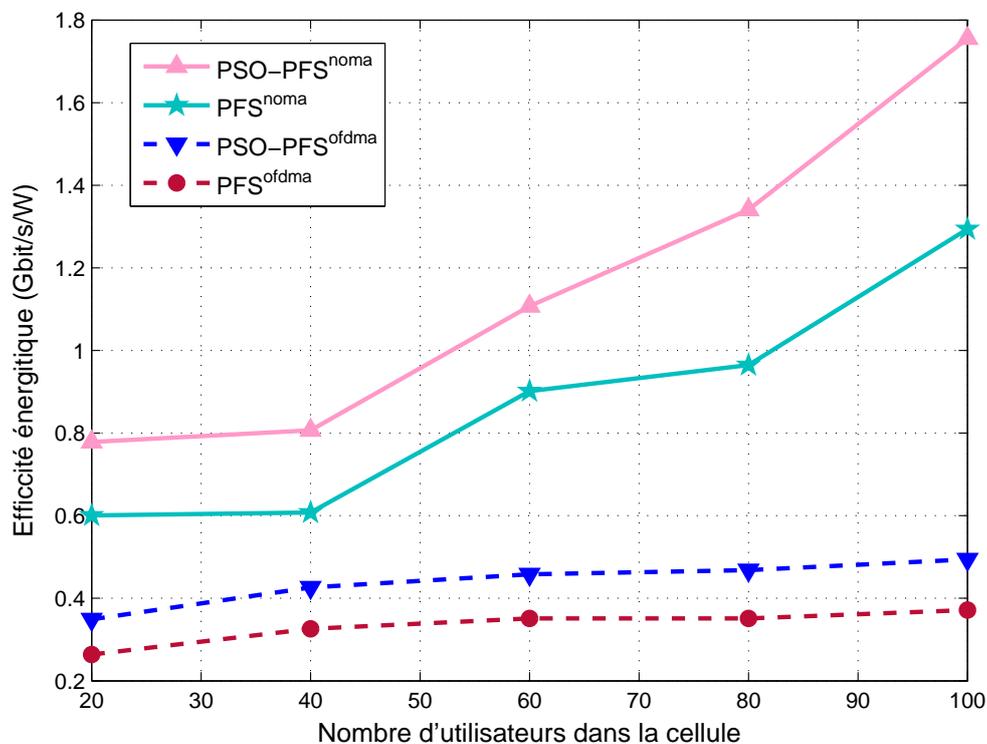


FIGURE 4.10 – Efficacité énergétique en fonction des utilisateurs.

Cette grande efficacité pour NOMA est due à l'exploitation du nouveau domaine de puissance qui permet de servir les utilisateurs avec différents niveaux de puissance. Les puissances de transmission élevées sont utilisées pour les utilisateurs avec de mauvaises conditions de canal et vice versa. Cela permet de réduire la consommation d'énergie par la station mobile contrairement à l'OFDMA qui utilise un même niveau de puissance.

- **Efficacité spectrale**

L'amélioration de l'efficacité spectrale est un sujet de recherche très important en raison de la rareté et du coût élevé des ressources spectrales.

Dans la figure 4.11 les schémas PSO-PFS^{noma} et PFS^{noma} présentent une efficacité supérieure comparé aux deux autres schémas d'OFDMA. En effet, dans les systèmes OFDMA plus le nombre d'utilisateurs augmente plus il est difficile de satisfaire les utilisateurs en raison de la rareté du spectre.

En d'autres termes, NOMA peut servir plusieurs utilisateurs avec différentes conditions de canal et avec les mêmes ressources en temps opportun et leur permet d'accéder à toutes les sous-porteuses. Également le principe de superposition permet la transmission des messages large bande diffusés sur la même fréquence et permet aux systèmes NOMA une efficacité spectrale importante.

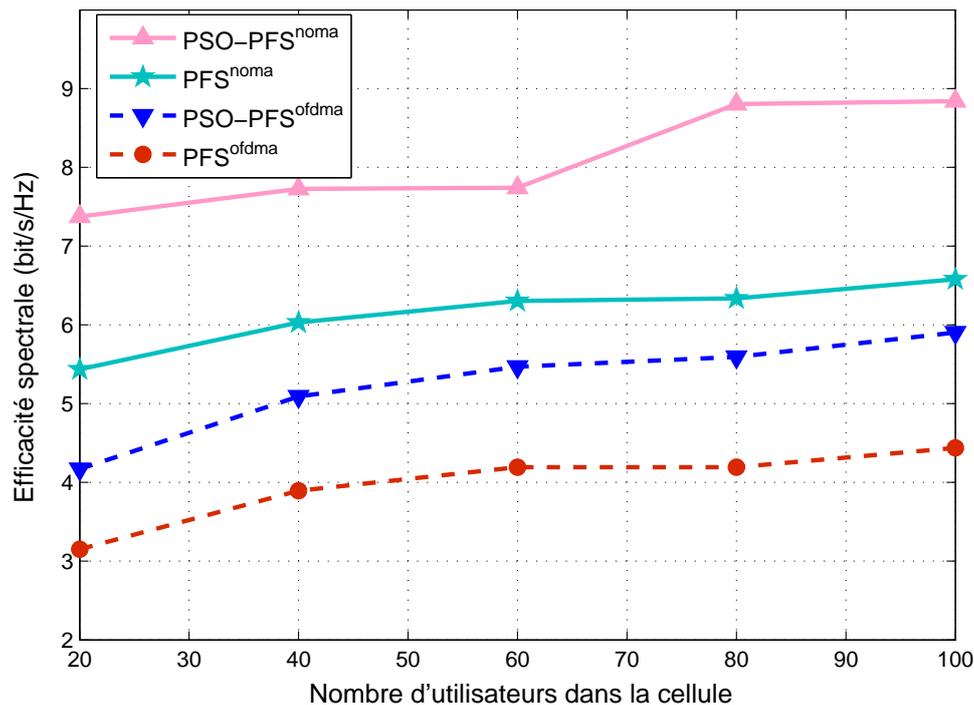


FIGURE 4.11 – Efficacité spectrale en fonction des utilisateurs.

Enfin, les performances de l'algorithme PSO-PFS sont supérieures à celles de PFS pour les deux figures (4.10 et 4.11). La raison en est que l'algorithme PSO renvoie une meilleure position optimale globale et permet une utilisation optimale de spectre dans la cellule.

4.5 Bilan

Après plusieurs simulations les résultats obtenus montrent que la nouvelle approche (PSO-PFS) proposée nous a permis de fournir une solution optimale pour l'allocation des ressources dans le système NOMA.

Dans les systèmes NOMA l'utilisateur n'a pas besoin de passer par un intervalle de temps programmé pour transmettre ses informations, par contre dans OFDMA chaque utilisateur est obligé d'envoyer une demande de programmation de canal à sa station de base de desserte ce qui engendre une augmentation du délai.

La répartition de ressources effectuée conduit à un compromis entre le débit et l'équité par rapport aux ordonnanceurs et fournit conjointement un débit élevé avec une diminution du délai et une amélioration remarquable de l'efficacité spectrale et énergétique, ce qui permet une amélioration de la qualité de service et satisfaire ainsi un grand pourcentage d'utilisateurs.

4.6 Conclusion

Durant ce chapitre, nous avons étudié les performances de nos contributions. Nous avons mené une étude comparative entre quatre schémas d'allocation de ressources. Nous nous sommes focalisées sur la résolution du problème clé de l'allocation qui est l'insatisfaction des utilisateurs qui se trouvent dans des positions critiques soit aux bordures ou entre les secteurs dans la cellule tri-sectorielle. La charge des secteurs (l'influence du nombre élevé d'utilisateurs) et les contraintes de QoS ont été également prises en compte.

Les résultats de simulation ont démontré les performances supérieures de la nouvelle stratégie d'allocation de ressources PSO-PFS^{noma} par rapport aux autres schémas en termes de capacité totale, d'équité, d'efficacité spectrale et énergétique. Avec ses caractéristiques distinctes, NOMA reste le meilleur candidat pour les futurs réseaux 5G.

Conclusion générale et perspectives

La gestion optimale des ressources radio constitue un des plus grands enjeux des opérateurs radio-mobiles vue la rareté du spectre fréquentiel. En effet, ils doivent répondre à une demande vertigineuse en termes de service multimédias sans fil ainsi qu'à un trafic de données qui ne cesse de croître d'une manière exponentielle, d'où l'apparition d'une nouvelle génération 5G.

Tout au long de ce mémoire, nous avons étudié le problème de l'allocation de ressources en lien descendant dans une cellule tri-sectorielle 5G utilisant les systèmes NOMA et OFDMA. Dans ce type de systèmes de communications il faut combattre adéquatement l'effet des trajets multiples, dans le but de garantir une meilleure qualité de service qui est évaluée sous trois propriétés, assurer une distribution équitable de ressource, maximiser le débit et minimiser le délai ainsi satisfaire tous les utilisateurs.

Pour résoudre ce problème nous avons proposé une nouvelle stratégie d'allocation de ressources basée sur l'hybridation entre l'algorithme Proportional Fair Scheduling (PFS) et l'algorithme Particle Swarm Optimization (PSO) utilisant le principe de superposition donné par NOMA, afin de permettre la transmission des données large bande sur la même fréquence. Cette stratégie concerne un modèle mathématique étudiant les conditions d'état de canal des utilisateurs afin d'aider ceux qui se trouvent dans un emplacement critique introduisant un faible SINR par rapport à ceux qui présentent de bonne condition de canal et surmonter ainsi la limitation en débit de l'algorithme opportuniste PFS.

L'algorithme PSO a rencontré un franc succès en raison de sa simplicité et de son efficacité sur une vaste gamme de problèmes d'allocation de ressources et a fait l'objet de nombreux travaux de recherches, qui ont abouti à des performances optimales.

L'originalité de nos travaux réside dans la prise en compte d'un nombre élevé d'utilisateurs mobiles dans la cellule, ainsi que leurs demandes. D'autre part, les contraintes d'allocation de ressources ont été prises en compte. Par ailleurs, les algorithmes utilisés sont susceptibles d'être implémentés dans un système réel.

Les résultats de nos simulations ont montré que l'algorithme hybride basé sur les systèmes NOMA est très efficace et apporte de meilleures performances en matière de débit, de l'équité et du délai. Il a aussi montré une amélioration significative de l'efficacité spectrale et énergétique, ce qui a donné un pourcentage élevé d'utilisateurs satisfaits (80%). Ce nouveau système NOMA a donc permis d'aboutir à des allocations de bien meilleure qualité par rapport aux systèmes OFDMA.

En perspectives à ce modeste travail, il serait intéressant d'explorer les avantages que pourrait procurer l'algorithme PSO-PFS basé sur les systèmes NOMA dans les réseaux sans fils :

- Dans le système étudié nous avons considéré une seule cellule tri-sectorielle. En réalité, plusieurs cellules mitoyennes peuvent entrer en interférences à leurs extrémités. Pour remédier à ces interférences, une meilleure solution consisterait à allouer aux utilisateurs de bordures, des ressources qui correspondent à des bandes de fréquences qui ne rentrent pas en conflit avec les fréquences utilisées par la cellule adjacente.
- Il serait intéressant d'appliquer notre approche dans un système utilisant une seule liaison en mode D2D plutôt que d'utiliser à la fois une liaison montante et une liaison descendante.

Bibliographie

- [1] Cisco visual networking Index, “Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022”, 2019.
- [2] NGMN. Alliance, “5G white paper”, Next generation mobile networks, white paper, volume 1, 2015.
- [3] H. Tabassum, M. S. Ali, E. Hossain, M. Hossain et D. I. Kim, “Non-orthogonal multiple access (NOMA) in cellular uplink and downlink : Challenges and enabling techniques”, arXiv preprint arXiv :1608.05783, 2016.
- [4] A. Rahil, “Gestion du Handover dans les réseaux hétérogènes mobiles et sans fil”, Thèse de doctorat, Dijon, 2015.
- [5] Y. Bouguen, E. Hardouin et F.-X. Wolff, “LTE pour les reseaux 4G”, Editions Eyrolles, 2012.
- [6] E. M. Roche, B. H. Dickens et W. Townes, “La prochaine génération de téléphonie mobile (5G) et ses implications (Infrastructure, Réglementation)”, Netcom. Réseaux, communication et territoires, numéro 32-1/2, pages 139–162, Netcom Association, 2018.
- [7] L. Lewis, “Infographic : What Happens In An Internet Minute 2020”. <https://www.allaccess.com/merge/archive/31294/infographic-what-happens-in-an-internet-minute>, 10 Mars 2020.
- [8] M. Ezzaouia, “Allocation de ressource opportuniste dans les réseaux sans fil multicellulaires”, Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique Bretagne Pays de la Loire, 2018.
- [9] Arcep, “Les enjeux de la 5G”, Rapport technique, Autorité de régulation des communications électroniques et des postes, Mars 2017.
- [10] Z. Pi et F. Khan, “An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems”, IEEE communications magazine, volume 49, pages 101–107, 2011.
- [11] NTTDocomo, “5G Radio Access : Requirements, Concept and Technologies”, white paper, Jul, 2014.

-
- [12] A. Ericsson, “5G Radio Access : Capabilities and Technologies”, Rapport technique, 2016.
- [13] S. Chaouch, “Gestion Des Ressources Des Réseaux Cloud RAN Dans Un Contexte 5G”, Thèse de doctorat, Télécom SudParis, 2017.
- [14] “PPE-Based Compounds for 5G Base Station Antennas”. <https://www.ptonline.com/products/materials-ppe-based-compounds-for-5g-base-station-antennas>, Juillet 2019.
- [15] V. Garcia, “Optimisation du partage de ressources pour les réseaux cellulaires auto-organisés”, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2012.
- [16] A. R. Mishra, “Fundamentals of Network Planning and Optimisation 2G/3G/4G : Evolution to 5G”, John Wiley & Sons, 2018.
- [17] A. Gondran, “Modélisation et optimisation de la planification des réseaux locaux sans fil”, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2008.
- [18] K. Jaffrès-Runser, “Méthodologies pour la planification de réseaux locaux sans-fil”, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2005.
- [19] M. A. Ouamri, “Optimisation du réseau de téléphonie mobile pour une couverture maximale d’une région urbaine”, Thèse de doctorat, Université A.MIRA béjaia, 2017.
- [20] A. Ragaleux, “Mécanismes d’accès multiple dans les réseaux sans fil large bande”, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 2016.
- [21] K. Kim, G.-M. Yeo, B.-H. Ryu et K. Chang, “Interference analysis and subchannel allocation schemes in tri-sectorized OFDMA systems”, IEEE 66th Vehicular Technology Conference, pages 1857–1861, 2007.
- [22] M. R. Hojeij, “Resource allocation techniques for non-orthogonal multiple access systems”, Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique Bretagne Pays de la Loire, Mai 2018.
- [23] S. Zenadji, “Allocation de ressources dans une cellule 5G tri-sectorielle”, Thèse de doctorat, Université A.MIRA béjaia, 2020.
- [24] N. Benghabrit, “Allocation de ressources dans les réseaux radio cognitifs”, Thèse de doctorat, Université Oran1 Ahmed Ben Bella, Mars 2019.
- [25] P. Mary, “Etude analytique des performances des systèmes radio-mobiles en présence d’évanouissements et d’effet de masque”, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2008.

-
- [26] S. R. Saunders et A. Aragón-Zavala, “Antennas and propagation for wireless communication systems”, John Wiley & Sons, deuxième édition, 2007.
- [27] X. Lagrange, “Principe de la transmission OFDM-utilisation dans les systemes cellulaires”, Editions Techniques de l’Ingénieur, 2012.
- [28] B. Maaz, “Radio resource allocation in 5G wireless networks”, Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, 2017.
- [29] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li et K. Higuchi, “Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access”, IEEE 77th vehicular technology conference (VTC Spring), pages 1–5, 2013.
- [30] J. Farah, E. Sfeir, C. A. Nour et C. Douillard, “New resource allocation techniques for base station power reduction in orthogonal and non-orthogonal multiplexing systems”, IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), pages 618–624, 2017.
- [31] O. A. Saraereh, A. Alsaraira, I. Khan et P. Uthansakul, “An Efficient Resource Allocation Algorithm for OFDM-Based NOMA in 5G Systems”, Electronics, volume 8, page 1399, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2019.
- [32] Y. Liu, Z. Qin, M. ElKashlan, Z. Ding, A. Nallanathan et L. Hanzo, “Non-orthogonal multiple access for 5G and beyond”, arXiv preprint arXiv :1808.00277, 2018.
- [33] S. Islam, M. Zeng et O. A. Dobre, “NOMA in 5G systems : Exciting possibilities for enhancing spectral efficiency”, arXiv preprint arXiv :1706.08215, 2017.
- [34] M. Pinedo, “Scheduling : Theory, algorithms and systems”, 1995.
- [35] A. Bahillo Martinez, “Evaluation of multiuser scheduling algorithm in OFDM for different services”. Mémoire de D.E.A., NTNU, 2006.
- [36] F. Bendaoud, M. Abdennebi et F. Didi, “Performances des algorithmes d’ordonnancement dans LTE Uplink”, Revue Méditerranéenne des Télécommunications, volume 4, 2014.
- [37] H. Hamouda, M. O. Kabaou et M. S. Bouhlel, “A Novel Multi-step Opportunistic Scheduling Scheme for Streaming Applications over OFDMA Wireless Systems”, IEEE 31st International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA), pages 554–561, 2017.
- [38] M.-R. Hojeij, C. Abdel Nour, J. Farah et C. Douillard, “Weighted proportional fair scheduling for downlink nonorthogonal multiple access”, Wireless Communications and Mobile Computing, Hindawi, 2018.
-

-
- [39] M. Bombrun et A. Sene, “L’optimisation par essaim particulaire pour des problèmes d’ordonancement”, Rapport d’ingénieur Projet de 2ème année, Institut Supérieur d’Informatique de Modélisation et de leurs Applications, 2011.
- [40] J. Kennedy et R. Eberhart, “Particle swarm optimization”, Proceedings of ICNN’95-International Conference on Neural Networks, volume 4, pages 1942–1948, 1995.
- [41] S. Blouin, “Science et le militaire”. <http://www.journal.forces.gc.ca/vol13/no2/page26-fra.asp>, juin 2011.
- [42] H. Xiao, Y. Wang, Q. Cheng et Y. Wang, “An improved PSO-based power allocation algorithm for the optimal EE and SE tradeoff in downlink NOMA systems”, IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), pages 1–5, 2018.
- [43] L. Brikh, O. Guenounou, F. Yahiaoui, M.-a. Kacimi et A. Ouaret, “Optimization of TSK Fuzzy Model Using New Improved PSO”, International Journal of Control Theory and Applications, pages 323–333, 2016.
- [44] M. Eslami, H. Shareef, M. Khajezadeh et A. Mohamed, “A survey of the state of the art in particle swarm optimization”, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, volume 4, pages 1181–1197, Maxwell Science Publishing, 2012.
- [45] S. Zenadji, C. Gueguen, L. Brikh, L. Talbi et A. Khireddine, “New strategy for resource allocation using PSO-PFS hybrid”, International Journal of Wireless and Mobile Computing, volume 18, pages 175–182, Inderscience Publishers (IEL), 2020.
- [46] Y. Li, L. J. Cimini et N. R. Sollenberger, “Robust channel estimation for OFDM systems with rapid dispersive fading channels”, IEEE Transactions on communications, volume 46, pages 902–915, IEEE, 1998.
- [47] M. Ezzaouia, C. Gueguen, M. Ammar, S. Baey, X. Lagrange et A. Bouallegue, “A dynamic inter-cellular bandwidth fair sharing scheduler for future wireless networks”, Physical Communication, volume 25, pages 85–99, Elsevier, 2017.
- [48] V. Pathak, D. Roy, K. Chandra et S. K. Singh, “Cross Layer Aware Adaptive MAC based on Knowledge Based Reasoning for Cognitive Radio Computer Networks”, arXiv preprint arXiv :1006.3374, 2010.
- [49] C. Xiong, G. Y. Li, S. Zhang, Y. Chen et S. Xu, “Energy-and spectral-efficiency tradeoff in downlink OFDMA networks”, IEEE transactions on wireless communications, volume 10, pages 3874–3886, IEEE, 2011.
-

Résumé

Ce mémoire traite le problème d'allocation de ressources dans le sens descendant des réseaux cellulaires tri-sectorielles 5G, qui sont confrontés à des défis en termes de prise en charge d'un trafic de données élevé avec des exigences de QoS différentes. En d'autres termes, le canal de propagation est sujet au multi trajet et aux évanouissements, ce qui résulte une mauvaise distribution de ressources. À cette fin, une technique d'accès multiple non orthogonal (NOMA) a été récemment proposée comme un candidat prometteur pour les futurs accès radio, afin d'améliorer les performances du réseau en termes d'efficacité spectrale, de débit et d'équité entre utilisateurs. Cette technique permet la cohabitation de deux ou plusieurs utilisateurs par sous-porteuse. Une étude comparative a été étudiée pour l'allocation des ressources dans les système NOMA et OFDMA, en utilisant la nouvelle approche hybrid basée sur l'algorithme opportuniste Proportional Fair Scheduling (PFS) et l'algorithme évolutionnaire Particle Swarm Optimization (PSO). Cette stratégie concerne un modèle mathématique étudiant les conditions d'état de canal des utilisateurs pour aider les utilisateurs dans un emplacement critique et surmonter ainsi la limitation en débit de l'algorithme opportuniste PFS. L'objectif de cette étude consiste à garantir une distribution optimale de ressources entre les utilisateurs quel que soit leurs position et la charge des secteurs dans la cellule, de manière à maximiser une fonction d'utilité. Les résultats obtenus par simulation, montrent que les performances de la méthode proposée avec le système NOMA sont nettement meilleures que celles avec OFDMA, et permettent d'obtenir une très bonne équité entre les utilisateurs tout en maximisant le débit et l'efficacité spectrale et énergétique.

Mots clé : 5G, NOMA, allocation de ressources, cellule tri-setorielle, PSO-PFS.

Abstract

This memoir addresses the problem of resource allocation in downlink 5G tri-sectoral cellular networks, who face challenges in terms of supporting high data traffic with different QoS requirements. In other words, the propagation channel is prone to multipath fading, resulting in a poor distribution of resources. To this end, non-orthogonal multiple access (NOMA) has recently emerged as a promising candidate for future radio access, in order to improve network performance in terms of spectral efficiency, throughput, and fairness between users. This technique allows the cohabitation of two or more users per subcarrier. A comparative study was investigated for resource allocation in NOMA and OFDMA systems, using the new hybrid approach based on the opportunistic Proportional Fair Scheduling (PFS) algorithm and the evolutionary Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. This strategy is concerned mathematical model studying the channel state conditions of users to help the users in a critical location and thereby overcome the throughput limiting of the opportunistic PFS algorithm. The objective of this study is to ensure an optimal distribution of resources among users whatever their position and the load of sectors in the cell, so as to maximize a utility function. The results obtained by simulation, show that the performance of the proposed method with NOMA system is significantly better than with OFDMA, and allows to obtain a very good fairness between users while maximizing throughput and spectral and energy efficiency.

Keywords : 5G, NOMA, resource allocation, tri-sectoral cell, PSO-PFS.