Déploiement de la 5G dans un contexte IoT

Hager Hafaiedh

▶ **To cite this version:**

Hager Hafaiedh. Déploiement de la 5G dans un contexte IoT. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université Gustave Eiffel; Université de la Manouba (Tunisie), 2022. Français. NNT : 2022UEFL2035 . tel-04147739

HAL Id: tel-04147739
https://theses.hal.science/tel-04147739

Submitted on 1 Jul 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Déploiement de la 5G dans un contexte IoT

Thèse de doctorat de l'Université Gustave Eiffel

ÉCOLE DOCTORALE MATHÉMATIQUES ET STIC
Spécialité de doctorat: réseaux sans fil
Unité de recherche : LRT

Thèse présentée et soutenue à l'Université Gustave Eiffel, par

Hager HAFAIEDH

Composition du Jury

Paul Muhelethaler Directeur de recherche, INRIA,France	Rapporteur
Sofiane OUNI Professeur, INSAT Tunisie	Rapporteur
Nadjib AIT SAADI UVSQ Paris-Saclay, France	Examinateur
Anis Aouiti Professeur, TSP,IMT,IPP Paris,France	Examinateur
Sidi-Mohammed SENOUCI Professeur, Université de Bourgognes, France	Examinateur
Rami LANGAR Professeur,UGE, France et ETS,Canada	Directeur de thèse
Leila AZOUZ SAIDANE Professeur,ENSI,Manouba, Tunisie	Co-Directrice de thèse
Ines EL KORBI HDR,Maître de conférences Université de Bourgognes France	Co-Encadrante

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mes directeurs de thèse : Mme la professeure Leila AZOUZ SAIDANE (Professeure à l'ENSI Université de la Manouba) qui m'a encadrée tout au long de cette thèse et qui m'a fait partager ses brillantes intuitions. Qu'elle trouve ici le fruit de mes efforts comme témoignage de mon très grand respect. Un grand merci pour sa patience et sa disponibilité. Je remercie Mr le professeur Rami LANGAR, (Professeur à l'Université Gustave Eiffel (France) et école de Technologie Supérieure de Montréal (Canada)) pour sa co-direction. Je lui suis vivement reconnaissante de m'avoir accueillie dans son équipe et de m'avoir permis de mener à bien ce travail. Nos discussions, toujours très fructueuses, ont beaucoup compté dans l'orientation de mes recherches et l'aboutissement de mes années d'études doctorales. Je suis très reconnaissante à Mme la docteure Ines El KORBI que je remercie de m'avoir encadrée, soutenue et fait partager sa passion pour la recherche tout au long de cette thèse.

J'adresse tous mes remerciements à Monsieur Paul Muhlethaler, Directeur de recherche à l'INRIA, France, ainsi qu' à Monsieur Sofiane OUNI, Professeur à l'INSAT, Tunis, Tunisie, de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être rapporteurs de cette thèse. J'exprime ma gratitude à Monsieur Nadjib AIT SAADI, Professeur à l'Université de UVSQ Paris-Saclay, France , Monsieur Anis LAOUITI, Professeur à l'TSP, IMT, IPP, Paris, France et à Monsieur Sidi-Mohammed SENOUCI, Professeur à l'Université de Bourgogne, France, qui ont bien voulu être examinateurs.

J'exprime également ma sincère gratitude envers Mr le Pr. Abdelmajid BEN HAMMADOU,(Professeur au Centre de Recherche Numérique CRNS - Université de Sfax) qui m'a soutenue depuis le début de ma thèse. Je n'oublierai jamais ses encouragements. Enfin, je ne remercie jamais assez mes sœurs et mes parents pour leur appui et leur amour (prouvé surtout dans les moments difficiles). Je remercie le reste de ma famille et mes ami(e)s et collègues pour leur précieux soutien.

RÉSUMÉ

L'Internet des Objets présente de nombreux avantages pour divers secteurs de notre société, dont la possibilité de connecter, via les terminaux de communication, les objets de tout les jours (voitures, thermostats,bâtiments,ect...) à Internet. Grâce à l'IoT, il est désormais possible de partager et collecter des informations de manière quasi-automatique entre le monde physique et tangible, et la dimension virtuelle et digitale.

Dans ce contexte, l'apparition de la 5ème génération des réseaux sans fil s'avère une aubaine sans précédent. En effet, la 5G apporte plusieurs améliorations au niveaux de plusieurs couches réseaux, de manière à faciliter la virtualisation des réseaux sans fil.

La présente thèse de doctorat en informatique propose plusieurs standards qui faciliteront le déploiement de la 5G. Ces standards ont pour rôle d'améliorer les condidions de fonctionnement des objets connectés, notamment ceux qui sont servis par deux technologies différentes de communication.

Par conséquent, un ensemble de modèles ont été developpés afin de garantir la coexistence entre les réseaux sans-fil hétérogènes. En particulier le WiFi et la LTE-U, sur la bande 5Ghz.
Cet ensemble de modèles est à base des théories de jeux coopératifs. La théorie des jeux est une sous-classe de la théorie des décisions. Elle constitue le processus de modélisation de l'interaction stratégique entre deux ou plusieurs joueurs dans une situation contenant des règles et des résultats définis.
L'ensemble des approches présentées combine la théorie des jeux, avec d'autres frameworks comme l'apprentissage automatique. En effet, l'originalité de l'ensemble des modèles proposés se décline selon les cinq volets suivants qui synthétisent nos contributions.
Mots clés : WiFi, LTE, SBS, WAP, 5G, coexistence.

ABSTRACT

The Internet of Things has many advantages for various sectors of our society, including the possibility of connecting, via communication terminals, everyday objects (cars, thermostats, buildings, etc.) to the Internet. Thanks to the IoT, it is now possible to share and collect information almost automatically between the physical and tangible world, and the virtual and digital dimension. In this context, the appearance of the 5th generation of wireless networks is proving to be an unprecedented boon. Indeed, 5G brings several improvements at several network layers, so as to facilitate the virtualization of wireless networks. This doctoral thesis in computer science proposes several standards that will facilitate the deployment of 5G. The role of these standards is to improve the operating conditions of connected objects, in particular those which are served by two different communication technologies. Therefore, a set of models have been developed in order to guarantee the coexistence between the heterogeneous and the erogenous wireless networks. In particular WiFi and LTE-U, on the 5Ghz band. This set of models is based on cooperative game theories. Game theory is a subclass of decision theory. It constitutes the process of modeling the strategic interaction between two or more players in a situation containing rules and rules. defined results. The set of approaches presented combines game theory with other frameworks such as machine learning. Indeed, the originality of all the proposed models is broken down into the following five sections which summarize our contributions.

Key Words : WiFi, LTE, SBS, WAP, 5G, coexistence.

Table des matières

Introduction générale **1**

CHAPITRE I Etat de l'art **3**

1 Concepts fondamentaux . . . 3
1.1 Présentation de la LTE-A . . . 3
1.1.1 Améliorations de l'agrégation de porteuses LTE . . . 4
Couche physique : . . . 5
PCFICH . . . 6
PDCCH . . . 6
PHICH . . . 6
1.2 Présentation de la 4G . . . 6
1.2.1 Première génération . . . 6
1.2.2 Deuxième génération . . . 6
1.2.3 Troisième génération . . . 7
1.2.4 Caractéristiques de la technologie de quatrième génération . . . 7
1.3 Un aperçu du monde du sans fil vers la 5G . . . 8
1.3.1 Evolution des technologies d'accès radio . . . 9
1.3.2 Exigences clés de conception du RAN 5G . . . 9
2 Cadre d'étude . . . 9
3 Approches pour la coexistence sur la bande 5 GHz . . . 11
3.1 Approches basées sur la LBT (Listen Before Talk) . . . 12
3.2 Approches basées sur la théorie des jeux . . . 16
4 Problématique et orientation . . . 18
5 Conclusion . . . 19

CHAPITRE II Jeu de coalition canonique pour la coexistence WiFi et LTE sur la bande 5 GHz **21**

1 Contributions des différentes théories de jeux pour la coexistence WiFi/LTE-U . 22

1.1 Jeux compétitifs . . . 23
1.2 Jeux coopératifs . . . 23
2 Modèle du Système . . . 24
2.1 Débit de données de l'utilisateur LTE-U . . . 25
2.2 Debit des utilisateurs WiFi . . . 27
2.3 Formulation du problème . . . 29
3 Description de la Solution . . . 30
3.1 Jeu coopératif de la coalition . . . 31
3.2 Fonction caractéristique du jeu . . . 32
3.3 Le Nucleolus comme concept de solution . . . 33
4 Le jeu de la "Bankruptcy" . . . 35
4.1 Allocation des ressources pour le WiFi et la LTE-U . . . 37
5 Résultats de la simulation . . . 37
6 Conclusion . . . 40

CHAPITRE III Jeu coopératif basé sur Q-Learning pour une coexistence optimale entre les systèmes WiFi et LTE-U 41

1 Apprentissage par renforcement . . . 41
1.1 Principe et Définitions . . . 41
1.2 La phase explortative de l'apprentissage par renforcement . . . 43
2 Apprentissage Q-learning . . . 44
2.1 L'algorithme du Q-learning . . . 45
2.2 Implémentation du Q-learning . . . 46
2.2.1 Approximation des fonctions . . . 46
2.2.2 Quantification . . . 46
3 Description du modèle . . . 47
4 Description de la solution . . . 47
5 Résultats des simulations et discussions . . . 52
6 Conclusion . . . 56

CHAPITRE IV Allocation des ressources résiduelles en se basant sur des techniques de classification 57

1 Les méthodes de classification . . . 57
1.1 Les apprenants passifs . . . 57
1.2 Les apprenants actifs . . . 58

1.3 Algorithmes de classification . . . 58
2 Les arbres de décision . . . 58
2.1 Les réseaux de neurones . . . 59
2.1.1 Composition des réseaux de neurones . . . 61
Les neurones . . . 61
Connections et poids . . . 62
Fonction de propagation . . . 62
2.1.2 Organisation des réseaux de neurones . . . 63
2.1.3 Hyperparamètre . . . 63
2.1.4 Apprentissage . . . 63
Taux d'apprentissage . . . 63
Fonction du coût . . . 64
Rétropropagation du gradient . . . 64
3 Hypothèses du modèle objet de la solution . . . 64
3.1 Calcul du "time-slot" . . . 64
3.2 Démonstrations des formules . . . 66
4 Réallocation des ressources spectrales en utilisant la logique floue . . . 66
4.1 Description de l'algorithme . . . 66
4.2 Fonction d'appartenance floue . . . 67
4.3 Motivations d'application de la logique floue . . . 68
4.4 Étapes de réallocations des ressources spectrales suivant la logique floue 69
4.5 Évaluation des Rendements . . . 70
5 Réallocations des ressources spectrales en utilisant l'apprentissage automatique 73
5.1 Description de la solution . . . 73
5.1.1 Perceptrons multicouches (MLP) et réseaux de neurones artificiels (RNA) . . . 74
5.1.2 Solution du Bankruptcy . . . 75
5.1.3 Réallocation des ressources à l'aide du Machine Learning . . . 77
5.2 Évaluation et discussion des performances . . . 79
6 Conclusion . . . 81

CHAPITRE V Générateur de poly-jeux basé sur l'apprentissage automatique pour la coexistence WiFi / LTE 82

1 Les jeux de négociations de Nash . . . 82
1.1 Definition . . . 82

1.2 Description formelle 83
1.2.1 Ensemble de faisabilité(viabilité) 83
1.2.2 Les points de désaccord 83
1.3 Analyse de l'équilibre 83
1.4 Formulation mathématique 84
1.5 Autres Approches de négociation 85
1.5.1 Solution de négociation Kalai-Smorodinsky 85
1.5.2 Solution de négociation égalitaire 85
2 Les jeux compétitifs répétitifs 85
2.1 Definition 85
3 Description du Framework 85
3.1 Description du Modèle 85
3.2 Réseaux de neurones artificiels (RNA) 86
3.3 Principes du poly-jeux 88
4 Évaluation et discussion des performances 90
5 Conclusion 95

Conclusion générale **96**

Glossaire **100**

Liste des publications **104**

Bibliographie **105**

Liste des figures

I.1 L'évolution des communications mobiles de la 1G à la 5G 4
I.2 Aggrégation de porteuses 11
I.3 Le mécanisme du "Listen Before Talk" des SBS LTE-U 12
I.4 Selection Dynamique des canaux dans les bandes sans licence 13
I.5 Le modèle de Markov pour la SBS LTE-U compatible à la LBT lors de la co-existence avec le réseau WiFi. 15

II.1 Illustration du Système 25
II.2 Classification des jeux coopératifs 32
II.3 Comparaison des débits moyens des SBS dans la méthode proposée 38
II.4 Comparaison des débits moyens entre les SBS LTE dans un rayon de 50m 38
II.5 Débits alloués moyens entre les utilisateurs WiFi et LTE-U 39

III.1 Apprentissage par renforcement 45
III.2 Illustration des macro et micro-allocations spectrales 49
III.3 Solution au problème de coexistence 50
III.4 Allocation de ressources pour chaque SBS 52
III.5 Ressources restantes après l'allocation aux utilisateurs 54
III.6 Comparaison de débits entre notre approche et celle du multi-game 54
III.7 Comparaison de l'indice de Jain entre notre approche et celle du multi-game . . 55
III.8 Évaluation de performance de l'apprentissage du système 55

IV.1 Exemple d'un réseau de neurones 59
IV.2 Description des noeuds de décision 60
IV.3 Illustration d'un neurone biologique 60
IV.4 Exemple simplifié d'un réseau de neurones artificiel 62
IV.5 Illustration du modèle 67
IV.6 Architecture de la logique floue 69
IV.7 Exemple de la logique floue(fuzzy logic) 69

IV.8 Comparaison de satisfaction des utilisateurs LTE 71
IV.9 Efficacité spectrale des utilisateurs WiFi grâce à notre approche 71
IV.10Debits alloués aux utilisateurs LTE en fonction du nombre des SBS 72
IV.11MLP Dataset for each SBS 74
IV.12Le framework du réseau de neurones étudié 76
IV.13Illustration de calcul du nucléolus pour trois joueurs 77
IV.14Comparaison des débits moyens par utilisateur atteints 79
IV.15Comparaison des indicateurs de Jain 80
IV.16Évolution de la fonction d'erreur d'apprentissage en fonction des "epoches" . . . 81

V.1 L'architecture de réseau de neurones artificiels 88
V.2 Illustration du modèle 88
V.3 Illustration du poly-jeux 90
V.4 Fonction d'erreur d'apprentissage 92
V.5 Comparaison des indices de Jain 93
V.6 Efficacité Spectrale des utilisateurs WiFi 93
V.7 Débits alloués aux utilisateurs LTE-U 95

Liste des tableaux

I.1 Tableau comparatif des approches existantes 19

II.1 Notations 29
II.2 Exigences QoS des applications multimedia 36
II.3 Valeurs des paramètres de la simulation 36

III.1 Exigences QoS des applications multimedia 53
III.2 Valeurs des paramètres de la simulation 53

IV.1 Notations 65
IV.2 Exigences de qualité de service des applications multimédias 70
IV.3 Valeurs des paramètres de simulation 72

V.1 Notations 91
V.2 Exigences de qualité de service des applications multimédias 91
V.3 Valeurs des paramètres de simulation 91

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La vision de la 5ème génération de communications mobiles consiste à fournir des débits de données très élevés (généralement de l'ordre du Gbit/s), une latence extrêmement faible, une montée de la capacité des stations de base et une amélioration significative de la qualité de service perçue par les utilisateurs (QoS), par rapport aux réseaux 4G LTE actuels. La prolifération toujours croissante des appareils intelligents, l'introduction de nouvelles applications multimédias émergentes, ainsi qu'une augmentation exponentielle de la demande et de l'utilisation de données sans fil (multimédia) créent déjà un problème important sur les réseaux cellulaires existants. Les systèmes sans fil 5G, avec des débits de données, une capacité, une latence reduite et une qualité de service améliorés, devraient être la panacée de la plupart des problèmes actuels des réseaux cellulaires. Les réseaux sans fil d'aujourd'hui devront évoluer de diverses manières. Des composants technologiques récents tels que l'accès par paquets à haut débit (HSPA) et l'évolution à long terme (LTE) seront lancés en tant que segment de l'avancement des technologies sans fil actuelles. Néanmoins, les composants auxiliaires peuvent également constituer de futures nouvelles technologies sans fil, qui peuvent compléter les technologies évoluées. Des exemples de ces nouveaux composants technologiques sont différentes manières d'accéder au spectre et à des plages de fréquences considérablement plus élevées, l'instigation de configurations d'antenne massives, la communication directe d'appareil à appareil (M2M) et des déploiements ultra-denses. L'imaginaire de notre avenir est une société en réseau avec un accès abondant à l'information et au partage des données qui est accessible partout et à chaque fois pour tous et pour tout.

Pour réaliser cette idée, de nouveaux composants technologiques doivent être examinés pour l'évolution des technologies sans fil existantes. Les technologies sans fil actuelles, telles que la technologie LTE du projet de partenariat de 3ème génération (3GPP), HSPA et le WiFi, intégreront de nouveaux composants technologiques qui aideront à répondre aux besoins de l'avenir.

Cette thèse s'intéresse à l'étude de la mise en place de réseaux de différents standards, en particulier entre le WiFi et la LTE sur les bandes sans licence. Cette étude traite des problèmes liés aux interférences rencontrées par les réseaux WiFi. En effet, le WiFi en tant que technologie utilise un mode de modulation nommé DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum), qui permet aux récepteurs de détecter les interfèrences avant de reconstruire le signal émis. Cela est possible grâce à l'étroitesse des bandes utilisées par les interfèrences par rapport au signal DSSS. Cette fonctionnalité reste toutefois vulnérable face aux réseaux autre que le WiFi. Les outils algorithmiques, développés tout au long de cette thèse, permettent de résoudre ces problèmes de coexistence, en changeant de point de vue de déploiement vers les réseaux WiFi. Par conséquent le niveau de coexistence entre les réseaux hétérogènes sera mesuré essentiellement par la satisfaction des utilisateurs des réseaux WiFi.
Les techniques de coexistence, utilisées exclusivement pour mitiger la dominance de la LTE-U dans les réseaux hétérogènes, sont présentées dans le chapitre 1.

Les approches de coexistence WiFi/LTE-U classiques, telles que la LBT, sont ensuite étudiées, afin d'exposer les différentes failles restantes qui vulnérabilisent la garantie de la QoS des utilisateurs WiFi.
Le jeu de coalition canonique est ensuite décrit en détail dans le chapitre 2. Son principe, ainsi que son mode de fonctionnement y sont expliqués. Nous verrons également les résultats des simulations, qui prouvent l'efficacité de ce jeu de coalition à diminuer la insatisfaction des utilisateurs WiFi dans les réseaux hétérogènes sur la bande des 5Ghz.
Nous étudions, dans le chapitre 3, l'apprentissage automatique par la Q-Learning, ainsi que sa contribution à l'optimisation de l'allocation temporelle aux SBS de la LTE. En effet, nous montrerons que l'application du Q-Learning permet un calcul déterministe de la durée d'accès aux ressources spectrales, contrairement à l'approche du "Bargaining", qui choisit une valeur de cette durée parmi les optima locaux d'un problème linéaire, donc pas nécessairement un optimum global. Le chapitre 4 présente un jeu coopératif, incrémenté d'un classifieur d'utilisateurs WiFi. L'objectif de cette incrémentation est d'optimiser la satisfaction des utilisateurs WiFi, lorsque leurs WAPs respectifs sont déployés à proximité des SBS LTE-U, tout en réexploitant les ressources spectrales résiduelles. Cette optimisation met en perspective la priorisation des utilisateurs d'un même réseau WiFi, en fonction de leurs besoins en débits. Ensuite, les approches mises au point dans les chapitres 2,3 et 4, seront encapsulées dans un "poly-jeu"/"poly-game" qui, grâce à l'apprentissage automatique, selectionne l'approche à utiliser en fonction des paramètres des réseaux. Le "poly-game" sera décrit en détail dans le chapitre 5. Enfin, le rapport de thèse s'achève par une conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART

Ce premier chapitre présente une synthèse de l'état de l'art sur la coexistence entre les différentes technologies formant les réseaux hétérogènes sur la bande sans licence. Il se compose de quatre parties. Dans la première partie nous introduisons les concepts de base liés aux réseaux déployés sur des bandes de fréquences au-delà des 5 GHz. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous présentons les cas de figure vers lesquels nous souhaitons orienter nos travaux. Ce sont les réseaux WiFi et LTE-U sur les bandes sans licence. Dans la troisième partie, nous exposons des travaux réalisés autour de la thématique étudiée. Nous proposons à cet effet une classification de ces travaux selon les approches algorithmiques employées, ainsi que les éléments des réseaux faisant l'objet de ces approches. Une critique de l'existant et une synthèse de la problématique seront présentées dans la dernière partie de ce chapitre. L'objectif est de voir globalement les principales défaillances liées aux travaux étudiés et de se positionner par rapport à l'existant.

1 Concepts fondamentaux

Cette partie introduit les concepts de base des réseaux sans fil ainsi que les bandes de fréquences.

1.1 Présentation de la LTE-A

La demande croissante de services haut-débit mobiles [1] avec un débit de données, une vitesse et une qualité de service élevés, a motivé le 3GPP[2][3] à développer la technologie LTE[4][5]. La version 8 de LTE permet une bande passante de 20 MHz avec un débit de données maximal de 300 Mbps sur la liaison descendante et de 75 Mbps sur la liaison montante, tandis que la

version 9 a introduit des fonctionnalités de services de diffusion multimédia, de services basés sur la localisation et d'autres améliorations telles que le double "Layer beamforming". Quant à la version avancée de LTE (LTE-A), elle répond aux exigences imposées par IMT (International Mobile Telecommunication)[6] à la quatrième génération, avec un débit de données

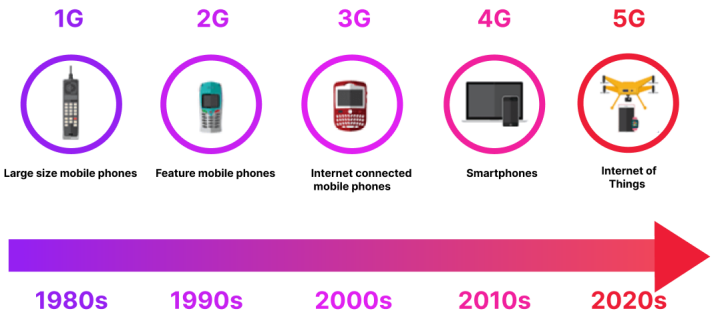

Figure I.1 – L'évolution des communications mobiles de la 1G à la 5G

maximal de 1 Gbps ainsi qu'une bande passante de fonctionnement jusqu'à 100 MHz pour la liaison descendante, le double "Layer beamforming" offre une faible latence par rapport à la LTE. Sa gestion efficace des interférences et ses coûts d'exploitation réduits rendent la LTE-A populaire parmi les opérateurs. Sa capacité globale, la gestion du réseau, ainsi que la gestion de la qualité de service sont les attributs qui font de la LTE-A une solution exemplaire. Ses versions ultérieures 11 et 12 offrent d'autres améliorations du MIMO(Multiple Inputs Multiple Outputs), de l'agrégation de transporteurs et de l'efficacité du spectre pour augmenter la vitesse et résoudre les problèmes de trafic de données.

1.1.1 Améliorations de l'agrégation de porteuses LTE

L'agrégation de porteuses (CA) est l'une des principales caractéristiques de la LTE-A car elle répond aux exigences de débit de données maximal de 1 Gbps en liaison montante et 500 Mbps en liaison descendante. Elle prend en charge à la fois le duplexage par répartition en fréquence (FDD) et le duplexage par répartition temporelle (TDD). La CA est conçue pour prendre en charge la rétrocompatibilité, c'est-à-dire que les appareils LTE de la version 10 doivent être capables de prendre en charge les appareils des versions 8 et 9.

La CA permet l'extension de la bande passante et vise à atteindre l'efficacité spectrale. Une bande passante maximale de 100 MHz peut être obtenue en agrégeant 5 porteuses de 20 MHz chacune, comme indiqué ci-dessous :

La porteuse composante peut avoir une bande passante de 1,4, 3, 5, 10, 15 ou 20 MHz et un maximum de cinq porteuses composantes peut être agrégé. Par conséquent, la bande passante

maximale est de 100 MHz. En CA, la transmission à large bande est activée par la communication de plusieurs (component carrier) CC dépassant 20 MHz de bande passante. Il existe deux types de CA :
a) Agrégation de porteuses interbandes contiguës.
b) Agrégation de porteuses intrabandes non-contiguës.

Dans les CA interbandes contiguës, la disposition des fréquences est telle que la communication entre les CC est réalisée par une bande contiguë supérieure à 20 MHz. Dans l'agrégation de porteuses intrabande non-contiguës, la communication est réalisée par l'utilisation de deux bandes de fréquences porteuses différentes. L'utilisation de deux bandes de fréquences permet d'atteindre un débit plus élevé et améliore la stabilité des porteuses avec des environnements de propagation différents. Ce type de CA est observé entre plusieurs opérateurs où le réseau est partagé entre eux. Les scénarios d'utilisation de CA incluent l'agrégation de plusieurs CC contigus dans la même bande, l'agrégation de plusieurs CC non-contigus dans la même bande et l'agrégation de plusieurs CC non-contigus situés dans différentes bandes. L'utilisation d'une architecture appropriée est indispensable pour mettre en œuvre l'un des scénarios d'utilisation.

Couche physique : Dans la liaison descendante de la couche physique, la LTE-A dispose du même système d'accès radio basé sur OFDMA que dans la version 8. Lorsque la bande passante est étendue à l'aide de CA, le signal de synchronisation effectue une recherche de cellule qui est transmise sur la fréquence centrale de chaque cellule où chacune a une fréquence centrale arrangée de 100 kHz. Le PBCH (Physical Broadcast Channel) est également multiplexé de la même manière. Ainsi, PBCH et SS (Synchronization Signals) peuvent être utilisés dans tous les CC. La modulation et le codage adaptatifs (AMC) et la demande de répétition automatique hybride (HARQ) sont effectués séparément sur chaque CC, en unités de CC connues sous le nom de "blocs de transport" qui sont ensuite combinés pour former un seul CC. Ceci est effectué sur le canal partagé de liaison descendante physique (PDSCH). Ces blocs de transport peuvent être réutilisés comme mentionné selon les spécifications de la version 8. En liaison montante, les signaux sont générés par le système SC-FDMA. Il existe trois nouveaux canaux de contrôle de liaison descendante : le canal indicateur de format de contrôle physique (PCFICH), le canal de contrôle de liaison descendante physique (PDCCH) et le canal indicateur d'ARQ hybride physique (PHICH).

PCFICH Dans ce canal, chaque CC aura sa propre information sur la taille de la région de contrôle.

PDCCH Ce canal effectue l'allocation des ressources de deux manières. La première façon est le gestionnaire de ressources où il alloue des ressources à PDSCH et PUSCH dans le même CC. L'autre façon d'allouer les ressources se fait par le *Carrier Indicator Field* (CIF). L'utilisation des ressources CIF d'un seul CC peut être allouée à plusieurs CC. Cela permet une grande flexibilité de planification et réduit les interférences entre les CC.

PHICH Ce canal inclut les mêmes aspects de transmission que ceux présents dans la version 8. Ce canal est utilisé dans le CC uniquement lorsque les informations de programmation doivent être transmises sur la liaison montante.

1.2 Présentation de la 4G

Avec la 4G, une gamme de nouveaux services et modèles sera disponible. Ces services et modèles doivent être examinés davantage pour leur interface avec la conception des systèmes 4G. La figure I.1 démontre la connectivité transparente des réseaux.

L'histoire et l'évolution du service mobile de la 1G (première génération) à la quatrième génération sont abordées dans cette section.

1.2.1 Première génération

Le processus a commencé avec les conceptions des années 1980 qui sont désormais connues sous le nom de 1G. Presque tous les systèmes de cette génération étaient des systèmes analogiques où la voix était considérée comme le trafic principal. Les normes sans fil de première génération utilisaient le TDMA et le FDMA simples. Ces systèmes pouvaient souvent être écoutés par des tiers. Certaines des normes utilisées sont la NMT, AMPS, Hicap, CDPD, Mobitex, DataTac, TACS et ETACS.

1.2.2 Deuxième génération

Les systèmes 2G (deuxième génération) conçus dans les années 1990 étaient encore principalement utilisés pour les applications vocales mais étaient basés sur la technologie numérique, y compris les techniques de traitement du signal numérique. Ces systèmes 2G fournissaient

des services de communication de données à commutation de circuits à faible vitesse. Toutes les normes appartenant à cette génération étaient centrées sur le commerce et elles étaient de forme numérique. La deuxième génération de systèmes de communication mobile sans fil a été une énorme réussite en raison de sa technologie révolutionnaire et des services qu'elle a apportés à ses utilisateurs. Outre un service vocal de haute qualité, la mobilité mondiale était une raison forte et convaincante pour les utilisateurs d'acheter des terminaux 2G. Les normes de deuxième génération sont la GSM, iDEN, D-AMPS, IS-95, PDC, CSD, PHS, GPRS, HSCSD et WiDEN.

1.2.3 Troisième génération

Pour répondre aux demandes croissantes de capacité de réseau, de débits requis pour le transfert de données à haute vitesse et les applications multimédias, les normes 3G ont commencé à évoluer. Les systèmes de cette norme sont essentiellement une amélioration linéaire des systèmes 2G. Ils sont basés sur deux infrastructures dorsales parallèles, l'une constituée de nœuds à commutation de circuits et l'autre de nœuds orientés paquets. La troisième génération (3G) a été lancée dans plusieurs parties du monde, mais le succès de la 2G a été difficile à se reproduire.

1.2.4 Caractéristiques de la technologie de quatrième génération

A) Performance élevée :
Les experts du secteur affirment que les utilisateurs ne pourront pas profiter des avantages d'un contenu multimédia riche sur les réseaux sans fil avec la 3G. En revanche, la 4G proposera une vidéo de très haute qualité comparable à la télévision HD (haute définition). Les téléchargements sans fil à des débits atteignant 100 Mbps, soit 50 fois la 3G, sont possibles avec la 4G.

B)Interopérabilité et roaming facile :
Les multiples normes de la 3G rendent difficile l'itinérance et l'interopérabilité sur divers réseaux, tandis que la 4G fournit une norme mondiale qui assure la mobilité mondiale. Divers réseaux d'accès sans fil hétérogènes se distinguent généralement en termes de couverture, de débit de données, de latence et de taux de perte de données. Par conséquent, chacun d'entre eux étant pratiquement conçu pour prendre en charge un ensemble différent de services et d'appareils spécifiques, la 4G englobera divers types de terminaux, qui peuvent avoir à fournir des services communs indépendamment de leurs capacités. Ce concept est appelé "personnali-

sation des services".

C)Services entièrement convergés :
Si un utilisateur souhaite pouvoir accéder au réseau à partir de nombreuses plateformes différentes : téléphones portables, ordinateurs portables, PDA, il est libre de le faire en 4G qui offre une connectivité suffisamment intelligente et flexible pour prendre en charge la vidéo en streaming, la téléphonie VoIP, les images fixes ou animées, e-mail, navigation Web, commerce électronique et services basés sur la localisation via une grande variété d'appareils. Cela signifie davantage de degrés de liberté pour les consommateurs de données et d'applications multimédia.

D)Coût bas :
Les systèmes 4G s'avéreront beaucoup moins chers que la 3G, car ils peuvent être construits sur des réseaux existants et n'obligeront pas les opérateurs à se réoutiller complètement et ne les forceront pas à acheter un spectre supplémentaire coûteux. En plus d'être beaucoup plus rentable, la 4G est spectralement efficace.

E)Appareils : interface plus conviviale
Les appareils 4G devraient être plus visuels et intuitifs que les systèmes actuels basés sur du texte et des menus. Ils pourront interagir avec l'environnement qui les entoure et agir en conséquence.

F)Evolutivité
C'est l'aspect le plus difficile des réseaux mobiles. Il fait référence à la capacité de gérer un nombre toujours croissant d'utilisateurs et de services. Étant donné qu'une couche centrale tout IP de la 4G est facilement évolutive, elle est parfaitement adaptée pour relever ce défi.

1.3 Un aperçu du monde du sans fil vers la 5G

La figure I.1 présente un aperçu du monde du sans fil vers la 5G du haut débit sans fil/mobile. Des directions techniques spécifiques ont été identifiées, afin d'obtenir un approvisionnement en ressources rentable, un ravitaillement approprié des applications et une augmentation de l'intelligence.

1.3.1 Evolution des technologies d‘accès radio

Une première direction pour améliorer la fourniture de services et la rentabilité a été l‘évolution - de la deuxième génération (2G) à la troisième génération (3G) et à la quatrième génération (4G) ou évolution à long terme (LTE) - avancée - de la téléphonie mobile/communications cellulaires. Les technologies 3G et 4G ont fait l‘objet de la normalisation du projet de partenariat 3G (3GPP). Parallèlement, il y a eu l‘introduction de divers autres systèmes à large bande sans fil locaux/métropolitains/personnels, normalisés dans le contexte de l‘IEEE. Cette évolution est principalement le résultat du développement des technologies avancées d‘accès radio (RAT), qui nous ont conduits de l‘accès multiple par répartition en fréquence/temps (FDMA/TDMA) et de l‘accès multiple par répartition en code à large bande (WCDMA), à la répartition orthogonale de la fréquence d‘accès multiple (OFDMA). En ce qui concerne la rentabilité, cette orientation vise principalement l‘amélioration de l‘utilisation des ressources (spectre et autres ressources radio).

1.3.2 Exigences clés de conception du RAN 5G

Des formes de communication telles que la multi-connectivité [7](par exemple, les communications simultanées d‘un périphérique avec plusieurs nœuds de réseau) et la communication de périphérique à périphérique (D2D) contrôlée par le réseau[8], sous la forme de communication point à point, multidiffusion ou diffusion[9]. Le RAN 5G devrait en outre prendre en charge un large éventail de déploiements physiques, des stations de base distribuées aux déploiements cloud-RAN centralisés ou aux clouds périphériques distribués. Différents types de backhaul et fronthaul doivent également être pris en charge avec une dégradation constante des performances en cas de réduction de la qualité du backhaul ou du fronthaul en termes de retard et de capacité. En outre, l‘auto-backhaul est considéré comme une caractéristique importante, où les appareils peuvent également agir comme des stations de base et établir eux-mêmes des liaisons de backhaul sans fil vers des stations de base donatrices appropriées. Enfin, le RAN 5G doit être hautement évolutif et économe en énergie, c’est-à-dire qu’il doit permettre une introduction efficace de nouvelles fonctionnalités et de nouveaux services et une rétrocompatibilité des appareils dans les versions futures.

2 Cadre d‘étude

Cette partie permet de se positionner dans le contexte de l‘ étude tout en présentant les cas de figure vers lesquels nous souhaitons orienter nos travaux.

La LTE sans licence (LTE-U) est une extension du standard LTE, développée par Qualcomm pour l‘utilisation de la technologie de radiocommunication 4G LTE dans le spectre sans licence. Elle repose essentiellement sur l‘agrégation de porteuses qui permet d‘utiliser plusieurs canaux de communication pour transférer des données en parallèle. La LTE sans licence peut potentiellement nous apporter des contributions précieuses comme la réutilisation des infrastructures existantes pour réduire les coûts supplémentaires, grâce au coût abordable du spectre sans licence. L‘ensemble du réseau central et des sites déployés pour la LTE sous licence sera réutilisé dans le spectre sans licence, avec uniquement des mises à jour dans les stations de base (SBS) LTE-U appelées eNB (EUTRAN Node B).

La couche PHY de LTE comprend les fonctionnalités UL (liaison montante) et DL (liaison descendante). Les exigences de cette couche sont des taux de transmission de crête élevés, une efficacité spectrale et des largeurs de bande à canaux multiples. Par conséquent, afin de répondre à ces exigences, la technologie OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) est utilisée en raison de sa robustesse contre les interférences et les évanouissements, en plus du MIMO (Multi Input Multi Output) qui permet d‘augmenter la capacité du canal et d‘augmenter la robustesse des transmissions. La couche MAC, d‘autre part, donne une interface entre les canaux logique et physique.

Les principales attentes du LTE-U sont sa capacité à tirer parti des bandes de fréquences existantes sans licence, assurant ainsi la coexistence avec d‘autres réseaux sans fil comme le WiFi et / ou Zigbee. L‘ architecture générique du réseau LTE-U consiste en une station de base (SBS) qui est centrale pour la transmission en liaison montante et / ou en liaison descendante depuis / vers plusieurs équipements utilisateur (UE).

Il existe deux modes de fonctionnement pour LTE-U :

- La liaison descendante supplémentaire (SDL) : seules les transmissions de liaison descendante fonctionnent dans le spectre sans licence. Les applications typiques de ce mode sont le téléchargement de musique / fichier et le streaming vidéo en ligne.
- Le Duplex Time Division (TDD) : les transmissions montantes et descendantes peuvent être utilisées dans le spectre sans licence. Bien que plus coûteux, le TDD offre la flexibilité d‘ajuster l‘allocation des ressources entre les modes de liaison descendante et montante.

D‘un point de vue opérationnel, un cadre de réseau d‘accès radio (RAN) commun sur l‘ensemble du réseau permet un fonctionnement et une gestion unifiés entre le spectre sous licence et sans licence, y compris la configuration, l‘autorisation, la facturation et la gestion des ressources radio (RRM). De plus, la planification conjointe et le déchargement flexible du trafic entre

les deux couches peuvent être facilement réalisés, car les cellules de composants secondaires (couche LTE-U) pourraient être activées / désactivées par des cellules primaires (couche LTE) à l'échelle de temps de plusieurs dizaines de millisecondes et le réseau peut sélectionner des couches sous licence ou sans licence pour le déchargement du trafic de manière dynamique [10]. La figure I.2 illustre comment LTE-U étend le spectre LTE natif par l'utilisation de bandes sans licence (agrégation de porteuses dans LTE), et la figure I.4 illustre la sélection dynamique des canaux.

Figure I.2 – Aggrégation de porteuses

En raison des limitations de puissance de transmission sans licence [10] et en raison des restrictions de faible puissance imposées par les réglementations sur les transmissions dans le spectre sans licence, la technologie LTE-U est principalement utilisée pour les petites cellules (femto et pico cell), même si les petites cellules peuvent fonctionner à la fois sur des bandes sous licence et sans licence. Les données destinées à être transmises au sein du réseau hétérogène seront également classées en fonction de ses exigences de qualité de service et de sa fiabilité. Par exemple, des données fiables et ayant des attentes élevées en matière de qualité de service seront transmises dans la bande de spectre sous licence. Le reste des données est transmis dans la bande sans licence.

3 Approches pour la coexistence sur la bande 5 GHz

Pour transmettre des données sur les bandes sans licence, la LTE-U doit faire face à d'autres technologies telles que WiFi ou Zigbee. De plus, plusieurs mécanismes peuvent être identifiés lorsqu'il s'agit de la coexistence harmonieuse, comme la sélection des canaux ou l'accès aux canaux. En général, ces mécanismes exploitent les domaines temps / fréquence à des fins de coexistence. Dans la section suivante, nous abordons les principaux problèmes rencontrés par la LTE-U en essayant d'accéder au spectre sans licence.

L'étude de l'état de l'art a permis de montrer que les approches de coexistence entre le WiFi

et la LTE-U varient selon différents critères.

Dans la suite, nous proposons une classification des principales stratégies de coexistence rencontrées dans la littérature. Le principe général de ces méthodes se base sur une exploitation des comportements des stations de base LTE-U, afin de réduire les risques d'interférence avec les WAP.

3.1 Approches basées sur la LBT (Listen Before Talk)

La première catégorie de techniques qui aborde le problème de la coexistence entre les technologies LTE-U et WiFi est basée sur une répartition équitable du spectre entre ces deux technologies. Dans cette catégorie, l'un des schémas les plus notoires est le schéma de la LBT (Listen Before Talk), où un nouveau protocole MAC a été proposé pour que les SBS LTE-U puissent accéder au spectre en présence d'un réseau WiFi déjà établi. Les utilisateurs sans fil de ce réseau utilisent le schéma DCF traditionnel (Distributed Coordination Function) pour accéder au support. Avec la LBT, les SBS LTE-U doivent détecter l'état du canal avant la transmission, c'est-à-dire si le canal cible est occupé par d'autres systèmes (comme WiFi ou Zigbee) à une échelle de la milliseconde.

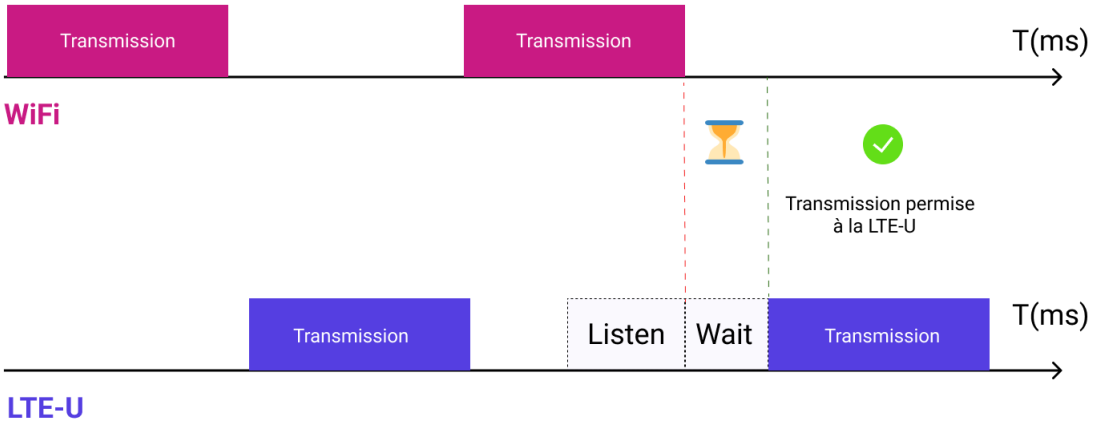

Figure I.3 – Le mécanisme du "Listen Before Talk" des SBS LTE-U

Cela signifie que les SBS LTE-U doivent attendre un laps de temps appelé "temps d'arrêt", après quoi, si la voie est libre, les appareils peuvent transmettre. Avec la LBT, il y aura un risque relativement moindre d'interférence avec le réseau WiFi.

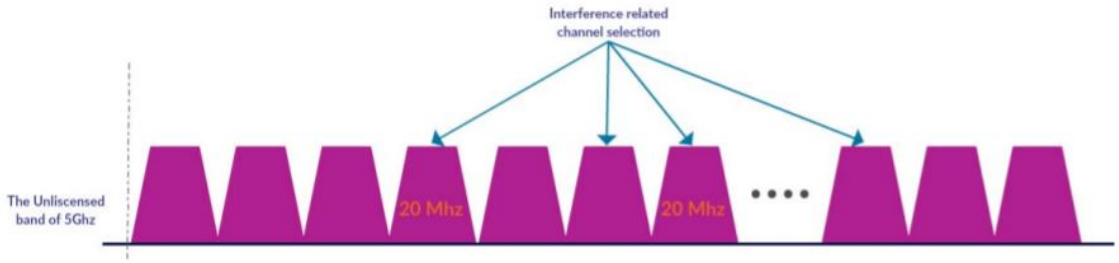

Figure I.4 – Selection Dynamique des canaux dans les bandes sans licence

Pour évaluer les performances de la LBT en coexistence avec le schéma DCF, les auteurs de [11] et [12] ont proposé un modèle analytique basé sur des chaînes de Markov pour récupérer la capacité de chaque accès réseau. Par conséquent, le schéma LBT est modélisé par une chaîne de Markov, comme le montre la figure I.3, où la station de base LTE n'accédera au canal qu'après une détection de fenêtres de créneaux horaires *H*. Par conséquent, il y aura des états *H*, allant de 0 à *H-1*, représentant le compteur d'attente restant de la SBS LTE-U . Dans le cas où une SBS parvient à atteindre la bande sans licence, elle l'occupera pendant une durée T_L. Au contraire du réseau WiFi, lorsque la SBS LTE-U est dans l'état *H-1*, il a presque une probabilité 1 de trouver un canal vide. Cela est dû au fait que le réseau WiFi lors des slots précédents a déjà été servi.

Soit p_L la probabilité qu'une SBS LTE trouve le canal occupé à tout intervalle de temps. Maintenant, si la SBS LTE-U trouve un canal inactif à l'état 0, il accède au canal pour la transmission de données puis passe à l'état *H-1* pour attendre sa prochaine chance d'accès à la chaîne. On note q_h la probabilité stationnaire de l'état *h*. Selon les procédures susmentionnées, la transition d'état q_h doit satisfaire aux conditions I.1 :

$$\begin{gathered}(1\text{-}p_L)q_h = q_{h-1}, h \in [1, 2, ..., H-2](a) \\ \sum_{h=0}^{H-1} q_h = 1(b) \\ q_{H-1} = q_{H-2}(c) \qquad\qquad (I.1)\end{gathered}$$

A partir du système d'équations ci-dessus, nous pouvons déduire la probabilité qu'une SBS LTE-U transmette ses paquets, étant donné la probabilité de collision p_L, comme suit :

$$\tau_L = q_0 = \frac{(1-p_L)^{H-2}(p_L)}{1+p_L-(1-p_L)^{H-1}} \qquad \text{(I.2)}$$

avec :

$$\mathrm{q}_h = q_0(1-p_L)^h, h \in [1,2,3,...H-2] \qquad \text{(I.3)}$$

D'un point de vue du système WiFi, le mécanisme LBT peut être modélisé en considérant la fonction DCF du WiFi. La DCF fonctionne de la manière suivante : si un canal est inactif pendant une période de temps égale à l'espace intertrame distribué (DIFS), la station WiFi accédera au canal pour envoyer les données. Si le canal est occupé, la station génère un entier aléatoire b appelé "backoff counter", tel que :

$$0 \leq b \leq W_0 \qquad \text{(I.4)}$$

W_0 est la fenêtre de conflit initiale. Le compteur Backoff est utilisé pour diminuer la probabilité de collision avec d'autres émetteurs potentiels du réseau LTE-U ou du réseau WiFi lui-même.

La procédure de décrémentation du compteur d'arrêt est détaillée ci-dessous :

- A chaque tranche de temps de durée γ, la station décrémente le compteur de backoff de 1, si le canal est toujours disponible pendant ce créneau.
- Si pendant ce créneau horaire le canal est occupé, le compteur de ralentissement sera gelé et ne reprendra sa décrémentation que si le canal est à nouveau libre pour un DIFS.
- Si le compteur de backoff b atteint 0, la station transmettra automatiquement ses paquets, avec un risque de collision néanmoins. Auquel cas, la fenêtre de contention W_0 doublera sa valeur et l'itération se répétera jusqu'à ce que la fenêtre de contention atteigne une valeur maximale après quoi une nouvelle valeur aléatoire de b sera générée.
- Si la station réussit à transmettre son paquet sans collision, la fenêtre de contention sera réinitialisée à sa valeur initiale W_0. La procédure DCF ci-dessus est modélisée par la chaîne de Markov comme le montre la figure I.5. Dans cette chaîne de Markov, chaque état de la station sera représenté par le couple *(m, b)* tel que m est le nombre restant de tentatives de retransmission par la station du paquet courant et b est le "compteur de backoff" pour ce paquet. p_w est la probabilité qu'un paquet de la station entre en collision.

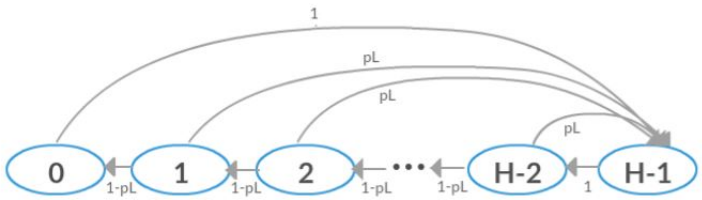

Figure I.5 – Le modèle de Markov pour la SBS LTE-U compatible à la LBT lors de la coexistence avec le réseau WiFi.

En considérant la même analyse que pour la LBT, nous pouvons déduire la probabilité qu'une station transmette dans cette configuration de réseau. En plus de [11], d'autres schémas MAC moins notoires ont été proposés pour la coexistence WiFi / LTE-U. Dans [12], un mécanisme de détection de porteuse et de transmission adaptative (CSAT) a été introduit pour programmer les transmissions LTE selon un cycle de service souhaité. Le CSAT permet au réseau LTE-U de partager la bande sans licence avec les réseaux WiFi via TDM. Malgré une certaine équité avec le réseau WiFi, le schéma CSAT néglige l'état du canal lorsqu'une transmission est programmée pour démarrer. De plus, il est considéré comme moins équitable que la LBT en ce qui concerne l' attribution des canaux car il ne respecte pas les mêmes règles techniques que le WiFi.

Dans [13], un schéma d'allocation de ressources a été proposé pour équilibrer le trafic sur des bandes sous licence et sans licence tandis que le débit du réseau WiFi est maintenu via un cadre d'optimisation basé sur l'utilité. Cependant, dans [13], un seul UE est considéré dans le réseau LTE-U tandis que l'allocation de ressources pour un scénario multi-UE nécessite des efforts considérables pour réaliser la coexistence harmonieuse entre tous les dispositifs. Par conséquent, pour tenir compte des exigences de tous les appareils des deux réseaux, de nouvelles techniques de partage du spectre doivent être introduites pour parvenir à une allocation efficace des ressources dans la LTE-U.

3.2 Approches basées sur la théorie des jeux

Lorsqu'elle exploite le spectre des 5 GHz, la LTE-U a tendance d'utiliser plusieurs "sous-bandes" accessibles sans coût dans le spectre disponible. Dans ce cas, la sélection de canal est l'un des principaux mécanismes essentiels à la coexistence entre la LTE et d'autres réseaux dans le spectre sans licence. La sélection de canal consiste à trouver un canal d'exploitation de 20 MHz. Pour parvenir à une allocation efficace des ressources dans le réseau LTE-U sur les bandes sans licence, le paradigme de la théorie des jeux a été récemment proposé comme une bonne alternative pour traiter un tel problème [14][16][17][18]. Rappelons que, le formalisme de la théorie des jeux [15][19][20] est l'étude de la prise de décision, qui implique de nombreux agents ou "joueurs", où chacun doit choisir une action qui aboutit soit à une "récompense", soit à une "sanction"[21][22]. Puisque le but évident du joueur dans les situations modélisées en théorie des jeux est de maximiser son gain[23][24], le joueur doit adopter une stratégie ou une politique[25][26][27] qui consiste en plusieurs actions qui seront déterminées en fonction de l'environnement extérieur et des situations des autres joueurs. Un algorithme basé sur la théorie des jeux est considéré comme optimal, si et seulement s'il converge vers ce qu'il est appelé "l'équilibre de Nash"[28][29]. Plusieurs travaux ont été proposés pour utiliser la théorie des jeux, afin d'obtenir une allocation de canal en LTE-U sur les bandes sans licence. La plupart de ces travaux s'appuient sur des solutions de jeu non-coopératives pour obtenir une allocation de spectre entre les systèmes LTE-U et WiFi [14]et [30]. Malgré l'interdépendance entre les deux systèmes de réseau, peu de travaux envisagent des solutions de jeu coopératif pour[31][32] obtenir une allocation de canal sur les bandes sans licence [33] [16].

L'un des premiers travaux qui a considéré le paradigme de la théorie des jeux pour résoudre le problème d'allocation de spectre LTE-U sur des bandes sans licence est décrit dans [14]. En particulier, ce dernier propose une approche entièrement distribuée où chaque petite cellule LTE (pico ou femto) sélectionne de manière autonome le canal pour configurer une porteuse

LTE-U. Le problème est modélisé en utilisant un jeu répété non-coopératif[14] et l'algorithme d'apprentissage ITEL-BA (*Iterative Trial and Error Learning-Best Action*) est utilisé pour conduire la convergence vers un équilibre de Nash. Par conséquent, les auteurs de [14] modélisent leur système LTE-U comme un ensemble S de petites cellules (SC) en utilisant la bande sans licence de 5 GHz comme liaison descendante supplémentaire. La bande totale sera organisée en K canaux de bande passante B. Soit $A = 1,..., K$ l'ensemble des canaux disponibles. Le problème de sélection de canal consiste en un processus de prise de décision, entrepris individuellement par chaque SC pour décider du canal d'exploitation où il installera une porteuse LTE-U. Le processus global peut être modélisé comme un jeu répété, où chaque SC est un joueur dans le jeu. Au début de chaque pas de temps, chaque joueur effectue une action qui consiste à sélectionner un canal pour configurer une porteuse LTE-U. L'action $a_i(t)$ désigne le canal sélectionné par SC i au pas de temps t . A la fin d'un pas de temps, chaque SC obtient une récompense $r_i(a_i(t))$ ou un gain à la suite des sélections effectuées par tous les SC.

Afin de sélectionner le canal, un algorithme appelé "ITEL-BA" est utilisé pour les joueurs. L'algorithme peut être résumé en trois étapes principales :

- Le joueur choisit une action selon la politique.
- Le joueur mesure le résultat ou la récompense de cette action, en tenant compte de l'environnement externe afin de vérifier si le joueur a bien joué son rôle.
- Amélioration du choix d'action pour le tour suivant.

Comme dans tout algorithme lié à la théorie des jeux, chaque joueur a une action de référence qui correspond à la récompense de référence. Ceci est utilisé pour être comparé à la dernière action jouée et à sa récompense pour évaluer si le résultat de l'action était un gain ou une perte. Le cadre proposé dans [14] a été évalué dans un scénario "indoor" dans différentes conditions concernant le nombre d'acteurs et la présence d'influences externes. Les résultats ont révélé la capacité du cadre proposé à converger vers l'équilibre de Nash.

Dans le même contexte, les auteurs de [34] ont modélisé le problème de partage des bandes sans licence entre opérateurs comme un jeu non-coopératif répétitif. Dans [35], un problème similaire est également formulé comme un jeu répété non-coopératif pour des fonctions d'utilité plus générales. Les auteurs de [30] ont formulé le problème d'allocation de spectre sans licence avec découplage de liaison montante-descendante comme un jeu non-coopératif dans lequel les UE sont les acteurs qui sélectionnent les canaux sans licence sur lesquels ils servent leurs utilisateurs. L'objectif des UE est d'optimiser le taux de somme de la liaison montante et de la liaison descendante tout en équilibrant les spectres sous licence et sans licence entre les

utilisateurs. Malgré leur intérêt, la plupart de ces travaux considèrent des modèles dans lesquels la dépendance entre les réseaux LTE et WiFi est ignorée.

En fait, en LTE-U, les interactions inter-réseaux peuvent avoir un impact significatif sur le résultat des modèles d'allocation de ressources. Ainsi, plutôt que de se concentrer sur la concurrence entre les deux technologies de réseau, la LTE-U et le WiFi peuvent fonctionner en mode coopératif pour atteindre leurs objectifs mutuels. Dans ce contexte, peu d'études ont abordé la coopération entre LTE-U et WiFi sur les bandes sans licence. Par exemple, [33] a proposé un cadre pour la coopération LTE avec le WiFi dans le spectre sans licence en concevant une enchère inversée pour que le fournisseur LTE obtienne exclusivement le canal des propriétaires de points d'accès WiFi en déchargeant leur trafic.
Comparé aux mécanismes de coexistence traditionnels tels que la LBT et CSAT, le schéma de coopération basé sur les enchères dans [33] peut potentiellement éviter les interférences entre les propriétaires de points d'accès LTE et WiFi. Dans le même contexte de coopération, un nouveau cadre multi-jeux a été proposé dans [16] comme une approche prometteuse pour modéliser les problèmes d'allocation de ressources en LTE-U. Dans un tel cadre, des jeux multiples coexistants et couplés peuvent être formulés pour capturer les caractéristiques spécifiques des équipements LTE-U et leur interdépendance avec le réseau WiFi existant.

4 Problématique et orientation

Nous avons d'abord présenté les concepts de la technologie LTE-U et comment elle a été conçue pour étendre la bande passante du système LTE sur le spectre sans licence. Ensuite, nous avons exposé les différents problèmes soulevés lorsque nous considérons l'exploitation du spectre sans licence par les appareils LTE-U, compte tenu de la présence du réseau WiFi déjà établi sur ces bandes. Différentes solutions ont été introduites pour résoudre ce problème. Certaines de ces solutions proposaient une allocation équitable des canaux entre LTE-U et WiFi. Dans ce contexte, la LBT est un schéma notoire qui permet une allocation proportionnelle des ressources radio entre la LTE-U et le WiFi. D'autres solutions, principalement basées sur le paradigme de la théorie des jeux compétitifs, ont envisagé le problème d'un point de vue différent, où les appareils LTE-U et WiFi doivent rivaliser pour accéder aux ressources disponibles. Dans ce contexte, la plupart des travaux modélisent le problème de la coexistence comme des jeux non-coopératifs.

Alors qu'en réalité, l'interdépendance entre les deux systèmes est insignifiante et leur coopération est obligatoire pour satisfaire leurs exigences respectives. Peu de travaux, basés sur la coopération entre LTE-U et WiFi, ont été proposés dans la littérature pour résoudre, de manière optimale, le problème d'attribution du spectre.

Le tableau 1.1 récapitule les problématiques liées aux travaux étudiés

Nom de l'approche	**Inconvénients**
Approches basées sur la LBT	La LBT est considérée comme une approche "basique" par de nombreux chercheurs en réseaux sans fil. Par conséquent des améliorations au niveau des réseaux afin de mitiger des éventuelles problèmes d'intérférences s'imposent.
On Modeling Channel Selection in LTE-U as a Repeated Game(L'ITEL-BA)	1-Il est coûteux en temps : il est basé sur plusieurs tests d'actions jusqu'à ce qu'il trouve celui qui correspond au meilleur résultat. 2-Son efficacité dépend du rapport entre le nombre de joueurs impliqués / tests utilisés dans la situation de coexistence. Plus le ratio est faible, moins il est probable qu'un joueur essaie toutes les options pour trouver le canal de transmission.
A Multi-Game Framework for Harmonized LTE-U and WiFi Coexistence over Unlicensed Bands	1-Cet article ne s'est pas concentré sur la disparité des protocoles d'accès utilisés. 2-La solution manque de l'exploitation au niveau des protocoles existants pour l'accès au spectre.
On the Implementation of Channel Selection for LTE in Unlicensed Bands using Q-learning and Game Theory algorithms	Le temps de convergence de ses outils algorithmiques est relativement long.

Tableau I.1 – Tableau comparatif des approches existantes

5 Conclusion

Ce chapitre a abordé le problème de la coexistence entre les technologies LTE-U et WiFi sur le spectre sans licence, généralement la bande 5 GHz. Par exemple, en raison de l'hétérogénéité des composants et des protocoles utilisés par les technologies LTE-U et WiFi, un ensemble de problèmes doit être résolu avant de rendre la cohabitation entre ces deux systèmes pos-

sible et efficace. Les solutions décrites dans ce chapitre n'ont néanmoins pas mis l'accent sur l'importance des réseaux WiFi, ainsi que celle de la satisfaction des contraintes QoS de leurs utilisateurs. En effet, les travaux mentionnés dans ce chapitre traitent les problèmes de coexistence, exclusivement de point de vue LTE-U.
Dans le chapitre qui suit, nous allons décrire une application de la CCG (Coalition Cooperative Game) pour la réalisation de la coexistence WiFi/LTE-U sur la bande 5 GHz. Nous y détaillerons le changement de point de vue de configuration des réseaux hétérogènes WiFi/LTE-U sur la bande sans licence.

CHAPITRE II

JEU DE COALITION CANONIQUE POUR LA COEXISTENCE WIFI ET LTE SUR LA BANDE 5 GHZ

Selon des études récentes de Cisco [36], le trafic mobile sans fil augmentera continuellement au cours de la prochaine décennie, les applications gourmandes en ressources telles que les applications vidéo représentant une grande partie des réseaux. Ce changement a rendu nécessaire l'élaboration d'une conception appropriée pour les réseaux hétérogènes sans fil. Etant donné l'augmentation exponentielle du nombre d'appareils, et donc de la quantité de données échangées, l'offre en bande passante pour la transmission de données avec une faible latence doit être incrémentée en conséquence.

Par suite, les SBS (Small Base Stations) LTE devraient augmenter leurs débits de liaison descendante vers leurs utilisateurs, en appliquant une régulation d'agrégation de canaux (CA) à la fois de la bande sous licence précédemment utilisée, et de la bande sans licence. Dans notre contexte, la bande sans licence sucite l'intérêt en ce qui concerne la capacité et la faible latence. C'est pour cela que notre solution sera conçue dans le spectre de fréquences sans licence de 5 GHz.

Compte tenu de toutes ces motivations, en plus du potentiel de la LTE concernant le service des utilisateurs, il a été jugé raisonnable d'exploiter la technologie LTE dans les bandes radio disponibles sans licence dans le spectre des 5 GHz [36]. Nous proposons un mécanisme de coexistence qui réduit le risque que la transmission des données des points d'accès WiFi ne soit interrompue par les SBS LTE-U, permettant ainsi aux utilisateurs WiFi de transmettre/recevoir

leurs données. Ce mécanisme de coexistence LTE-U/WiFi est divisé en plusieurs étapes.

Nous formulerons une solution basée sur le jeu coopératif de coalition. Ce jeu est tel que les points d'accès WiFi et les points d'accès LTE-U sont des acteurs censés ”coopérer” afin de parvenir à un terrain d'entente qui profite également aux réseaux LTE-U et aux points d'accès WiFi.

La solution CCG (Coalition Cooperative Game) donnera l'imputation du débit atteint de tous les joueurs, qui est défini par la somme du débit réalisé pour tous les utilisateurs servis par le joueur. Cette imputation représentera le vecteur ”récompense” après la coopération des joueurs. Deuxièmement, nous résolvons le problème d'allocation des canaux, qui sera résolu à l'aide d'un algorithme heuristique.

Les étapes du mécanisme de coexistence décrites ci-dessus seront réalisées à plusieurs reprises à chaque fois qu'un changement du nombre de joueurs ou des exigences minimales de QoS aura lieu.

1 Contributions des différentes théories de jeux pour la coexistence WiFi/LTE-U

Dans les travaux précédents, la coexistence entre WiFi et LTE dans la bande 5 GHz était visée par plusieurs approches, beaucoup d'entre elles utilisaient la théorie des jeux [19], qui est l'étude de la prise de décision, impliquant de nombreux agents ou ”joueurs”, chacun doit choisir une action qui aboutit soit à une ”récompense”, soit à une ”sanction”. Certains ont appliqué les jeux compétitifs. Par exemple [5] et [33] ont utilisé respectivement le ”jeu répété” et le multi-jeu, afin de modéliser les SBS LTE. Alors que les œuvres de [16], utilisaient une combinaison des deux types de jeux. D'autres, en revanche, ont utilisé des jeux coopératifs comme [37] et [35]. Ces derniers travaux visaient essentiellement à protéger les utilisateurs du WiFi contre les interférences des SBS LTE. Dans [37], les résultats de la simulation montrent que l'utilisation opportuniste du spectre sans licence dans leur méthode proposée peut fournir un débit moyen par utilisateur et une satisfaction de l'utilisateur meilleurs que la LTE-A, LTE-U (NC), LTE-U (Rand) et la LTE-U (BG). Ils prouvent également que leur solution surpasse la technique LBT [11].

1.1 Jeux compétitifs

Dans un jeu compétitif (non-coopératif), le gain d'un joueur doit se faire aux dépens de l'autre joueur[38][39] [40]. Les travaux [5], [34] et [35]ont inclu ce principe dans leurs travaux dans le but de tenter de résoudre les problèmes de coexistence sans fil. Dans [5], le problème est modélisé à l'aide d'un jeu répété non-coopératif, et l'algorithme d'apprentissage ITEL-BA (Iterative Trial and Error Learning -Best Action) est utilisé pour conduire la convergence vers un équilibre de Nash. Le concept est la sélection d'une nouvelle action selon une certaine stratégie, et l'observation de l'environnement en mesurant la récompense obtenue résultant de l'action sélectionnée, ce qui donne aux joueurs une idée de la façon dont ils ont joué. Puis l'amélioration de la stratégie de sélection des actions en fonction de l'observation actuelle. Cependant, cette solution présente certaines limites, telles que l'inutilité d'impliquer tous les acteurs, même ceux qui sont à l'état "satisfait". Une autre limitation dans le cas du comportement d'ITEL-BA avec une influence externe fixe et en se basant sur les résultats de leurs simulations est que l'atteinte de l'équilibre de Nash est relativement coûteuse en temps.

1.2 Jeux coopératifs

Un jeu coopératif est un jeu où les joueurs ont la possibilité de se concerter et de s'engager à coopérer avant de définir la stratégie à adopter. Par exemple, un jeu coopératif à deux joueurs et deux stratégies est défini par une matrice des gains de la forme :

	Joueur 1, stratégie 1	**Joueur 1, stratégie 2**
Joueur 2, strategie 1	A_1, A_2	B_1, B_2
Joueur 2, strategie 2	C_1, C_2	D_1, D_2

Avec $A_1 > C_1$, $D_1 > B_1$, $A_2 > B_2$ et $D_2 > C_2$, les gains respectifs de chaque joueur dans chaque stratégie. Des joueurs rationnels vont coopérer sur l'une des stratégies et recevoir les gains élevés. Pour ce faire, ils doivent pouvoir se coordonner sur l'une des stratégies disponibles dans le jeu, sous peine de se retrouver dans une situation défavorable (pas de gains).

Contrairement aux jeux compétitifs, dans la théorie des jeux coopératifs, nous modélisons toujours la préférence individuelle des agents, mais nous avons de surcroit un modèle panoramique des capacités des différents groupes que de leurs actions possibles. Nous nous sommes concentrés spécifiquement sur le travail de[37] qui utilise la négociation coopérative de Nash,

afin d'empêcher les SBS LTE d'interférer avec les points d'accès WiFi. La solution propose deux sous-solutions qui sont l'allocation des ressources au niveau macro (entre les SBS), et l'allocation au niveau micro (entre les utilisateurs de la même SBS). La première partie de la solution repose sur l'approche heuristique qui applique le jeu de négociation Nash. Les deux sous-solutions fonctionnent simultanément jusqu'à ce que la convergence (équilibre de Nash) soit atteinte. Néanmoins, la solution proposée ci-dessus présente plusieurs défauts concernant les performances de coexistence entre différentes technologies de réseau sans fil. En effet, ce document mentionne que leur solution ne répond qu'aux exigences de QoS de certains utilisateurs LTE. Ce qui n'améliore pas la situation de coexistence puisque l'objectif est de garantir une QoS minimale pour chaque utilisateur du réseau.

2 Modèle du Système

Actuellement, les petits réseaux cellulaires sont la solution utilisée pour répondre à la demande de données des utilisateurs, les CNO (Cluster Network Operators) déploient de plus en plus de stations de base pour faciliter la croissance des services. Cette nature ultra dense des stations de base provenant d'opérateurs différents sont vouées à entrer en conflit les unes avec les autres, ainsi qu'avec les WAP (WiFi Access Point) locaux s'ils veulent fonctionner sur la même bande sans licence. Comme chaque opérateur peut contrôler l'interférence entre la station de base macro (MBS) et ses stations de base associées, nous envisageons un scénario avec des stations de base et des WAP comme illustré à la figure II.1. Dans ce scénario, les stations de base du réseau LTE-U fonctionnent en mode double (qui peut agir à la fois dans le spectre sous licence et sans licence). Nous définissons ces SBS LTE-U comme un ensemble S de joueurs n_S dans un jeu coopératif qui modélisera notre problème actuel de coexistence. Le scénario de déploiement se compose de n_L stations de base LTE bimode, n_W points d'accès WiFi sans chevauchement. Entouré d'utilisateurs U_l LTE et d'utilisateurs WiFi U_w pour chaque point d'accès WiFi et SBS respectivement. Chaque SBS i possède un sous-canal sous licence orthogonal K_i^l de largeur de bande uniforme B_l. Les SBS et les WAP fonctionnent sur la même bande sans licence. Le canal sans licence est beaucoup plus large qu'un sous-canal sous licence, et le système LTE fonctionne de manière centralisée, de sorte que chaque station de base divise ce canal sans licence en sous-canaux K_u avec une bande passante B_u chacun. Pour une transmission fiable des signaux de commande de la SBS à l'utilisateur, chaque SBS attribue au moins un sous-canal sous licence à son utilisateur LTE-U actif. Nous supposons qu'un sous-canal peut être alloué à un maximum d'un utilisateur LTE-U. Les SBS fonctionnent en mode de liaison descendante supplémentaire

(SDL) avec la technologie CA [37]. La LTE utilise un accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence (OFDMA) dans la couche physique. Cependant une fois sur la même bande avec le WiFi, la dégradation des performances du WiFi est s'élève par rapport à la LTE-U[41][42][43]. Parce que la technologie LTE est très gourmande en matière de consommation de ressources, elle dominera le WiFi en termes d'accès aux canaux.

Figure II.1 – Illustration du Système

2.1 Débit de données de l'utilisateur LTE-U

Afin d'allouer des ressources entre ses utilisateurs, toutes les stations de base LTE-U utilisent la technique OFDMA. Il n'y a donc pas d'interférence intra-opérateur dans le spectre sous licence [37]. Le problème à résoudre sera mathématiquement modélisé par des symboles définis dans le tableau II.1. Lorsque $SBS_i \in$ S attribue le sous-canal sous licence $k \in C_i^l$ à l'utilisateur $j \in U_i$, le débit obtenu de cet utilisateur est modélisé par :

$$\mathrm{R}_{i,j}^{l,k} = B_l log_2(1 + \frac{x_{i,j}^k P_i^l |h_{i,j}|^2}{\sigma^2}) \qquad \text{(II.1)}$$

Où $x_{i,j}^k$ indique l'allocation du sous-canal sous licence $k \in SCh_i^l$ par la station de base $i \in$ S à l'utilisateur $j \in U_i$, et $x_{i,j}^k = 1$ lorsque la station de base

$i \in S$ attribue le sous-canal à l'utilisateur, et $x_{i,j}^k = 0$, sinon. P_i^l est la puissance de transmission de la station de base i à son utilisateur j, et elle est fixe pour tous ses utilisateurs. On a $|h_{i,j}|^2$ qui est le gain de canal de la station de base i à l'utilisateur j en considérant un "modèle de perte de chemin de propagation d'espace" libre avec "évanouissement de Rayleigh", et

$$— \, \mathrm{h}_{i,j}|^2 = G_d - \alpha_{i,j}|h_0|^2 \qquad \text{(II.2)}$$

Où G indique le facteur de gain de puissance constant introduit par l'amplificateur et l'antenne, $d_{i,j}$ est la distance entre la station de base i et l'utilisateur j en km, α est "l'exposant de perte de chemin" et $h_0 \sim CN(0,1)$ est une variable gaussienne complexe qui exprime "l'évanouissement de Rayleigh". Le bruit thermique a une distribution gaussienne indépendante avec une moyenne nulle et une variance σ^2.

Le système LTE-A peut utiliser la technologie CA pour offrir à ses utilisateurs un meilleur débit de maintien de la qualité de service si les stations de base ont suffisamment de sous-canaux sous licence inutilisés. Lorsque la station de base $i \in S$ alloue plus d'un sous-canal à l'utilisateur $j \in U_i$, alors le débit atteint de cet utilisateur dans le sous-canal sous licence est décrit par l'équation II.3 [37] :

$$\mathrm{R}_{i,j}^l(x_i) = \sum_{k \in S_i^l} x_{i,j}^k R_{i,j}^{l,k} \qquad \text{(II.3)}$$

Les stations de base LTE attribueront un sous-canal sans licence à l'utilisateur j si le débit atteint n'est pas suffisant pour fournir la qualité de service garantie. Dans le cas du sous-canal sans licence, l'utilisateur LTE-U perçoit des interférences provenant d'autres stations de base et points d'accès WiFi travaillant dans la même zone en conflit sur la même bande sans licence. Le débit obtenu par l'utilisateur LTE-U $j \in U_i$ sur le sous-canal sans licence $k \in Su$ est présenté dans l'équation II.4 :

$$R_{i,j}^{u,k'} = B_u log_2(1 + \frac{y_{i,j}^{k'} P_i^u |h_{i,j}|^2}{\sigma^2}) \qquad \text{(II.4)}$$

Le même principe sera appliqué au spectre sous licence. Si la station de base $i \in S$ doit allouer plusieurs sous-canaux sans licence à l'utilisateur $j \in U_i$, alors le débit atteint de cet utilisateur est formulé par l'équation II.5 :

$$R_{i,j}^{u}(y_i) = \sum_{k' \in S_i^u} y_{i,j}^{k'} R_{i,j}^{u,k'} \qquad \text{(II.5)}$$

Le débit total atteint d'utilisateur $j \in U_i$ dans le spectre sous licence et sans licence est formulé par l'équation II.6 :

$$\mathrm{R}_{i,j}(x_i, y_i) = R_{i,j}^{l}(x_i) + R_{i,j}^{u}(y_i) \qquad \text{(II.6)}$$

Ainsi, la somme des débits de la station de base $i \in S$ est le débit total atteint sur tous les utilisateurs U_i est modélisé par :

$$R_i(x_i, y_i) = \sum_{j \in U_i} R_{i,j}(x_i, y_i) \qquad \text{(II.7)}$$

2.2 Debit des utilisateurs WiFi

Pour un débit global de "liaison descendante" R_w du WAP $w \in W$, le débit moyen de chaque utilisateur $v \in V_w$ associé à ce WAP w peut être représenté par :

$$R_{w,v}^{max} = \frac{R_w}{V_w} \qquad \text{(II.8)}$$

Dans un scénario idéal, lorsque seul le WAP accède à la bande sans licence, ce débit atteindra son maximum. Cependant, dans le cas réel, les WAP devront coexister avec les stations de base LTE-U, ce qui signifie que le débit diminuera considérablement. Par souci de simplicité, nous

supposerons que les stations de base se comporteront comme les WAP WiFi. Par conséquent, le débit normalisé pour chaque WAP $w \in W$ selon l'étude [44] est modélisé par :

$$R_w^{min} = \frac{P_{tr} P_s E[P](S+1)^{-1}}{(1-P_{tr})T_\sigma + P_{tr} P_s T_s + P_{tr}(1-P_s)T_c} \qquad \text{(II.9)}$$

Une valeur minimale de débit est requise pour que les WAP servent efficacement leurs utilisateurs. Selon Bianchi, le débit de liaison descendante moyen atteint par chaque utilisateur $v \in V_w$ du WAP $w \in W$ est modélisé par :

$$R_{w,v}^{min} = \frac{R_w^{min}}{V_w} \qquad \text{(II.10)}$$

Démonstration :
Soit S le débit du système normalisé, défini comme la fraction de temps pendant laquelle le canal est utilisé pour transmettre avec succès les bits de charge utile. Pour calculer S, analysons ce qui peut arriver dans une tranche de temps choisie au hasard. Soit P_{tr} la probabilité qu'il y ait au moins une transmission dans la tranche de temps considérée. Etant donné que n stations se disputent sur le canal et que chacune transmet avec une probabilité τ

$$P_{tr} = 1 - (1-\tau)^n$$

La probabilité P_s qu'une transmission se produisant sur le canal soit réussie est donnée par la probabilité qu'exactement une station émette sur le canal, conditionnée au fait qu'au moins une station puissent émettre, c'est-à-dire :

$$P_s = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{P_{tr}} = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{1-(1-\tau)^n}$$

Nous pouvons maintenant exprimer S comme le rapport :

$$S = \frac{E[I]}{E[D]}$$

Avec I les informations de charge utile transmises dans une intervalle de temps. Et D correspond à la durée de l'intervalle.

Etant *E[P]* la taille moyenne de charge utile de paquet, la quantité moyenne d'informations de charge utile transmises avec succès dans une intervalle de temps P_{tr} P_s *E[P]* est, puisqu'une transmission réussie se produit dans une intervalle de temps avec une probabilité P_{tr} P_s. La longueur moyenne d'une tranche de temps est facilement obtenue en

considérant que, avec une probabilité *1-P_{tr}*, la tranche de temps est vide : avec probabilité P_{tr} P_s il contient une transmission réussie, et avec probabilité P_{tr} *(1-P_s)* il contient une collision. Par conséquent, l'équation ci-dessus devient :

$$R_w^{min} = \frac{P_{tr}P_sE[P]}{(1-P_{tr})\sigma+P_{tr}P_sT_s+P_{tr}(1-P_s)T_c}$$

Tableau II.1 – Notations

Symboles	Significations
S	Ensemble de SBS avec S éléments
W	Ensemble de WAP sans chevauchement avec W éléments
U_i	Ensemble d'utilisateurs associés à SBS_i
V_w	Ensemble d'utilisateurs actifs V_w associés au WAP w
SCh_i^l	Ensemble de sous-canaux sous licence de SBS_i
SCh_i^u	Ensemble de sous-canaux sans licence de SBS_i
B_l	Bande passante de chaque sous-canal sous licence
B_u	Bande passante de chaque sous-canal sans licence
Pl_i	Puissance d'émission de SBS_i pour chaque utilisateur dans le spectre sous licence
Pu_i	Puissance d'émission de SBS_i pour chaque utilisateur dans le spectre sans licence
x_i	Vecteur d'allocation des ressources pour SBS_i dans le spectre sous licence
y_i	Vecteur d'allocation des ressources pour SBS_i dans le spectre sans licence
$\|h_{i,j}\|^2$	Gain de canal entre le WAP i et le récepteur j
$d_{i,j}$	Distance entre le WAP i et le récepteur j
G	Facteur de gain de puissance constant
α	Exposant de "perte de chemin"
h_0	Rayleigh fading
$R_{i,j}^{lk}$	Débit atteint d'utilisateur j associé au SBS_i dans le sous-canal sous licence k
$R_{i,j}^{uk}$	Débit atteint d'utilisateur j associé au SBS_i dans le sous-canal k sans licence
$R_{i,j}$	Débit atteint d'utilisateur j associé à SBS_i
$R_{w,v}^{max}$	Débit moyen d'utilisateur v associé au WAP w celui-ci accède au canal
$R_{w,v}^{min}$	Débit moyen d'utilisateurs v associés au WAP w lorsque les SBS agissent comme des WAP
$QoS_{i,j}$	Exigence de QoS de l'utilisateur j associé au SBS_i
τ	Fraction de temps que les SBS partagent avec les WAP

2.3 Formulation du problème

Les ressources cibles qui sont des objets d'allocation entre les WAP et les SBS seront présentées dans un domaine temps-fréquence. Dans la bande sans licence, chaque canal a une bande passante de 20 MHz, et chaque appareil utilise une application avec une attente de QoS spécifique en termes de débit et de latence de transmission requis. Le débit attendu de chaque nœud

(WAP / SBS) sera exprimé par la somme du débit minimal attendu de tous les utilisateurs desservis par ledit nœud.

3 Description de la Solution

Notre solution au problème de la coexistence LTE et WiFi, montrée dans l'algorithme II.1, sera divisée en deux parties : la première consistera à résoudre le problème de satisfaction du débit entre les SBS, en utilisant le problème du jeu de coalition, où les SBS seront les "joueurs", à l'aide de l'algorithme II.2. La deuxième partie portera sur le problème de la répartition des récompenses entre les utilisateurs de chacun des SBS,à l'aide de l'algorithme II.3 en utilisant le jeu de la faillite (Bankruptcy).

Algorithme II.1 Algorithme principal d'allocation

Initialization
    Allow WiFi APs to Access the unlicenced bands first
    Apply Bankruptcy solution on the Macro level
    Apply Bankruptcy on the Micro level
    Result: Fair Spectral Allocation between the SBS and the WAP

Algorithme II.2 Allocation au niveau macro

Initialization
K_u is the number of the available unlicensed subchannels
Define Each SBS QoS requirements as the sum of its users QoS requirements

Convert the sum into the number of required unlicensed sub-channels
    R_{SBS} the array of SBS total requirements
    We generate the characteristic function, which will depend on K_u and R_{SBS}
    Nucleolus calculation between SBS
    Result: Each SBS will recieve its nucleolus reward

Algorithme II.3 Allocation au niveau micro

Result: function v=bankruptcy-game(E,d_{vec})
Initialization
Possible coalitions are formed, empty coalition is omitted
Using the characteristic functions, prorata imputations are calculated.
In this step, the common value of each coalition is assigned to the coalition.
Calculate the excess *e(x,S)*.
REPEAT
Find next vector $x = (x_1, ..., x_n)$ that minimizes the maximum of the excesses *e(x, S)* over all coalitions S subject to *v(N)*.
UNTIL all imputations are processed ; and the excess of estate are minimized.

Cette solution est illustrée à la figure II.2. Etant donné que la technologie LTE fonctionne en mode double : les stations de base LTE peuvent utiliser simultanément la bande sous licence et sans licence. Dans ce contexte, la bande sans licence n'est utilisée par ces stations de base que si la bande sous licence ne peut pas satisfaire les applications des dispositifs associés de la station de base. Tout d'abord, nous devons nous assurer que les points d'accès WiFi disposeront de suffisamment de ressources pour servir leurs utilisateurs. Pour ce faire, nous devons discriminer positivement en faveur des points d'accès WiFi, en forçant les stations de base LTE à coopérer avec les points d'accès pendant la coexistence sur la bande 5 GHz.

3.1 Jeu coopératif de la coalition

Essentiellement, les jeux de coalition impliquent un ensemble de joueurs, qui cherchent à former des groupes coopératifs, c'est-à-dire des coalitions, pour renforcer leurs positions dans le jeu. Toute coalition représente un accord entre les acteurs de S pour agir comme une seule entité.

La formation de coalitions ou d'alliances est omniprésente dans de nombreuses applications. Par exemple, dans les jeux politiques, les partis ou les individus peuvent former des coalitions pour améliorer leur ”pouvoir électoral”.

En plus de l'ensemble de joueurs N, le deuxième concept fondamental d'un jeu de coalition est la valeur de coalition. Principalement, la valeur de la coalition, notée v, quantifie la valeur d'une coalition dans un jeu. La définition de la valeur de coalition détermine la forme et le type du jeu. Néanmoins, indépendamment de la définition de la valeur, un jeu de coalition est uniquement défini par le couple (N, v). Il faut noter que la valeur v est, dans de nombreux cas, appelée ”jeu”, car pour chaque v, un jeu différent peut être défini.

Le jeu coopératif s'est avéré utile pour résoudre le problème d'interférence WiFi / LTE-U. Et plus précisément, le jeu coopératif de la coalition sera utilisé dans ce chapitre. Ce jeu encourage les joueurs interférents (ici les WAP et les SBS) à coopérer de manière à ce que le gain de l'un ne soit pas au détriment des autres. Cela peut être fait en générant toutes les coalitions possibles entre ces acteurs. Chaque coalition est associée à une valeur de récompense qui représentera le débit total pour une coalition entière. Ces valeurs de récompense sont obtenues via une fonction caractéristique f. La fonction décrit la récompense collective qu'un ensemble de joueurs peut gagner en formant cette coalition.

3.2 Fonction caractéristique du jeu

Cette fonction caractéristique associe à chaque coalition $S \in N$ un nombre réel quantifiant les gains de S.

La propriété TU (transferable utility) implique que l'utilité totale représentée par ce nombre réel peut être divisée de n'importe quelle manière entre les membres de la coalition. Les valeurs dans les jeux TU sont considérées comme des valeurs monétaires que les membres d'une coalition peuvent se répartir entre eux en utilisant une règle d'équité appropriée (l'une de ces règles étant une répartition égale de l'utilité).

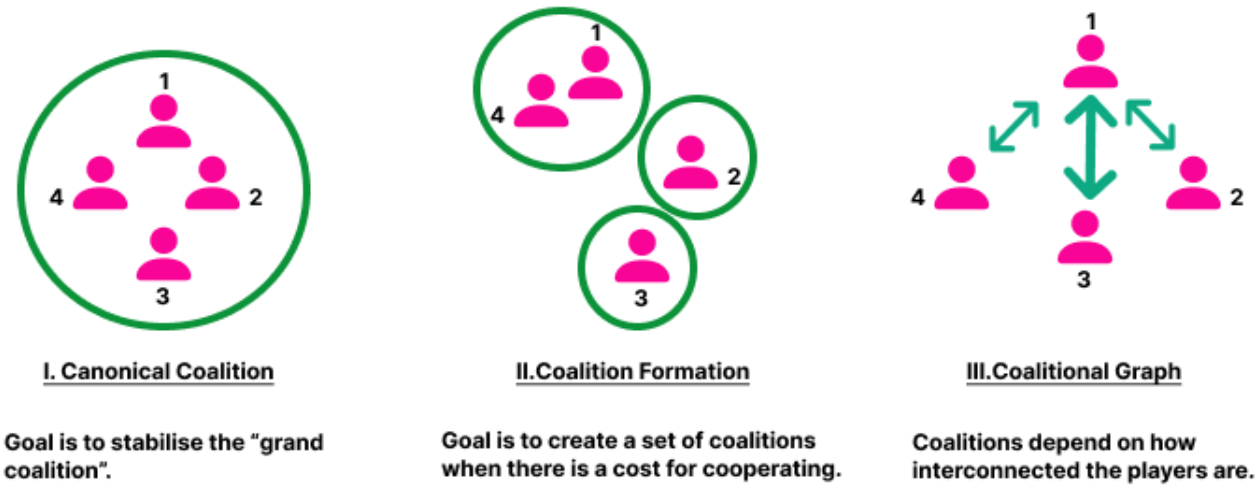

Figure II.2 – Classification des jeux coopératifs

Bien que la fonction caractéristique TU puisse modéliser une large gamme de jeux, de nombreux scénarios existent dans lesquels la valeur de coalition ne peut pas se voir attribuer un seul nombre réel ou des restrictions rigides existent sur la distribution de l'utilité. Ces jeux sont connus sous le nom de "jeux de coalition à utilité non-transférable (NTU)"[15].

Dans un jeu NTU, le gain que chaque joueur d'une coalition S reçoit dépend des actions conjointes que les joueurs de la coalition S choisissent. Soit *(N, v)* un jeu TU, et soit $C \in N$ une coalition et x une distribution de gain sur *N*. L'excès *e(C, x)* de la coalition C en x est la quantité *e(C, x) = v(C) - x(C)*. Une valeur négative d'excès est interprétée comme le degré de satisfaction des membres de la coalition C à l'égard de l'allocation.

En conséquence, nous visons à minimiser la valeur excédentaire parmi les coalitions générées et donc à nous assurer qu'aucune coalition n'a de plainte.
Définition : Soit $<_{lex}$ l'ordre lexicographique de R^m, *i. e.* , $\forall (x, y) \in R^m$, $x \geq_{lex} y$ ssi :

$$\begin{gathered} \text{x} = \text{y} \\ \text{où} \\ \exists t \text{ t.q } 1 \leq t \leq m \text{ t.q. } \forall i \ 1 \leq i \leq t \ x_i = y_i \text{ et } x_t > y_t \end{gathered} \tag{II.11}$$

3.3 Le Nucleolus comme concept de solution

Le concept de solution le plus renommé pour les jeux de coalition, et pour les jeux classés comme canoniques en particulier, est le noyau.

Le noyau d'un jeu canonique est directement lié à la stabilité de la grande coalition. Dans un jeu de coalition canonique *(N, v)*, en raison de la superadditvitè, les joueurs sont incités à former la grande coalition *N*.

Ainsi, le noyau d'un jeu canonique est l'ensemble des allocations de gains qui garantit qu'aucun groupe de joueurs n'est incité à quitter N pour former une autre coalition $S \in N$.

Pour un jeu TU, étant donné la grande coalition N, un vecteur de gain
$x \in IR^N(N_c =\mid N \mid)$

v(N) est un "group rational" si

$$\sum_{i \in N} x_i = v(N) \qquad \text{(II.12)}$$

Un vecteur de gain x est individuellement rationnel si chaque joueur peut obtenir un avantage non moins qu'agissant seul, c'est-à-dire :

$$x_i \geq v(\{i\}), \forall i \in N \qquad \text{(II.13)}$$

L'imputation est un vecteur de gain satisfaisant les deux conditions ci-dessus. Après avoir défini une imputation, le noyau est défini par :

$$\mathrm{C}_{TU} = \{x : \sum_{i \in N} x_i = v(N) et \sum_{i \in S} x_i \geq v(S) \forall S \subseteq N\} \qquad \text{(II.14)}$$

En d'autres termes, le noyau est l'ensemble des imputations où aucune coalition $S \in N$ ne soit incitée à :
-Rejeter l'allocation de gain proposée.
-S'écarter de la grande coalition.
-Former la coalition S à la place.
Le noyau garantit que ces écarts ne se produisent pas le fait que toute allocation de gain x qui se trouve dans le noyau garantit au moins une quantité d'utilité égale à *v(S)* pour chaque $S \in N$.

De toute évidence, chaque fois qu'il est possible de trouver une allocation de gain qui se trouve dans le noyau, alors la grande coalition est une solution stable et optimale pour le jeu de la coalition.

L'un des concepts de solution est le Nucleolus, qui a été introduit principalement pour les jeux TU. Les extensions du Nucleolus pour les jeux NTU ne sont pas encore formalisées dans la théorie des jeux.

La motivation de base derrière le Nucleolus est qu'au lieu d'appliquer une axiomatisation générale de l'équité pour trouver une allocation de gain unique, c'est-à-dire une valeur pour le jeu, on peut fournir une allocation qui minimise le mécontentement des joueurs de l'allocation

qu'ils peuvent recevoir dans un jeu *(N, v)* donné.

Le Nucleolus maximise de manière récursive le «bien-être» des coalitions les moins traitées. On peut le comprendre comme une application de la fonction de protection sociale rawlsienne à une société où le bien-être de chaque coalition est évalué indépendamment [45].

En fait, il peut être prouvé que y est le Nucleolus de ce jeu. Notre fonction caractéristique est définie comme :

$$\mathrm{R(j)}=\sum_{i\in j}(T_i, \chi_i, \alpha_{i,j}) \qquad \text{(II.15)}$$

Où T_i est le débit attendu à allouer au joueur *i*. Et puisqu'il s'agit d'un jeu TU, T_i sera la somme de tout le débit attendu des utilisateurs servis par le joueur *I*. $\chi_{i,j}$ est le coefficient d'appartenance. Il est égal à 1 si le joueur i appartient à la coalition j, et à 0 dans le cas contraire.

$\alpha_{i,j}$ est le coefficient de priorité. Il est proportionnel au degré d '« importance »du joueur. Plus les utilisateurs du réseau ont une qualité de service élevée, plus le degré d'importance est élevé, et vice-versa. Le choix du coefficient de priorité $\alpha_{i,j}$ vise à contraindre le réseau des utilisateurs à faible QoS à coopérer avec ceux à haute QoS, afin de garantir un débit décent pour les applications de l'utilisateur.

4 Le jeu de la "Bankruptcy"

Supposons qu'un certain nombre d'individus présentent des réclamations sur une certaine ressource dont la valeur totale est insuffisante pour répondre à toutes les réclamations. On peut penser à un homme mourant et laissant derrière lui un patrimoine qui vaut moins que la somme de ses dettes. La question est de savoir comment la succession doit être répartie entre les créanciers.

Plusieurs méthodes sont étudiées et utilisées pour résoudre le problème, telles que la méthode de complétion récursive qui est en fait la valeur de Shapley du jeu coopératif correspondant au problème de la faillite. Dans [46], trois exemples de faillite du Talmud babylonien ont été étudiés et étendent la solution qui est donnée à tous les problèmes de faillite. Ils prouvent que cette extension est le Nucleolus des jeux de faillite correspondants.

Une autre façon de diviser la succession est la méthode proportionnelle qui divise la succession proportionnellement aux créances. Cette méthode est largement utilisée. Cependant, ce n'est pas une méthode de la théorie des jeux. Surtout, il n'est pas invariant en équivalence stratégique.

Prenons par exemple les deux problèmes de faillite suivants. Dans le premier problème, la succession est égale à 60 et le demandeur # 1 revendique 60, le demandeur #2 revendique 40. Dans le second problème, la succession est égale à 80, et le demandeur #1 revendique 80, le demandeur #2 revendique 40. La méthode proportionnelle divise les successions en portions 36, 24 dans le premier problème et 53 * (1/3), 26 * (2/3) dans le deuxième problème, tandis que les deux autres méthodes mentionnées donnent toutes deux des divisions de {40, 20} et {60, 20} respectivement. Cependant, nous avons besoin d'une méthode qui découle de la méthode proportionnelle en apportant quelques modifications afin d'atteindre l'équivalence stratégique en respectant les paradigmes principaux de la théorie des jeux.

Nous présentons un problème nommé "problème de faillite". Il est représenté par une paire ordonnée $(E; d) \in IR \times IR^n$,
où $0 \leq d_l$ ¡, $d_2 \leq ... \leq d_n$
et $0 \leq E \leq d_1 + .. . + d_n = D$. E est la succession qui doit être répartie entre n demandeurs.

Tableau II.2 – Exigences QoS des applications multimedia

Applications	**Exigences Minimales (Kbps)**
HD video streaming	800
Video conferencing	700
VoIP	512
Audio streaming	320

Tableau II.3 – Valeurs des paramètres de la simulation

Symboles	Valeur	Symboles	Valeur
S	5	$\|U_i\|$, ∀i	50
B_l	180 kHz	$\|SCh_i^l\|$, ∀i	50
B_u	180 kHz	$\|SCh^u\|$	100
P_i^l , ∀i	21 dBm	P_i^u , ∀i	17dBm
σ^2	-114 dBm	G	-33.5dBV
W_w, ∀w	5	W	5
α	3		

Nous désignons l'ensemble des demandeurs par $N = \{1,2, ..., n\}$. Le demandeur i présente une réclamation de d_i sur E. Le problème est maintenant de savoir comment répartir E entre les demandeurs. Une règle de division est une fonction f qui assigne à chaque problème de faillite $(E ; d)$ pour chaque nombre positif de réclamants une solution $f(E ;d)=(f_1(E ;d)....,f_n(E ;d))$ de sorte que

$$\begin{aligned} \mathrm{f}_i(E;d) \geq 0 \text{ pour tout } i \in N \text{ (rationalité individuelle)(i)} \\ \textstyle\sum_{i=1}^{n} f_i(E;d) = E \text{ (efficacité)(ii)} \end{aligned} \qquad \text{(II.16)}$$

Si $E = 0$, il est évident que par (i) et (ii) aucun demandeur ne reçoit quoi que ce soit, donc dans ce qui suit nous supposerons que $E > 0$.

Le modèle de "bankruptcy"[47] est adapté à notre problème car l'application de chaque utilisateur servie par chaque joueur s'attend à un nombre de sous-canaux minimal, en dessous duquel les utilisateurs n'obtiendront pas le service approprié.

4.1 Allocation des ressources pour le WiFi et la LTE-U

Cependant, afin de favoriser les réseaux WiFi, les points d'accès accéderont à la bande sans licence avant les stations de base LTE. Tout d'abord, nous calculerons le nombre de canaux nécessaires à chaque point d'accès afin de fournir le débit de liaison descendante approprié à leurs utilisateurs. Une fois les points d'accès servis, les SBS LTE seront autorisées à accéder à la bande sans licence.

5 Résultats de la simulation

Dans cette section, nous évaluons les performances de notre solution proposée en ce qui concerne le débit de la liaison descendante. Les principaux paramètres utilisés dans cette simulation sont indiqués dans le tableau II.3. Toutes les SBS, les WAP et les utilisateurs sont répartis uniformément dans la zone conflictuelle d'un rayon de 150 m. Nous supposons que les SBS LTE utilisent une liaison descendante supplémentaire à l'aide de l'agrégation de porteuses lorsque la qualité de service des applications n'est pas satisfaite avec le spectre sous licence. Pour notre simulation, nous utilisons les exigences de qualité de service typiques des applications multimédias de [48] comme indiqué dans le tableau II.2.

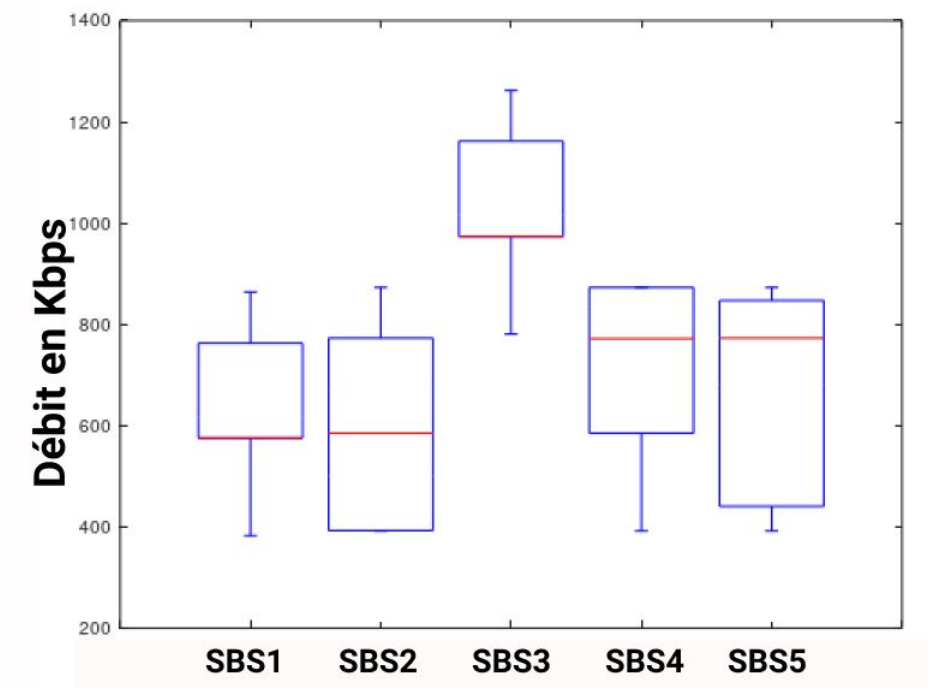

Figure II.3 – Comparaison des débits moyens des SBS dans la méthode proposée

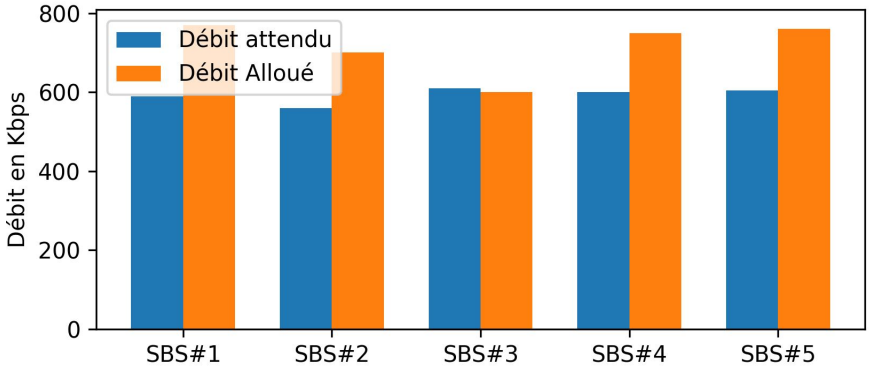

Figure II.4 – Comparaison des débits moyens entre les SBS LTE dans un rayon de 50m

La figure II.3 illustre les débits alloués moyens entre les SBS grâce à l'approche décrite dans ce chapitre. La figure présente les résultats en forme de graphique en chandeliers, qui révèlent que la plupart de ces scores se situent entre 400 Kbps et 1200 Kbps, et la médiane de ces SBS varient entre 600 Kbps et 1 Mbps. Ces valeurs sont satisfaisantes en termes de QoS. La raison des différences en valeurs des débits alloués entre les SBS vient du fait que les utilisateurs de chaque SBS ont des besoins différents en débits, donc utilisent des applications à QoS variée.

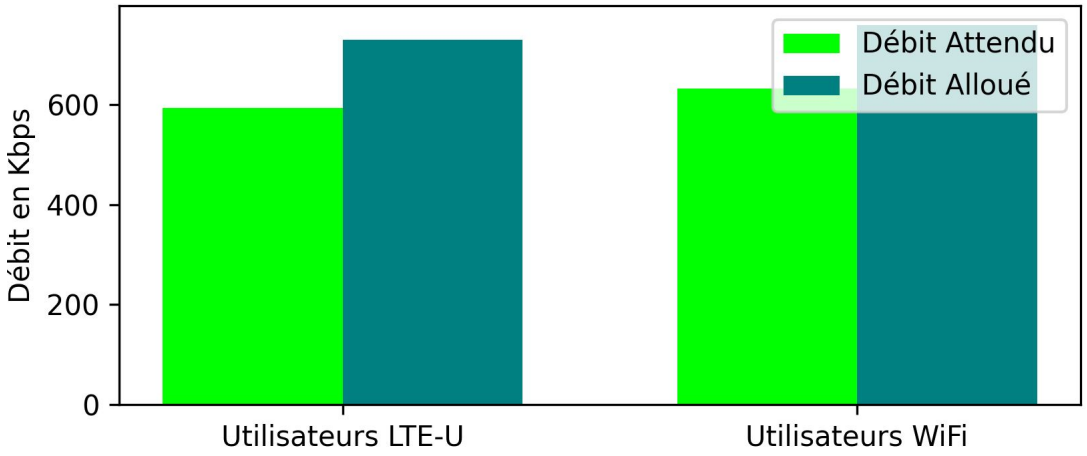

Figure II.5 – Débits alloués moyens entre les utilisateurs WiFi et LTE-U

Dans la figure II.4, nous révélons la comparaison entre le débit alloué moyen attendu des utilisateurs LTE-U et le débit de données moyen atteint. Le résultat montre que la méthode que nous proposons répond aux exigences de QoS des applications à 80%. L'exception réside dans le cas de la SBS 3, même si la carence en débit alloué par rapport au débit attendu reste minime. La figure montre que le débit de données moyen atteint est supérieur à 700 Kbps, comparé au débit moyen attendu qui est inférieur à 600 Kbps. Cela signifie que la méthode CCG rend le déploiement hétérogène plus convivial pour les applications à haute qualité de service telles que la vidéoconférence.

La figure II.5 montre les débits alloués moyens des utilisateurs WiFi et LTE-U. Pour la LTE-U, le débit moyen général alloué aux utilisateurs dépasse leurs attentes en QoS, avec 730 Kbps de débit alloué contre 594 Kbps de débit attendu. Quant au WiFi, le débit moyen attendu de l'utilisateur est de 632,5 Kbps et que grâce à la solution CCG, le débit moyen atteint par l'utilisateur est de 760 Kbps, ce qui est suffisant pour la majorité des types d'applications. En fait, la solution proposée a résolu le problème lié à la détérioration des performances du réseau WiFi lors du déploiement avec les réseaux LTE-U.

6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tenté de résoudre le problème d'interférence WiFi/LTE-U en augmentant la qualité de service de l'application de chaque utilisateur servie par la SBS LTE. Nous avons utilisé la théorie des jeux de coalition pour garantir le plus de sous-canaux possible à chaque utilisateur de chaque SBS. Les SBS et leurs utilisateurs ont été modélisés comme les joueurs du jeu coopératif. La solution s'est avérée plus performante que le jeu de négociation en ce qui concerne le débit de liaison descendante de l'utilisateur moyen, car elle améliore le débit de données pour tous les utilisateurs.

CHAPITRE III

JEU COOPÉRATIF BASÉ SUR Q-LEARNING POUR UNE COEXISTENCE OPTIMALE ENTRE LES SYSTÈMES WIFI ET LTE-U

Ce chapitre présente une application directe de l'apprentissage automatique dans l'amélioration de la QoS des utilisateurs des réseaux hétérogènes. En particulier, le Q-learning sera exploité dans le but d'optimiser le temps d'abstention partagé entre les réseaux LTE et les réseaux WiFi dans le spectre sans licence. Dans le troisième chapitre, nous décrirons les mécanismes de l'apprentissage par renforcement, dont dérive le Q-learning. Par la suite, nous détaillerons notre modèle à partir duquel nous élaborerons la solution d'optimisation d'allocation temporelle basée sur la Q-learning. Une fois l'implémentation de la solution décrite, nous montrerons les résultats de la simulation, en se basant sur les paramètres présents lors de la modélisation.

1 Apprentissage par renforcement

1.1 Principe et Définitions

L'apprentissage par renforcement (RL) est l'apprentissage du comportement optimal dans un environnement pour obtenir une récompense maximale. Ce comportement optimal s'apprend par le biais d'interactions avec l'environnement et d'observations de la façon dont il réagit, de la même manière que les enfants explorent le monde qui les entoure et apprennent les actions

qui les aident à atteindre un objectif.

Sans la présence d'un superviseur, l'apprenant doit découvrir tout seul l'ensemble d'actions qui maximise la récompense.

La phase de découverte est un processus durant lequel l'agent procède en mode "essais et erreurs" (Trials and Errors). Les actions éffectuées par l'agent sont évaluées selon les critères suivants :
-La récompense immédiate qu'elles rapportent.
-La récompense différée qu'elles pourraient rapporter.

La supériorité de la puissance des algorithmes basés sur l'apprentissage par renforcement, réside dans l'aptitude de l'agent à apprendre les actions qui aboutissent à un succès éventuel dans un environnement invisible sans l'aide d'un superviseur. Le renforcement de base est modélisé tel un processus de décision de Markov (MDP) :

- Un ensemble d'états d'environnement et d'agents S ;
- Un ensemble d'actions, A, de l'agent ;
- $P_a(s, s') = Pr(s_{t+1} = s' \mid s_t = s, a_t = a)$ est la probabilité de transition (à l'instant t) de l'état s à l'état s' sous l'action a.
- $R_a(s, s')$ est la récompense immédiate après la transition de l'état s à l'état s' avec l'action a.

Le but de l'apprentissage par renforcement est que l'agent apprenne une politique qui mène vers une solution optimale, ou presque optimale, qui maximise la "fonction de récompense" ou tout autre signal de renforcement fourni par l'utilisateur qui s'accumule à partir des récompenses immédiates.

Une IA d'agent d'apprentissage par renforcement de base interagit avec son environnement par étapes de temps discrètes. A chaque instant t, l'agent reçoit l'état actuel s_t ainsi que la récompense r_t. Ensuite, cet agent choisit l'action a_t à partir de l'ensemble des actions disponibles, qui sera ensuite transmis à l'environnement. L'environnement passe à un nouvel état s_{t+1} et la récompense r_{t+1} associé à la transition (s_t, a_t, s_{t+1}) sera déterminée.

Il est attendu de l'agent d'apprentissage par renforcement d'apprendre une "politique" :

$$\pi : A \times S \to [0,1], \pi(a,s) = Pr(a_t = a \mid s_t = s) \qquad \text{(III.1)}$$

qui maximise la récompense cumulative attendue.

1.2 La phase explortative de l'apprentissage par renforcement

Le compromis entre l'exploration et l'exploitation a été le plus étudié à travers le problème du "bandit multi-armé". L'apprentissage par renforcement nécessite des mécanismes d'exploration intelligents ; la sélection aléatoire d'actions, sans référence à une distribution de probabilité estimée, montre de mauvaises performances. Le cas des (petits) processus de décision de Markov finis est relativement bien compris.

Néanmoins, les méthodes d'exploration en forme simple sont les plus couramment utilisées, faute d'algorithmes qui s'adaptent correctement dans les situations qui requièrent une modélisation avec un espace d'états infinis. Une de ces méthodes est dite "ε -greedy", où $0 < \varepsilon < 1$ est un paramètre qui contrôle le rapport "exploration vs exploitation". Si la probabilité est de $1 - \varepsilon$, l'exploitation est choisie, et ce sera à l'agent de sélectionner l'action qui lui semble la plus rentable.

Si au contraire la probabilité est de ε, l'exploration est choisie, et l'agent choisira une action uniformément de manière aléatoire. Même si ε est considéré comme un paramètre fixe, il peut toutefois être ajusté, que ce soit de manière planifiée, ou bien de façon adaptative en fonction de l'heuristique.

Le problème reste d'utiliser l'expérience passée pour découvrir quelles actions conduisent à des récompenses cumulatives plus élevées.

i)Politique de sélection d'action

La sélection d'action de l'agent est modélisée sous la forme d'une carte appelée "stratégie" :

$$\pi : A \times S \to [0,1]$$
$$\pi(a,s) = Pr(a_t = a \mid s_t = s) \qquad \text{(III.2)}$$

La carte de politique donne la probabilité de prendre des mesures a dans l'état s. Il existe également des politiques non-probabilistes.

ii)Fonction de valeur d'état

La fonction de valeur $V_\pi(s)$ est définie comme le retour attendu commençant par l'état s, c'est-à-dire $s_0 = s$, et suivant successivement la politique π. Par conséquent, grosso modo, la fonction de valeur estime "à quel point il est bénéfique" d'être dans un état donné.

$$\mathrm{V}_\pi(s) = E[R] = E\left[\sum_{t=0}^{+\infty} \gamma^t r_t \mid s_0 = s\right] \qquad \text{(III.3)}$$

Où la variable aléatoire R désigne la variable de retour et est définie comme la somme des futures récompenses actualisées :

$$\mathrm{R}{=}\sum_{t=0}^{+\infty} \gamma^t r_t \qquad \text{(III.4)}$$

Où r_t est la récompense à l'étape $t, \gamma \in [0, 1[$ est le taux d'actualisation. Ce taux est inférieur à 1, de sorte que les événements dans un futur lointain sont moins pondérés que les événements dans le futur immédiat.

2 Apprentissage Q-learning

Le Q-learning est un algorithme d'apprentissage par renforcement sans modèle pour apprendre la valeur d'une action dans un état particulier. Il ne nécessite pas de modèle de l'environnement (donc "sans modèle"), et il peut gérer les problèmes de transitions et de récompenses stochastiques sans nécessité d'adaptations.

Pour tout processus de décision de Markov fini (FMDP), le Q-learning trouve une politique optimale dans le but de maximiser la valeur espérée de la récompense totale sur toutes les étapes successives, à partir de l'état actuel. Le Q-learning peut identifier une politique optimale de sélection d'action pour n'importe quel FMDP donné, avec un temps d'exploration infini et une politique partiellement aléatoire. "Q" fait référence à la fonction que l'algorithme calcule. Elle permet l'estimation des récompenses attendues pour une action entreprise dans un état donné.

Figure III.1 – Apprentissage par renforcement

2.1 L'algorithme du Q-learning

Après Δt, l'agent décidera de l'étape suivante. Le poids pour cette étape est calculé comme suit : $\gamma^{\Delta t}$, où γ (le facteur de remise) est un nombre compris entre 0 et 1 ($0 \leq \gamma \leq 1$) et a pour effet de valoriser les récompenses reçues plus tôt que celles reçues plus tard. La variable γ peut également être interprétée comme la probabilité de réussir (ou de survivre) à chaque étape Δt.

Par conséquent, l'algorithme a une fonction qui calcule la qualité de l'association état-action :

$$Q : A \times S \rightarrow \mathbb{R}$$

Avant le début de l'apprentissage, Q est initialisée à une valeur fixe éventuellement arbitraire (choisie par le programmeur). Puis, à chaque instant t, l'agent sélectionne une action a_t, observe une récompense r_t, entre dans un nouvel état s_{t+1} (qui peut dépendre à la fois de l'état précédent s_t et de l'action sélectionnée), et Q est mise à jour.

Au cœur de l'algorithme se trouve l'équation de Bellman en tant que simple mise à jour itérative des valeurs utilisant une moyenne pondérée d'informations anciennes et nouvelles.

$$Q^{new}(s_t, a_t) \leftarrow \underbrace{Q(s_t, a_t)}_{\text{old value}} + \underbrace{\alpha}_{\text{learning rate}} \cdot \overbrace{\Big(\underbrace{r_t}_{\text{reward}} + \underbrace{\gamma}_{\text{discount factor}} \cdot \underbrace{\max_a Q(s_{t+1}, a)}_{\text{estimate of optimal future value}} - \underbrace{Q(s_t, a_t)}_{\text{old value}} \Big)}^{\text{temporal difference}}$$
$$\underbrace{\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad}_{\text{new value (temporal difference target)}}$$

(III.5)

Où r_t est la récompense reçue lors du passage de l'état s_t à l'état s_{t+1}, et α est le taux d'apprentissage ($0 < \alpha \leq 1$).

Il est à noter que $Q^{new}(s_t, a_t)$ est la somme de trois facteurs :

- $(1 - \alpha)Q(s_t, a_t)$: la valeur courante pondérée par le taux d'apprentissage. Les valeurs du taux d'apprentissage proches de 1 accélèrent les changements de Q.
- $\alpha\, r_t$: la récompense $r_t = r(s_t, a_t)$ pour obtenir si l'action a_t est effectuée dans l'état s_t (pondérée par le taux d'apprentissage)
- $\alpha\gamma\ max_a Q(s_{t+1}, a)$: la récompense maximale pouvant être obtenue à partir de l'état s_{t+1} (pondérée par le taux d'apprentissage et le facteur de remise)

Un "epoch" de l'algorithme se termine lorsque l'état s_{t+1} est un état final ou terminal. Cependant, le Q-Learning peut également apprendre dans des missions de non-épisodes. Si le coefficient de réduction est inférieur à 1, les valeurs d'action sont finies même si le problème peut contenir des boucles sans fin.

Pour tous les états finaux $s_f, Q(s_f, a)$ n'est jamais mise à jour, mais est défini sur la valeur de récompense r observée pour l'état s_f. Dans la plupart des cas, $Q(s_f, a)$ peut être égale à zéro.

2.2 Implémentation du Q-learning

2.2.1 Approximation des fonctions

Le Q-learning peut être combiné avec une approximation de fonction. Cela permet à l'algorithme d'être appliqué à des problèmes plus importants, même si l'espace d'état est continu. Une solution consiste à utiliser un réseau de neurones artificiels (ajusté) comme approximateur de fonction. L'approximation fonctionnelle peut accélérer l'apprentissage dans des problèmes finis, car les algorithmes peuvent généraliser les expériences passées à des états inédits.

2.2.2 Quantification

Une autre technique pour réduire l'espace état/action consiste à la quantification des valeurs possibles. Prenons l'exemple d'apprendre à équilibrer une tige sur un doigt. Décrivons l'état à un instant donné en fonction de la position du doigt dans l'espace, de sa vitesse, de l'angle de la tige et de la vitesse angulaire de la tige. Cela peut se modéliser en un vecteur à quatre éléments décrivant cet état, c'est-à-dire un "snapshot" de l'état codé avec quatre valeurs. Le problème est qu'il existe une infinité d'états possibles. Pour réduire l'espace possible d'actions valides,

certaines valeurs peuvent être compartimentées. La distance correcte entre la position du doigt par rapport à sa position de départ ($-\infty$ à $+\infty$) n'est pas connue, mais on peut deviner si cette distance est assez grande ou pas (proche ou loin).

3 Description du modèle

Les ressources faisant l'objet d'une allocation entre les WAP et les SBS seront présentées dans un domaine temps-fréquence. Dans la bande sans licence, chaque canal a une bande passante de 20 MHz [52], et chaque périphérique utilise une application avec une attente de QoS spécifique dans le débit requis. Le débit attendu de chaque nœud (SBS) sera exprimé par la somme du débit minimal attendu de tous les utilisateurs desservis par ledit nœud. Ce sera problématique néanmoins lorsque les sous-canaux disponibles sans licence se raréfieront. Surtout quand les réseaux LTE-U sont impliqués. Ajoutons à cela que les attentes de QoS des applications multimédias utilisées augmentent avec le temps, et la latence est de moins en moins tolérée. D'autant plus que le multi-jeu proposé dans [37] ne résout pas ce problème spécifique.

4 Description de la solution

La valeur ajoutée de notre cadre proposé est que nous fusionnons plusieurs concepts clés :

- Un mécanisme de coexistence plus orienté WiFi : de nombreux ouvrages comme [14] se concentrent davantage sur les intérêts du LTE-U, sans en préciser les conséquences dirèctes sur les performances des WAP WiFi. La principale différence de notre approche est que les WAP ayant suffisamment de temps pour servir ses utilisateurs tout en coexistant avec les SBS sont au centre de notre solution.
- Une vision anti-rareté : de nombreux frameworks de jeux coopératifs comme [33], ne résolvent pas le problème lié à la rareté des ressources. En effet, le framework de [33] ne vise pas spécifiquement à traiter le scénario de cas, où la ressource requise par tous les utilisateurs dépasse les ressources disponibles.

Le fait que nous ayons à faire face à un double problème qu'est l'allocation temporelle et spectrale entre les WAP et les SBS, nécessite de diviser notre cadre en deux solutions interdépendantes : l'une pour garantir une QoS de débit descendant pour les utilisateurs et la seconde est d'empêcher les SBS de dominer les WAP. Nous définissons d'abord une fraction de temps fixe τ_0 selon [44]. Ensuite, en fonction de sa valeur, nous calculons la fraction de temps τ_0 qui accorde les meilleurs débits possibles aux utilisateurs WiFi et garantit en même temps

que le débit alloué à la SBS LTE-U ne soit pas inférieur à la QoS utilisateur prédéfinie. Les algorithmes III.2 et III.3 ont été utilisés pour résoudre ces deux problèmes d'allocation.

Algorithme III.1 Le Framework General

Initialization of τ_0
while *convergence not achieved* **do**
  τ=Time-Allocation(y,R_{max},R_{min})
  FOR EACH SBS i (Using the Q-learning Time Allocation approach)
  y_i=Resource-Allocation(τ)
  FOR EACH SBS i
  Do (Algorithm 5) END IF
end
Result: τ and y_i

Motivations et justifications

Dans le chapitre précédent, nous avons traité le problème de coexistence grâce à un framework basé purement sur la théorie des jeux. Ce framework peut donner lieu à plusieurs optimisations. Notamment au niveau des utilisateurs des SBS LTE-U. Les résultats générés par la solution décrite dans le chapitre II a pour inconvénient de laisser des sous-canaux résiduels à la fin de l'allocation spectrale entre les SBS et puis entre les utilisateurs au sein de chaque SBS. Ces sous-canaux pourraient être d'une grande utilité pour certains réseaux, en particulier ceux requérant un débit élevé. De plus, le calcul de la fraction temporelle τ du framework précédant résulte de deux calculs interdépendants (allocation temporelle et allocation spectrale) grâce à la programmation linéaire. L'inconvénient de cette approche est qu'elle converge vers un optimum local dans la plupart des cas. L'approche décrite dans ce chapitre, par contre, est composée d'une phase d'exploration des valeurs de τ, puis d'une phase d'exploitation des valeurs explorées. Ce qui permet une vision bien claire quant à la recherche de la valeur τ la plus optimale.
En effet, chaque utilisateur utilise une application qui requiert un débit minimal spécifique afin de fonctionner correctement. La figure III.3 illustre le flowchart global de la solution, où l'allocation temporelle et spectrale sera résolue.

Théorie des jeux de coalition pour l'allocation spectrale

Dans ce problème, nous voulons maximiser le débit alloué global des SBS, de sorte qu'on ne réprime pas les performances des points d'accès WiFi sur la bande sans licence. Pour résoudre le sous-problème de rareté spectrale, un cadre de jeu de coalition est proposé. Plus précisément, le sous-problème est modélisé comme un problème de faillite. Les problèmes de

faillite dans la théorie des jeux sont utilisés dans le cas où les réclamations des joueurs impliqués dans le jeu dépassent la quantité disponible. Dans notre contexte, nous pouvons formuler mathématiquement notre problème dans l'équation III.6 :

$$\begin{aligned} & max_{\tau} \{R_S, R_w\} \\ s.t. & R_{w,v}^{min} \leq R_{w,v}(\tau) \leq R_{w,v}^{max} \\ & \tau_0 \leq \tau \leq 1 \end{aligned} \tag{III.6}$$

Avec $R_S = \sum_{i \in S} \sum_{j \in U_i} R_{i,j}$, $R_w = U_w.R_{w,v}$, et τ_0 est la fraction du time slot nécessaire pour maintenir $R_{w,v}^{min}$, $\forall v \in U_w$ quand les SBS s'abstiennent de l'utilisation du spectre sans licence. Puisque III.6 est un problème multi-objectif, nous pouvons utiliser la solution de faillite pour le résoudre. La sous-solution elle-même sera divisée en deux niveaux :

- Au niveau macro : appliquer la solution Nucleolus aux SBS en distribuant les sous-canaux disponibles sans licence.
- Au niveau micro : pour chaque SBS, appliquer le Nucleolus aux utilisateurs servis, en utilisant la ressource allouée du niveau macro.

La figure III.2 illustre la dynamique de l'allocation des sous-canaux sans licence entre les SBS et entre les utilisateurs desservis par chaque SBS.

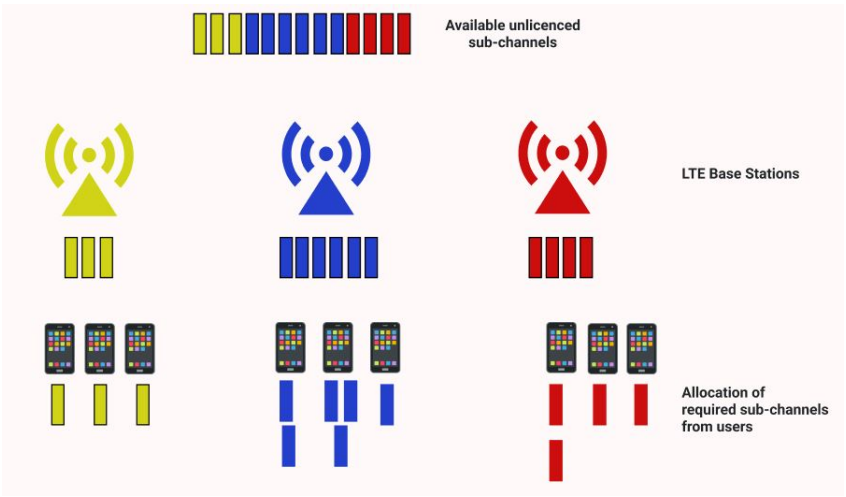

Figure III.2 – Illustration des macro et micro-allocations spectrales

Q-learning pour l'allocation temporelle

Etant donné que nous pouvons modéliser notre problème d'allocation de temps avec un espace d'états discret et fini (avec des valeurs de τ avec une approximation de 10^{-2}), et des espaces d'action finis et discrets (augmenter ou diminuer le τ), il est possible de résoudre le problème en utilisant le Q-learning. D'un point de vue général, l'apprentissage est un processus itératif où chaque itération effectuée dans un épisode (pas de temps) est associée à une récompense, après quoi le joueur "se souvient" des conséquences de ses actions, comme décrit dans la figure III.1.

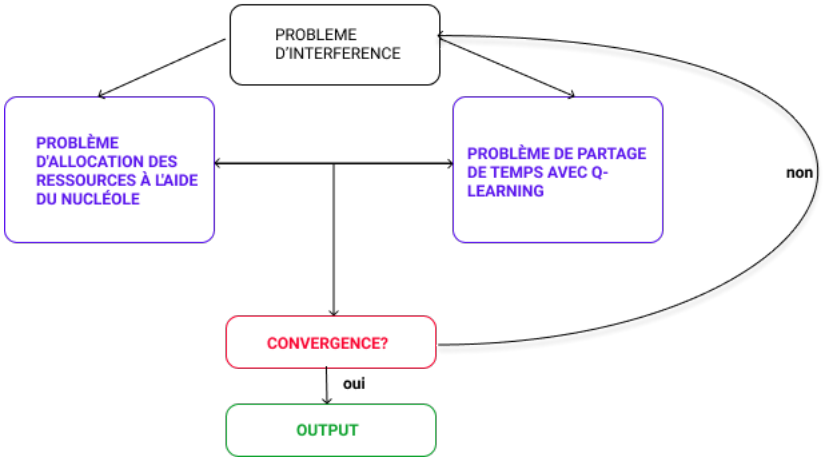

Figure III.3 – Solution au problème de coexistence

Algorithme III.2 Allocation des Ressources pour les SBS LTE-U

Input τ, QoS, R^l
for *i in SBS* **do**
  for *j in SBS users* **do**
    Calculate $QG_{i,j}$=$QoS_{i,j}$-$R^l_{i,j}$
    Find achievable rate of user j for a single unlicenced subchannel with the help of (4)
    $R^{u,1}_{i,j}$=$R^{u,1}_{i,j} * (1-\tau)$
    Calculate minimum number of subchannels requirement for user j by :
    $mSCR^u_{i,j} = QG_{i,j}/R^{u,1}_{i,j}$
    while *SBS arent satisfied* **do**
      Solve the bankruptcy problem on the micro and macro level
    end
  end
end
Result: Allocation matrix y

La fonction principale de l'algorithme qui calcule la qualité d'une combinaison état-action est définie comme suit : $Q : S \times A \rightarrow \mathbb{R}$.
Avant le début de l'apprentissage, Q est initialisé à une valeur fixe éventuellement arbitraire, ici nous choisirons 0 partout. A chaque instant t, l'agent sélectionne une action a, observe une récompense r_t, puis entre dans un nouvel état $s_{(t+1)}$ et la table Q est mise à jour.

$$Q_{t+1}(s_t, a_t) = Q_t(s_t, a_t) + \alpha_t(s_t, a_t).(R_{t+1} + \gamma max_a(Q_t(s_{t+1}, a)) - Q_t(s_t, a_t)).$$
(III.7)

Nous mettrons à jour la valeur de *Q (s, a)* grâce à la récompense effectivement obtenue à partir de l'état s en appliquant l'action a, à laquelle nous ajouterons la meilleure récompense que nous pourrons obtenir dans le futur, comme décrit dans la figure III.4.

Algorithme III.3 Allocation temporelle avec le Q-learning

Arbitrary Initialization of $Q(s, a)$
REPEAT

FOR EACH episode

FOR EACH step of episode
Select an action a
Move to state s_{t+1}
Q is updated using Bellman ;

$$Q_{t+1}(s_t, a_t) = Q_t(s_t, a_t) + \alpha_t(s_t, a_t).(R_{t+1} + \gamma max_a(Q_t(s_{t+1}, a)) - Q_t(s_t, a_t))$$

Update the state
END FOR
END FOR
UNTIL s is terminal

Ici, la récompense est fonction du débit alloué associé à la fraction de temps τ (état), selon que les agents (ici les points d'accès WiFi) choisiront ou non d'augmenter ou de diminuer la valeur de τ (actions).

Nous proposons l'utilisation d'une solution Q-learning afin d'équilibrer plus efficacement le temps et l'allocation spectrale. Cette solution d'allocation de temps vise à trouver la valeur de τ de telle sorte qu'elle n'empêche pas les WAP de fonctionner correctement :

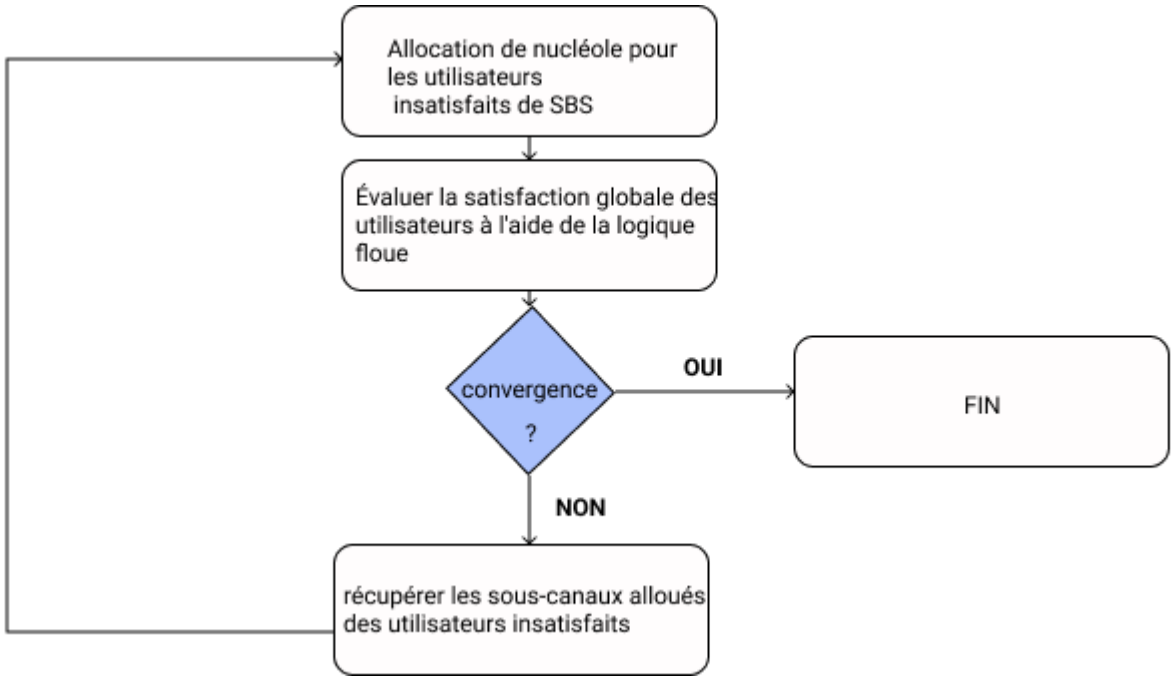

Figure III.4 – Allocation de ressources pour chaque SBS

- Lors de l'initialisation, nous prédéfinissons τ comme τ_0, et une matrice Q-values Q pour stocker les futurs états et actions de la SBS. En particulier, dans l'approche proposée, chaque SBS stocke une fonction de valeur Q (s, a) qui mesure la récompense attendue qui peut être obtenue en choisissant l'action a d'augmentation / diminution de la valeur τ en fonction de l'expérience passée.
- Chaque fois que la valeur de τ est augmentée ou diminuée, la fonction de valeur Q (s, a) est mise à jour, suivie de la mise à jour de l'état.
- Après la phase de mise à jour, l'état actuel, qui est représenté par τ, sera injecté à l'algorithme III.3, qui déterminera si τ est bien optimale .

Les trois étapes ci-dessus seront exécutées dans une boucle de n_E épisodes, jusqu'à ce qu'elle atteigne l'optimalité.

5 Résultats des simulations et discussions

Dans cette section, les performances de notre approche seront évaluées, en termes de débits alloués, de ressources sans licence, de pourcentage d'utilisateurs satisfaits et d'équité. Les exigences QoS des applications multimedia ainsi que les principaux paramètres utilisés dans cette simulation sont indiqués dans les tableaux III.1 et III.2 respectivement.

La figure III.5 illustre le nombre de ressources spectrales restantes après l'allocation de celles-ci aux utilisateurs, grâce à notre solution proposée, dont nous avons comparé les performances à celles de l'approche MGA. La figure montre que notre solution a réussi à exploiter la totalité des ressources spectrales pour satisfaire les utilisateurs des réseaux hétérogènes. Ce qui explique le fait que 0 sous-canaux sans license sont restés inutilisés avec notre approche, contre 14 sous-canaux pour la MGA.

Applications	**Exigences Minimales (Kbps)**
HD video streaming	800
Video conferencing	700
VoIP	512
Audio streaming	320

Tableau III.1 – Exigences QoS des applications multimedia

Symboles	Valeur	Symboles	Valeur
S	5	$\|U_i\|$, ∀i	50
B_l	180 kHz	$\|C_i^l\|$, ∀i	50
B_u	15 kHz	$\|C^u\|$	1200
P_i^l , ∀i	19 dBm	P_i^u , ∀i	17dBm
σ^2	-174 dBm	G	-33.5dBV
U_w, ∀w	5	W	5
α	3		

Tableau III.2 – Valeurs des paramètres de la simulation

Dans la figure III.6, nous manifestons la comparaison du débit moyen atteint par utilisateur entre différentes méthodes. Il montre que le débit atteint par utilisateur de la méthode proposée est supérieur à l'approche MGA [37]. Le MGA produit environ 229 Kbps de débit moyen par utilisateur. Au contraire, notre approche produit environ 809,42 Kbps. Ce qui prouve l'importance de la fusion entre l'attribution proportionnelle des deux ressources spectrales et temporelles aux points d'accès WiFi ainsi qu'aux SBS du LTE-U. Cette différence peut s'expliquer du fait que notre solution utilise le plus de sous-canaux possible, grâce à leur réattribution répétitive aux utilisateur. Ce qui permet moins de gaspillage au niveau spectral, donc plus de débits alloués.

En outre, la figure III.7 montre que notre approche a une meilleure équité de Jain que la MGA(40% contre 21%). Ce qui indique que notre approche permet une distribution plus équitable des ressources spectrales aux utilisateurs des réseaux hétérogènes que la MGA. Cette

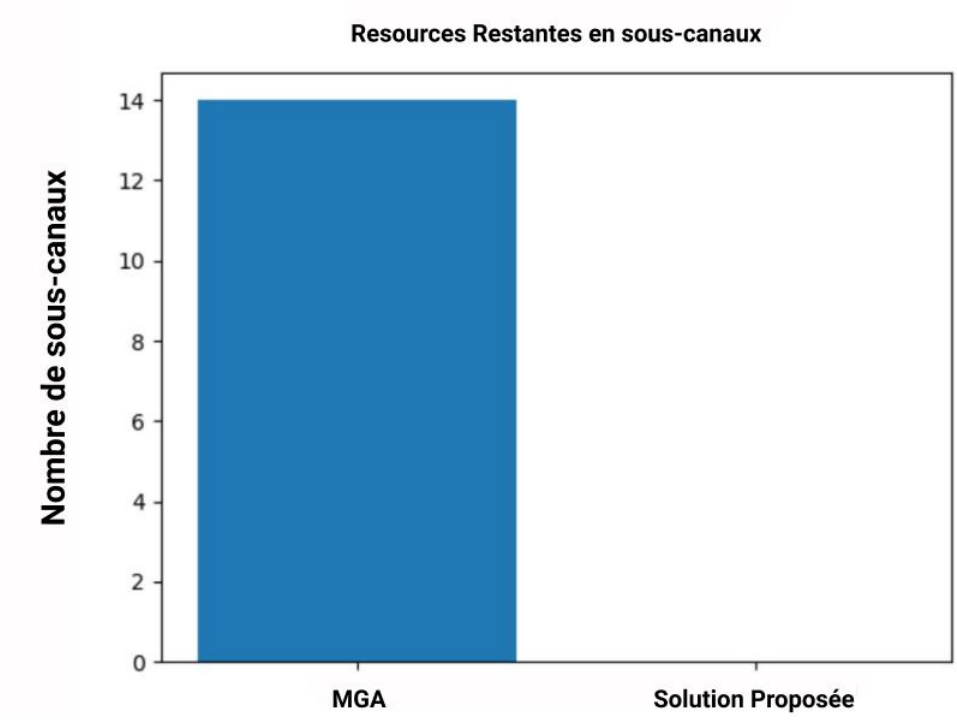

Figure III.5 – Ressources restantes après l'allocation aux utilisateurs

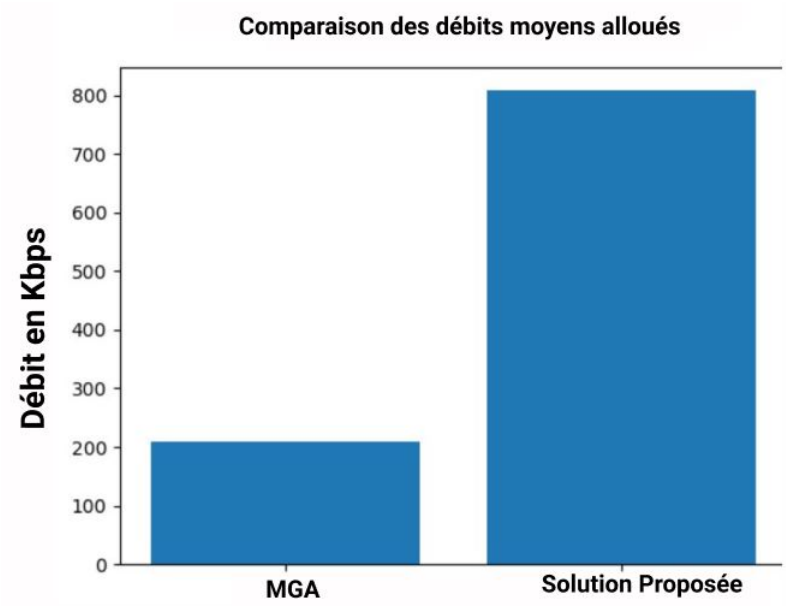

Figure III.6 – Comparaison de débits entre notre approche et celle du multi-game

indication est importante dans la mesure où l'évaluation des débits moyens attribués aux utilisateurs à elle seule ne suffit pas pour prouver la satisfaction de ces derniers de point de vue QoS.

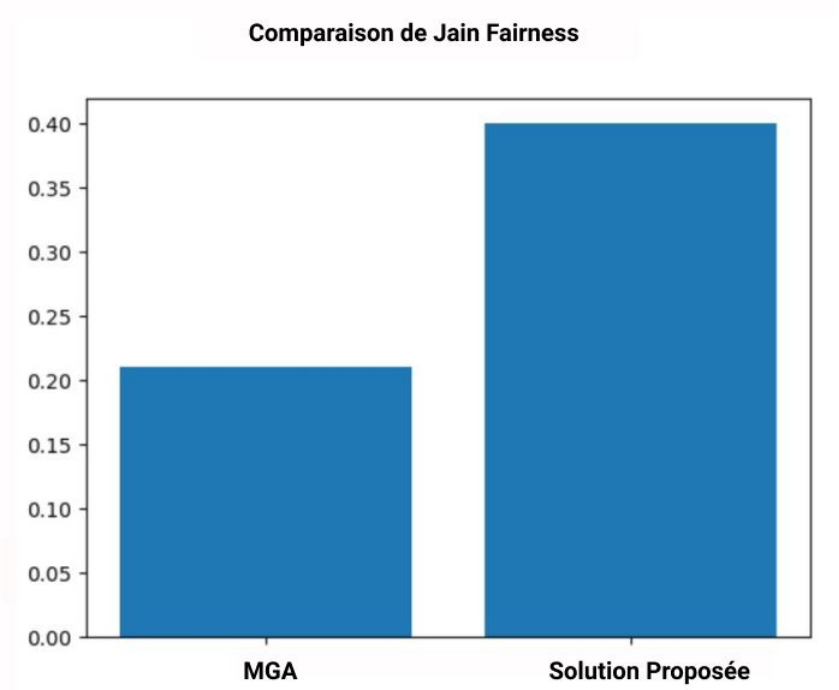

Figure III.7 – Comparaison de l'indice de Jain entre notre approche et celle du multi-game

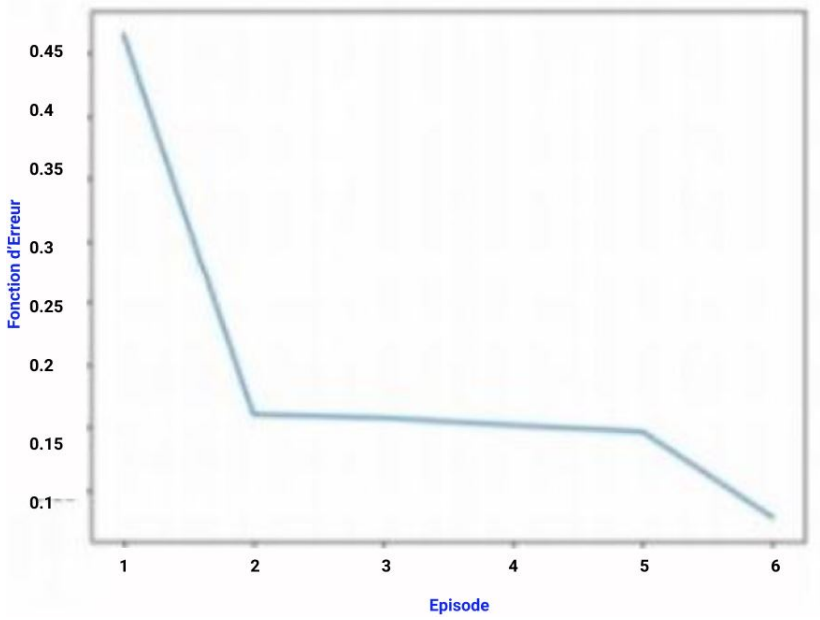

Figure III.8 – Évaluation de performance de l'apprentissage du système

Enfin, nous pouvons observer la rapidité avec laquelle le système "apprend" la valeur de la fraction de temps optimale pour l'allocation de temps entre les SBS et les WAP. Dans la figure III.8, nous montrons la récompense totale cumulée reçue par les WAP après chaque action

qu'ils ont choisie (ici l'action correspond à savoir si le τ doit augmenter ou diminuer ou non). Le score SBS est initialisé à 0. L'ensemble des actions sont (a_1, a_2, a_3, a_4) que nous définissons respectivement comme (-0,1, -0,01, + 0,01, + 0,1). A chaque itération, la SBS choisira au hasard une action a_i et ajoutera sa valeur à τ avant que l'algorithme III.3 ne détermine si la nouvelle valeur de τ est optimale. L'ensemble de récompenses est défini comme (-10, -1, + 10, + 100), car nous voulons "punir" la SBS si la valeur τ est loin de la valeur optimale, ce qui explique la récompense cumulative négative de la figure III.8. En effet, la courbe de la figure est en déclin au fur et à mesure de l'apprentissage. Nous pouvons voir à quel point le Q-learning est efficace lorsqu'il s'agit de maximiser les récompenses cumulées, même si le score cumulé fluctue au début. Cette fluctuation se produit en raison de la nature aléatoire du choix d'action des agents (WAP).

6 Conclusion

Nous avons étudié en profondeur le principal problème lié à l'interférence WiFi / LTE dans la bande sans licence. En particulier les problèmes d'allocation temporelle aux WAP et aux SBS. C'est pour cela que nous avons développé une approche automatisée qui vise à trouver la valeur optimale du time slot pour que les WAP du WiFi puissent exploiter les ressources spectrales sans se faire interrompre par les SBS LTE-U.

Néanmoins la question de priorisation se pose toujours, puisque celle-ci concerne également les utilisateurs au sein du même réseau. C'est pour cela qu'une nouvelle approche est nécessaire afin d'évaluer les niveaux de priorité de chaque utilisateur, en fonction de leur besoin en QoS.

CHAPITRE IV

ALLOCATION DES RESSOURCES RÉSIDUELLES EN SE BASANT SUR DES TECHNIQUES DE CLASSIFICATION

Dans ce chapitre, nous discuterons en détail des solutions courantes utilisées pour faire face à la rareté des accès aux ressources du WiFi en raison de son interférence avec les réseaux LTE. En outre, nous développerons en profondeur la manière dont notre approche est d'une grande aide en ce qui concerne l'allocation des ressources entre les nœuds de réseaux hétérogènes. Cette solution est basée sur un double jeu coopératif entre les SBS LTE-U et entre les utilisateurs de chaque SBS. Ce double jeu est amélioré par la logique floue[49], ce qui contribuera grandement à évaluer la priorité des utilisateurs de LTE-U. Notre approche vise non seulement à garantir une qualité de service en descente pour la SBS LTE-U, mais aussi à aider les points d'accès WiFi à accéder aux ressources sans les exposer à des interférences avec les SBS LTE-U.

1 Les méthodes de classification

1.1 Les apprenants passifs

Les apprenants passifs stockent simplement les données d'apprentissage et attendent que les données de test apparaissent. Dans ce cas, la classification est effectuée sur la base des données les plus liées dans les données d'apprentissage stockées. Par rapport aux apprenants actifs,

les apprenants passifs ont moins de temps d'apprentissage, mais prennent plus de temps pour prédire les résultats. Exemple. k-voisin le plus proche

1.2 Les apprenants actifs

Les apprenants actifs construisent un modèle de classification basé sur les données de formation en "input" avant de recevoir des données pour la classification. Il doit pouvoir s'engager sur une seule hypothèse couvrant tout l'espace d'instance. En raison de la construction du modèle, les apprenants actifs mettent beaucoup de temps à s'entraîner et moins de temps à prédire.
Ex. Arbre de décision, bayes naïves, réseaux de neurones artificiels. La figure IV.1 illustre parfaitement un exemple d'arbre de décision.

1.3 Algorithmes de classification

Il existe de nombreux algorithmes de classification actuellement disponibles, mais il n'est pas possible de conclure lequel est supérieur à l'autre. Cela dépend de l'application et de la nature de l'ensemble de données disponibles. Par exemple, si les classes sont linéairement séparables, les classificateurs linéaires comme la régression logistique, le discriminant linéaire de Fisher, peuvent surpasser les modèles sophistiqués et vice versa.

2 Les arbres de décision

L'arbre de décision construit des modèles de classification ou de régression sous la forme d'une structure arborescente. Il utilise un ensemble de règles si-alors qui est mutuellement exclusif et exhaustif pour la classification.

L'apprentissage des règles se fait de manière séquentielle au niveau des données reçues. A chaque apprentissage d'une règle, on élimine les tuples couverts par celle-ci.

L'arbre de décision construit selon la stratégie de "diviser pour mieux régner" récursive descendante.

Les attributs doivent être claires et explicites afin de pas être discrédités au préalable. Les attributs en haut de l'arbre ont un impact significatif sur la classification et sont identifiés à l'aide du concept de capture d'informations.

Un arbre de décision peut être facilement sur-ajusté (overfit), générant trop de branches et refléter des anomalies dues au bruit ou à des valeurs aberrantes. Un modèle sur-ajusté fournit

de très mauvaises performances sur les données invisibles même s'il donne des résultats impressionnants sur les données d'apprentissage. Cela peut être évité en pré-élagage qui arrête la construction des arbres prématurément, ou après l'élagage qui retire les branches de l'arbre adulte.

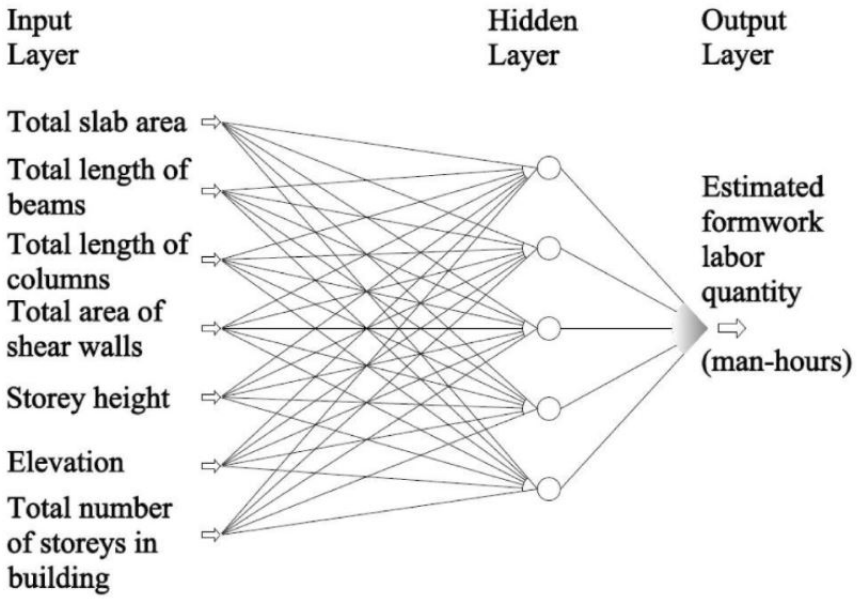

Figure IV.1 – Exemple d'un réseau de neurones

2.1 Les réseaux de neurones

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) ou systèmes d'interconnexion sont des systèmes informatiques inspirés des réseaux de neurones biologiques qui composent le cerveau des animaux. La figure IV.3 montre un neurone biologique, il se compose principalement d'un corps cellulaire, d'axone et de terminaisons neuronales. De tels systèmes "apprennent" à effectuer des tâches en examinant de bons exemples non-programmés avec des règles spécifiques à la tâche.

Un RNA est un modèle basé sur un ensemble d'unités ou des nœuds connectés nommés "neurones artificiels", qui modélisent grossièrement les neurones du cerveau biologique. Chaque connexion, comme la synapse d'un cerveau biologique, peut transmettre une information, un "signal", d'un neurone artificiel à un autre. Un neurone artificiel qui reçoit le signal peut le traiter puis transmettre le signal à des neurones artificiels supplémentaires qui lui sont connectés. Dans les implémentations RNA conventionnelles, le signal à la connexion entre neurones artificiels est un nombre réel, et la sortie de chaque neurone artificiel est calculée comme une fonction non-linéaire de la somme de ses entrées. Les connexions entre neurones artificiels sont

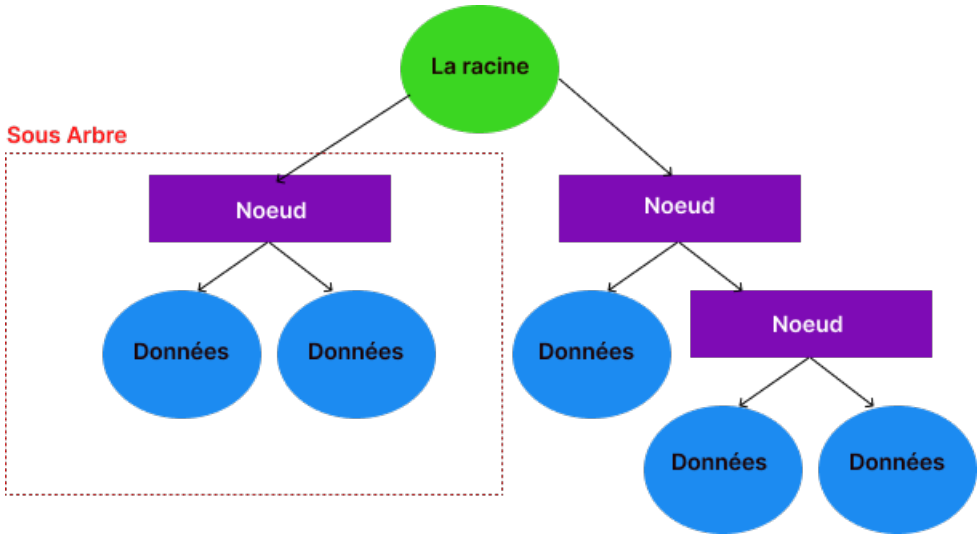

Figure IV.2 – Description des noeuds de décision

nommées ”bords”.

Les bords artificiels et les neurones ont souvent des poids qui s'ajustent au fur et à mesure qu'on apprend. Le poids sert à augmenter ou diminuer la force du signal à une connexion. Le neurone artificiel suit la loi du tout ou rien. Cela veut dire qu'il ne peut avoir un seuil tel qu'un signal n'est envoyé que si le signal synthétisé franchit ce seuil. En général, les neurones artificiels sont assemblés en couches. Différentes couches peuvent effectuer différents types de transformations sur leurs entrées. Le signal passe de la première couche (couche d'entrée) à la dernière couche (couche de sortie), peut-être après avoir passé plusieurs fois les couches à plusieurs reprises.

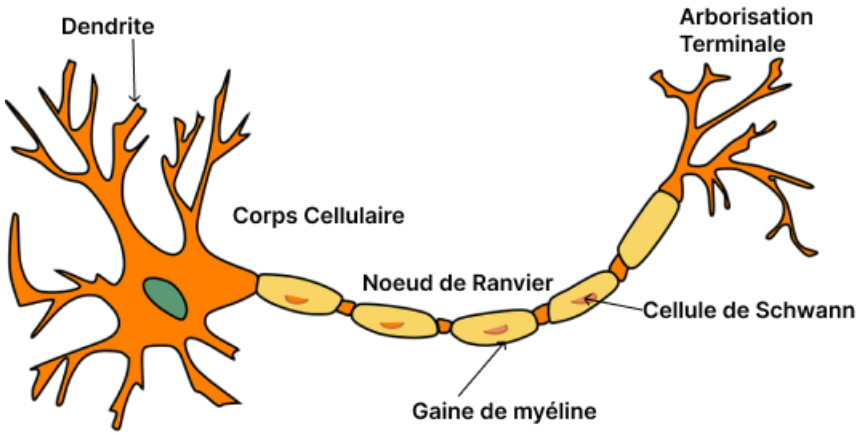

Figure IV.3 – Illustration d'un neurone biologique

L'objectif initial de la méthode RNA était de résoudre des problèmes de la même manière que les cerveaux humains. Au fil du temps, cependant, l'attention portait sur l'accomplissement des tâches spécifiques, ce qui entraîne des écarts par rapport à la biologie. Le réseau de neurones artificiels a été utilisé pour diverses tâches, notamment la vision par ordinateur, la reconnaissance vocale, la traduction automatique, le filtrage des réseaux sociaux, les jeux vidéo ainsi que le diagnostic médical. L'apprentissage en profondeur se compose de couches multiples cachées dans un réseau de neurones artificiels. Cette méthode tente de modéliser comment le cerveau humain transforme la lumière et le son respectivement en vision et en audition. Certaines applications efficaces d'apprentissage profond sont la vision par ordinateur et la reconnaissance vocale.

2.1.1 Composition des réseaux de neurones

Les neurones Les RNA sont composés de neurones artificiels conceptuellement dérivés de neurones biologiques. Comme décrit dans les figures IV.2 et IV.4, chaque neurone artificiel a une entrée et produit une sortie unique qui peut être envoyée à plusieurs autres neurones. Les entrées peuvent être des valeurs typiques d'un échantillon de données externe, comme une image ou un document, où elles peuvent être les sorties d'autres neurones.

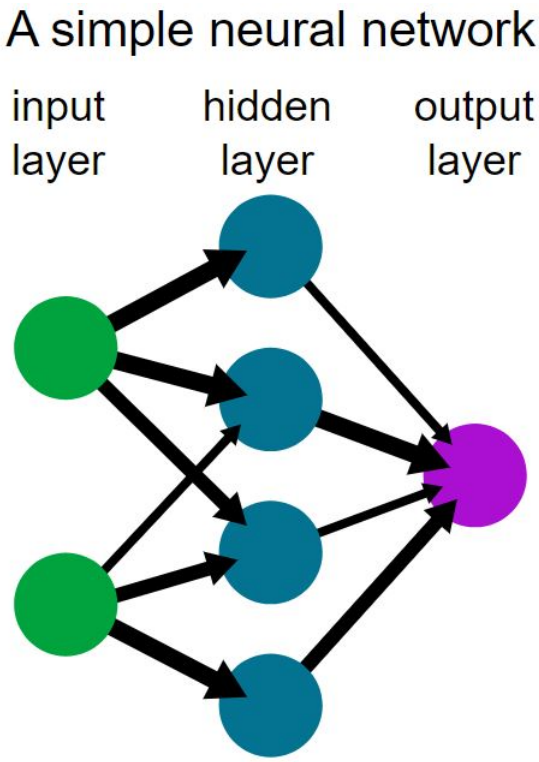

Figure IV.4 – Exemple simplifié d'un réseau de neurones artificiel

La sortie du neurone est représentée par la somme pondérée de toutes les entrées, pondérée des connexions des entrées au neurone. Cette somme sera augementée par un terme appelé "biais", et on trouve la valeur "d'activation". Elle sera ensuite transmise à une fonction d'activation (généralement non-linéaire) pour produire la sortie. L'entrée initiale est constituée de données externes, telles que des images et des documents. La sortie finale complète la tâche, telle que la reconnaissance d'un objet dans une image.

Connections et poids Le réseau est formé de connexions. Chacune des connexions fournit la sortie d'un neurone comme entrée d'un autre neurone. Le degré d'importance relative à chaque connexion sera évaluée par un poids.

Fonction de propagation Calcule l'entrée d'un neurone à partir des sorties de ses neurones prédécesseurs et les résultats les rejoignent sous forme de somme pondérée.

2.1.2 Organisation des réseaux de neurones

Les neurones sont souvent détenus dans de nombreuses couches, en particulier dans l'apprentissage profond. Les neurones d'une couche ne sont connectés qu'à ceux de la couche précédente et suivantes. La couche qui reçoit des données externes est la couche d'entrée. La couche qui génère le résultat final est la couche de sortie. Entre eux, il y a 0 ou quelques couches cachées. Les réseaux monocouches et sans couche sont également utilisés. Entre les deux couches, certains modèles de connexion sont possibles. Ils peuvent être entièrement connectés, chaque neurone d'une couche se connecte à celui de la couche suivante. Ils peuvent se recueillir, de manière qu'un un ensemble de neurones dans une couche sont connectés à un seul neurone dans la couche suivante. Ainsi le nombre de neurones dans cette couche sera réduit. Les neurones uniquement avec des connexions de ce type forment un graphique acyclique et sont appelées réseau de réponses/réaction. De plus, les réseaux autorisant les connexions entre les neurones de la même couche ou des couches précédentes sont appelés réseaux récurrents.

2.1.3 Hyperparamètre

Les hyperparamètres sont des paramètres constants dont les valeurs sont définies avant le début du processus d'apprentissage. Le taux d'apprentissage, le nombre de couches masquées et la taille du lot sont des exemples connus d'hyperparamètres. La valeur d'un hyperparamètre peut être fonction d'autres hyperparamètres. Par exemple l'hyperparamètre h_1 qui présente la taille d'une couche peut dépendre de l'hyperparamètre h_2 qui présente la taille totale de couches.

2.1.4 Apprentissage

L'apprentissage est l'adaptation du réseau qui vise à mieux gérer une tâche en s'appuyant sur des exemples précédemment observés. L'apprentissage consiste à ajuster les poids (et les seuils facultatifs) du réseau afin d'optimiser la précision des résultats, en réduisant les erreurs enregistrées précèdemment. Les étapes d'apprentissage sont terminées lorsqu'on a la confirmation que les observations supplémentaires ne réduisent plus le taux d'erreur. Le taux d'erreur diminue au fur et à mesure que le système 'apprend'. Une fonction appelée "fonction de coût" est évaluée régulièrement dans la phase d'apprentissage. Les coûts sont généralement très approximatifs. La plupart des modèles d'apprentissage peut être considérée comme une simple application d'optimisation et d'estimation de l'application.

Taux d'apprentissage Le taux d'apprentissage définit la quantité d'actions correctives que le modèle nécessite afin de corriger l'erreur dans chaque observation. Plus le taux d'apprentissage

est élevé, plus le temps d'apprentissage est court, mais plus la précision finale est faible. Un faible taux d'apprentissage prendra plus de temps, mais il peut être plus précis.

Fonction du coût S'il est possible de définir une fonction de coût ad hoc, le choix est souvent déterminé par les propriétés souhaitables de la fonction (comme la convexité) ou parce qu'il découle du modèle .

Rétropropagation du gradient La rétropropagation est une abréviation de "rétropropagation d'erreurs". Cette méthode permet de calculer la pente de la fonction de perte pour tous les poids du réseau. Notre modèle consiste à convertir les exigences de débit QoS de chaque utilisateur en un nombre correspondant de sous-canaux sans licence requis. Cela se fait en divisant le débit requis par un utilisateur LTE-U par la bande passante d'un canal sans licence. Le résultat du calcul sera le nombre de sous-canaux requis par cet utilisateur. La solution de la Bankruptcy a beau aider à résoudre les problèmes de proportionnalité des récompenses aux joueurs, elle n'en reste pas moins invalide dans les cas de figure où les exigences minimales des SBSs doivent être complètement satisfaites. De plus, l'utilisation exclusive du Bankruptcy peut engendrer des sous-canaux résiduels non-utilisés. Ainsi, il a été judicieux de redistribuer les sous-canaux non-licenciés restants entre les utilisateurs selon deux paramètres : la disponibilité des ressources et la priorité des utilisateurs en QoS. Ces derniers paramètres seront évalués à l'aide des perceptrons multicouches qui classent les utilisateurs en 3 catégories : "faible", "moyen" et "élevé". Afin d'atteindre l'objectif de coexistence entre le WiFi et la LTE-U en bande sans licence, deux conditions doivent être remplies :
- Une allocation de ressources proportionnelle de sous-canal sans licence entre la LTE et WiFi.
-Une allocation de temps appropriée pour les deux technologies.

3 Hypothèses du modèle objet de la solution

3.1 Calcul du "time-slot"

Nous voulons obtenir un résultat gagnant-gagnant pour les utilisateurs LTE-U et les utilisateurs WiFi. Comme τ est fixe, il est peu probable que les deux systèmes aient la possibilité d'atteindre simultanément leurs objectifs. Par conséquent, nous avons besoin d'une répartition efficace du temps τ pour faire correspondre les avantages des deux parties. Ainsi, avec y_i fixe, $\forall i \in S$ nous reformulons le problème comme suit :

$$\begin{aligned} &\max_{\tau}\{R_S, R_w\} \\ &\text{s.t. } R_{w,v}^{min} \leq R_{w,v}(\tau) \leq R_{w,v}^{max} \\ &\tau_0 \leq \tau \leq 1 \end{aligned} \tag{IV.1}$$

Où $R_S = \sum_{i \in S} \sum_{j \in U_i} R_{i,j}, R_w = U_w.R_{w,v}$ et τ_0 est la fraction de la tranche de temps nécessaire pour maintenir $R_{w,v}^{min}, \forall v \in U_w$ lorsque les SBS accèdent aux ressources. Or (IV.1) est un problème multi-objectif qui est résolu en détail dans [37], à partir de laquelle l'allocation optimale de créneau horaire pour un ensemble donné de SBS et de WAP est :

$$\tau* = \begin{cases} (1/2) + \frac{R_{w,v}^{min}}{2R_{w,v}^{max}} & if \mid S \mid \geq 1 \\ 1 & Otherwise \end{cases} \tag{IV.2}$$

Tableau IV.1 – Notations

Symboles	Significations
S	Ensemble de SBS avec S éléments
W	Ensemble de WAP sans chevauchement avec des W éléments
U_i	Ensemble d'utilisateurs associés à SBS i
U_w	Ensemble d'utilisateurs actifs Uw associés au WAP w
C_i^l	Ensemble de sous-canaux sous licence de SBS i
C_i^u	Ensemble de sous-canaux sans licence de SBS i
B_l	Bande passante de chaque sous-canal sous licence
B_u	Bande passante de chaque sous-canal sans licence
Pl_i	Puissance de transmission de SBS i pour chaque utilisateur dans le spectre sous licence
Pu_i	Puissance de transmission de SBS i pour chaque utilisateur dans le spectre sans licence
x_i	Vecteur d'allocation des ressources pour SBS dans le spectre sous licence
y_i	Vecteur d'allocation des ressources pour SBS dans le spectre sans licence
$\|h_{i,j}\|^2$	Gain de canal entre AP i et récepteur j
G	Facteur de gain de puissance constant
α	Exposant de perte de chemin
$QoS_{i,j}$	Exigence de QoS de l'utilisateur j associée à SBS i
τ	Fraction de temps que les SBS partagent avec les WAP

3.2 Démonstrations des formules

En définissant la dérivée du premier ordre de (IV.5) par rapport à τ et en mettant zéro, nous obtenons :

$$\mathrm{ds}^*(\tau)\frac{}{d\tau=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\tau}\{ln(U_w)+ln(U_s)\}=0} \qquad \text{(IV.3)}$$

En remplaçant maintenant la valeur de U_w et U_S , nous avons :

$$[R_{w,v}^{max}/(\tau R_{w,v}^{max} - R_{w,v}^{min})] + \frac{-1}{1-\tau} = 0 \qquad \text{(IV.4)}$$

Ce qui implique :

$$\tau^* = \frac{1}{2} + \frac{R_{w,v}^{min}}{2R_{w,v}^{max}} \qquad \text{(IV.5)}$$

S'il n'y a pas de SBS à proximité de la zone d'interférence WAP, alors $R_{w,v}^{min}$ et $R_{w,v}^{max}$ seront les mêmes. D'où $\tau = 1$. Dans notre cas, nous avons un ensemble d'utilisateurs insatisfaits U_{i_0}, nombre de sous-canaux sans licence $\mid C_i^u \mid$ et l'exigence des sous-canaux sans licence de remplir leur QoS sont les revendications. Le double jeu flou que nous proposons est chargé d'allouer des sous-porteuses sans licence aux utilisateurs insatisfaits en considérant la solution τ de la sous-section précédente. L'algorithme 1 représente une allocation de ressources basée sur un jeu de faillite floue pour les utilisateurs.

4 Réallocation des ressources spectrales en utilisant la logique floue

4.1 Description de l'algorithme

Dans cet algorithme, on utilise la logique floue (fuzzy logic) pour la classification des utilisateurs des SBS, en fonction de leur demande en débit. Le réseau est modélisé comme dans la figure

Figure IV.5 – Illustration du modèle

IV.5. Les utilisateurs utilisant des applications gourmandes en débit seront priorisés. Si des sous canaux sans licence résiduels existent, ceux-ci seront redistribués, de manière à ce que le plus d'utilisateurs possible soient servis.

4.2 Fonction d'appartenance floue

La fonction d'appartenance floue définit comment les valeurs d'appartenance de 0 à 1 sont attribuées à chaque point dans l'espace d'entrée. L'espace d'entrée est souvent appelé l'univers du discours ou l'ensemble universel (u), qui contient tous les éléments pertinents pouvant être pris en compte dans chaque application.

La figure IV.7 montre clairement comment la fonction d'appartenance est représentée graphiquement dans un contexte de priorité QoS. Et la figure IV.6 présente l'architecture du système flou. Il existe en grande partie trois types de fuzzifiers : le fuzzifier "singleton", le fuzzifier "gaussien" et le fuzzifier "trapézoïdal" ou "triangulaire". Le principal avantage de la logique floue est qu'elle fournit une solution très efficace à des problèmes complexes car elle simule le raisonnement humain et la prise de décision. Ce qui nous aidera grandement à évaluer la priorité des utilisateurs de point de vue QoS.

Algorithme IV.1 Fuzzy Based Resource Allocation Cooperative Game for LTE SBS

Result : y_i
A is the matrix where we store expected QoS for all users of SBS : dim(A)=$S * U_s$
B is the matrix where we store achieved QoS for all users of SBS that are calculated according to [19] : dim(B)=$S * U_s$
FOR ALL users j of all SBS i
i) Calculate $GAP_{i,j} = A_{i,j} - B_{i,j}$ that will separate satisfied users from unsatisfied ones
ii) **END FOR**
*iii)***END FOR**
Classify and sort all unsatisfied users according to the fuzzy logic membership function for QoS priority. Denote it M_{fuzzy}
FOR ALL users j of all SBS i

i)$c = c + B_{i,j}$
ii)$B_{i,j} = 0$: Recollection of allocated subchannels from unsatisfied users in order to distribute them more appropriately
*iii)***END FOR**
*iv)***END FOR**
i=1, j=1
WHILE $((c > 0)$ or $(i < S)$ or $(j < U_s))$
i) **IF** user (i,j) $\in M_{fuzzy}$
i)a)$B_{i,j} = A_{i,j}$
*i)b)***END IF**
ii)a) i++
ii)b) j++
iii) **END** j=1 and k=1
WHILE $(j \leq |U_i'|)$
*i)***WHILE** $(B_{i,j} > 0)$
i)a) $y_{i,j} = j$
*i)b)*k++
*ii)***END**
iii) j++
END

4.3 Motivations d'application de la logique floue

Les ressources allouées entre WAP et SBS sont affichées dans le domaine temps-fréquence. Avec une bande passante sans licence, la bande passante de chaque canal est de 20 MHz et chaque appareil utilise une application avec une attente de QoS qui est spécifique au débit requis. Le débit attendu pour chaque nœud (SBS) est la somme des débits attendus minimaux pour l'ensemble des utilisateurs desservis par le nœud. Cependant, manquer de sous-canaux sans

licence constitue un problème majeur. En particulier concernant le réseau LTE-U. Sans parler des attentes de QoS des applications multimédias, elles sont de plus en plus utilisées au fil du temps, et les retards deviennent de moins en moins tolérés. Et le multi-jeu proposé par [33] ne résout pas ce problème particulier.

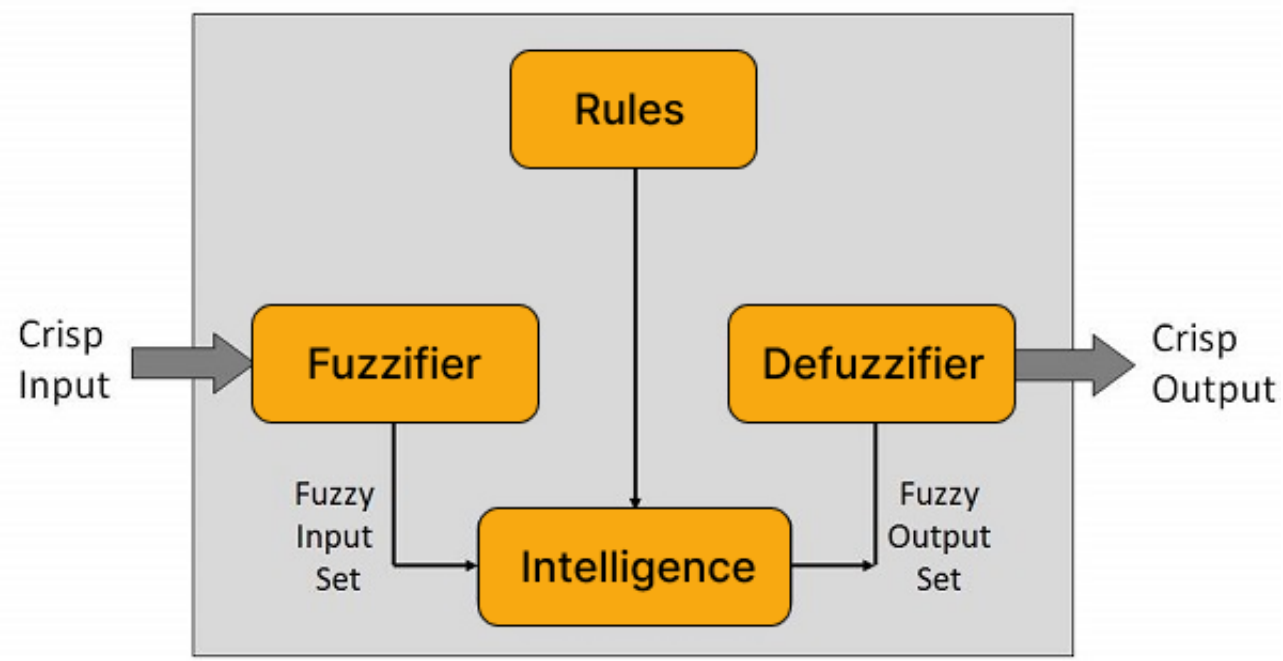

Figure IV.6 – Architecture de la logique floue

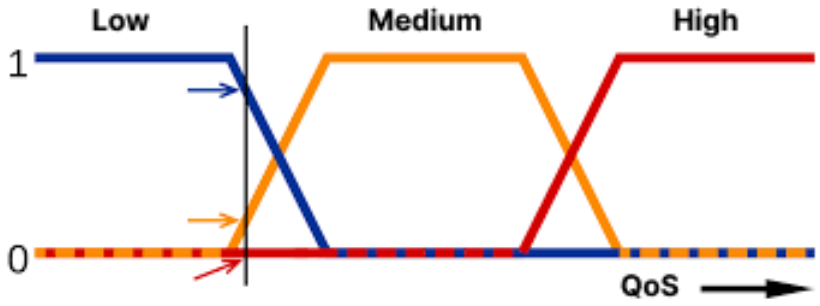

Figure IV.7 – Exemple de la logique floue(fuzzy logic)

4.4 Étapes de réallocations des ressources spectrales suivant la logique floue

Bien que le modèle de faillite (bankruptcy problem) aide à fournir un vecteur de récompense proportionné aux réclamations des joueurs, il ne répond pas toujours complètement à leurs

exigences minimales. En effet, notre modèle consiste à convertir les exigences QoS de débit de chaque utilisateur en un nombre correspondant de sous-canaux non-cloisonnés requis. Par exemple, si une application utilisée par un périphérique LTE-U a besoin d'un débit de données de 800 Kbps, ses sous-canaux sans licence requis sont de 800 Kbps divisés par la bande passante des sous-canaux sans licence 180 Kbps. Sur la base de ce modèle, le calcul du Nucleolus pour l'allocation des ressources ne sera pas suffisant pour résoudre le problème de la rareté. C'est pourquoi il a été jugé judicieux de redistribuer les sous-canaux non-cloisonnés restants entre les utilisateurs en fonction de deux paramètres : la disponibilité des ressources et la priorité des utilisateurs en QoS, comme décrit dans l'algorithme IV.1. Ces derniers paramètres seront évalués à l'aide de la logique floue qui classe les utilisateurs en 3 catégories : faible, moyen et élevé. La fonction d'appartenance utilisée pour cette classification est proportionnelle à la valeur des exigences minimales de QoS pour chaque application utilisée à ce moment précis. Afin d'atteindre l'objectif de coexistence entre le WiFi et la LTE-U dans une bande sans-licence, deux conditions doivent être remplies :

- Une allocation proportionnelle des ressources de sous-canaux non-identifiés entre la LTE et le WiFi.
- Une allocation de temps appropriée pour les deux technologies.

4.5 Évaluation des Rendements

Ici, nous évaluons les performances de la solution proposée en utilisant la simulation avec MATLAB. Il y a cinq SBS de CNO différents et cinq WAP répartis au hasard dans la zone conflictuelle d'un rayon de 150 m. Les utilisateurs de chaque SBS et WAP sont répartis de manière aléatoire dans la zone en conflit. Le réseau WiFi fonctionne sur la base du protocole IEEE 802.11n dans la bande 5 GHz avec mécanisme RTS / CTS. Les SBS fonctionnent également dans la même bande sans licence. Certains des paramètres WiFi sont les mêmes que [44] montrés dans le tableau IV.3 avec quelques autres paramètres nécessaires utilisés dans notre expérience.

Tableau IV.2 – Exigences de qualité de service des applications multimédias

Applications	Exigences Minimales (Kbps)
HD video streaming	800
Video conferencing	700
VoIP	512
Audio streaming	320

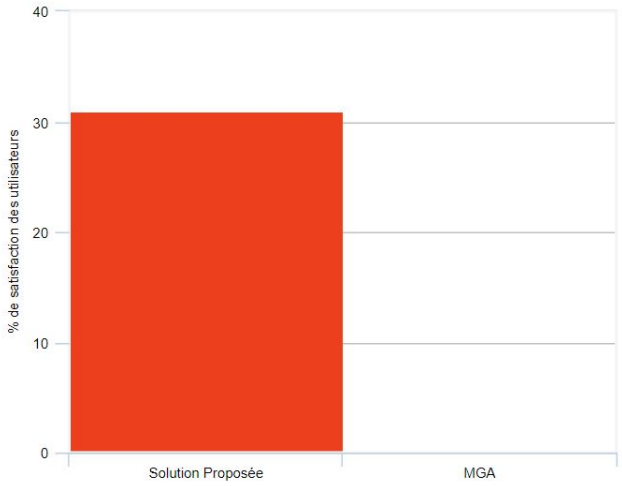

Figure IV.8 – Comparaison de satisfaction des utilisateurs LTE

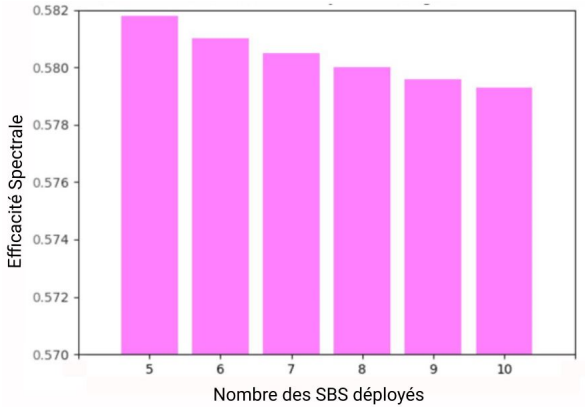

Figure IV.9 – Efficacité spectrale des utilisateurs WiFi grâce à notre approche

Nous supposons que les SBS utilisent SDL avec l'aide de CA lorsque la QoS des applications n'est pas satisfaite par le spectre sous licence.

Pour notre simulation, nous utilisons les exigences de QoS typiques des applications multimédias comme indiqué [50] dans le tableau IV.2.

Tableau IV.3 – Valeurs des paramètres de simulation

Symboles	Valeur	Symboles	Valeur
S	5	$\|U_i\|$, ∀i	50
B_l	180 kHz	$\|SCh_i^l\|$, ∀i	50
B_u	180 kHz	$\|SCh^u\|$	100
P_i^l , ∀i	21 dBm	P_i^u , ∀i	17dBm
σ^2	-114 dBm	G	-33.5dBV
W_w, ∀w	5	W	5
α	3		

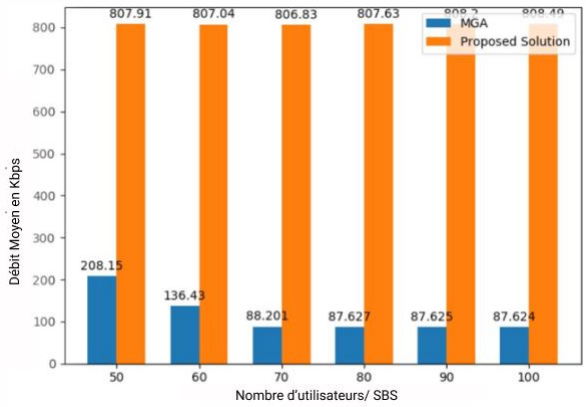

Figure IV.10 – Debits alloués aux utilisateurs LTE en fonction du nombre des SBS

La figure IV.8 illustre la comparaison du taux de satisfaction moyen des utilisateurs LTE, entre l'approche MGA et notre solution décrite dans ce chapitre. Nous avons comparé les deux approches en se basant sur les paramètres mentionnés dans le tableau IV.3. Quant aux utilisateurs, des valeurs d'exigences minimales en QoS ont été générées aléatoirement et basées sur les valeurs dans le tableau IV.2. Selon la figure, notre méthode permet une meilleure satisfaction des utilisateurs que l'approche MGA [51], avec 31% de satisfaction contre 0% pour MGA.

La figure IV.9 présente la variation de l'efficacité de canal pour le WiFi en fonction du nombre des SBS qui interfèrent ses points d'accès. Elle indique que, grâce à notre approche, l'efficacité spectrale en présence des SBS dépasse les 50%, même quand on augmente le nombre des SBS. On peut donc en conclure que l'approche de réallocation spectrale décrite dans cette partie a réussit à protéger les interets des utilisateurs WiFi, tout en respectant les QoS de ceux du LTE-U.

La figure IV.10 montre une comparaison entre les débits alloués par la MGA et ceux alloués par notre approche, en fonction du nombre d'utilisateurs par SBS. Les résultats présentent des

écarts importants entre les deux approches. En effet, notre approche garantit des débits alloués plus élevés que [51]. Avec un débit moyen alloué qui dépasse les 800 Kbps contre seulement 208.15 Kbps dans les meilleurs des cas pour la MGA. De plus l'augmentation du nombre des utilisateurs par SBS n'a fait que sensiblement varier le débit alloué moyen, contrairement à la MGA dont le débit alloué a chuté de 208.15 Kbps pour 50 utilisateurs par SBS, à seulement 87.624 Kbps pour 100 utilisateurs par SBS.

5 Réallocations des ressources spectrales en utilisant l'apprentissage automatique

5.1 Description de la solution

Le framework du double jeu est défini comme une combinaison de deux solutions basées sur la théorie des jeux de coalition. Chaque jeu sera appliqué à un niveau différent du réseau : le premier sera joué au niveau des SBS et le second au niveau des utilisateurs. Cependant, nous ne sommes pas en mesure de compter uniquement sur le double framework de jeu pour satisfaire les exigences de QoS des utilisateurs. En effet, nous aurons besoin d'un moyen de classifier ces utilisateurs en fonction d'un paramètre de priorité qui doit être défini au préalable. L'utilisation d'un classificateur d'applications est justifiée par la nécessité d'évaluer le débit requis des nœuds(SBSs) par leurs utilisateurs en lots : plus il y a d'utilisateurs qui utilisent des applications nécessitant un débit QoS élevé, plus le nœud qui dessert ces utilisateurs devient prioritaire. En particulier dans le contexte du multimédia, les solutions proposées dans la théorie des jeux ne fournissent les ressources nécessaires qu'à un nombre limité d'applications utilisateurs .
De ce fait, le framework du double jeu sera enrichi avec des réseaux de neurones artificiels (RNA), en particulier un perceptron multicouche. Ce RNA sera utilisé pour évaluer la priorité de chaque utilisateur : Les utilisateurs LTE-U seront évalués en fonction de leurs applications actuellement utilisées. Les utilisateurs qui exécutent des applications à haute qualité de service obtiendront une priorité plus élevée. Le framework proposé est inspiré de [50]. La différence est qu'au lieu d'utiliser la logique floue, nous utiliserons l'apprentissage automatique pour la classification des applications multimédias des utilisateurs et cela sera executée dans l'algorithme IV.2 . Le choix de l'apprentissage automatique comme alternative à [50] est justifié par le fait que les réseaux de neurones s'entraînent à partir d'un ensemble de données, alors que pour les systèmes flous, tout doit être défini explicitement [35].
Autre motivation derrière le choix du machine learning : il permet d'effectuer des prédictions.

Le système flou ne permet que de reconnaître des modèles bien définis, donc pas de prédictions possibles.

5.1.1 Perceptrons multicouches (MLP) et réseaux de neurones artificiels (RNA)

Un perceptron est un classificateur linéaire. Il classe l'entrée qui est généralement un vecteur de caractéristiques x multiplié par les poids w et ajouté à un biais b : $y = w * x + b$. Un perceptron produit une sortie basée sur plusieurs entrées traitées en formant une combinaison linéaire à l'aide de ses poids d'entrée. Il est présenté mathématiquement comme suit :

$$\text{y}=\psi(\textstyle\sum_{i=1}^{n} w_i x_i + b) = \psi(w^T x + b) \qquad \text{(IV.6)}$$

Où w désigne le vecteur des poids, x est le vecteur des entrées, b est le biais et ψ est la fonction d'activation non-linéaire. Ici, nous allons utiliser la fonction sigmoïde. Un perceptron multi-

User1	User2	User3	...	User49	User50	Time	Output
200	200	700		800	320	12:00:00 AM	Medium
512	512	512		320	320	12:01:00 AM	Medium
320	700	800		700	700	12:02:00 AM	High
320	320	512		512	512	12:03:00 AM	Medium
700	200	320		800	512	12:04:00 AM	High
800	320	512		700	320	12:05:00 AM	Medium
200	512	200		800	200	12:06:00 AM	Medium
800	320	200		512	320	12:07:00 AM	Medium

Figure IV.11 – MLP Dataset for each SBS

couche (MLP) est un RNA profond. Il se compose de plus d'un perceptron. Ils sont composés d'une couche d'entrée qui reçoit les données brutes, d'une couche de sortie qui prend une décision en fonction de l'entrée traitée, et entre ces deux, d'un nombre arbitraire de couches appelées "couches cachées" qui sont responsables des calculs de sortie. Les perceptrons multicouches sont utilisés pour résoudre le problème de la classification des priorités des utilisateurs LTE-U, qui sera modélisé comme un problème d'apprentissage supervisé : ils s'entraînent sur un ensemble de paires d'entrée-sortie et apprennent à conclure, de manière automatique, la corrélation entre les entrées et les sorties. Il y aura un MLP pour chaque SBS LTE .

Algorithme IV.2 Algorithme de Classification

1-Initialize the Network with nInputs,nHidden,nOutput
2- Calculate neuron activation for an input
3-Transfer neuron activation
4-Do a Forward Propagate(network,row)
5-Do a Backward Propagate and estimate the error(network,expected)
6-Update weights(network,row,learn-rate)
7-Train the network for a fixed number of epochs :TrainNetwork(network,row,learn-rate,nEpoch,nOutput,)
8-Make a prediction with the network
9-BackPropagation with Stochastic Gradient Descent
10-Predict the priority level :Predict(network,row)

En conséquence, chaque SBS sera classée en fonction de son niveau de priorité. Pour la phase de formation, un jeu de données sera utilisé pour chaque SBS. Ces ensembles de données contiennent toutes les informations sur le débit requis par chaque utilisateur en Kbps, en plus du niveau de priorité attribué à cette SBS à l'instant t. Chaque instant t est représenté par une ligne de données, comme le montre la figure IV.11. La couche d'entrée est définie comme les applications actuellement utilisées par l'utilisateur. Ces applications seront définies comme leur débit minimal requis en Kbps. La couche de sortie est représentée par les classes de priorité : ("Élevé", "Moyen", "Faible"). Nous utiliserons 2 neurones dans la couche cachée. Plusieurs ouvrages traitant des réseaux sans fil ont appliqué l'apprentissage automatique [19] pour résoudre certains des problèmes les plus liés aux réseaux. Cependant, parmi les algorithmes d'apprentissage automatique, nous avons choisi les réseaux de neurones car ils sont évolutifs par rapport à la classification linéaire, la SVM et les arbres de décision. Les réseaux neuronaux montrent une plus grande supériorité par rapport aux autres modèles même lorsque nous avons un grand nombre d'utilisateurs et des nœuds d'entraînement des données dans le réseau. Naturellement pendant la phase d'apprentissage, un ensemble étendu de lignes de données enregistrées fréquemment sera utilisé pour réaliser le processus de coexistence. La figure IV.12 montre clairement comment l'architecture de le RNA est utilisée pour évaluer les utilisateurs dans un contexte de priorité QoS. L'algorithme IV.1 montre également les étapes vers la classification du niveau de priorité de la SBS.

5.1.2 Solution du Bankruptcy

Les jeux coopératifs sont souvent analysés à travers le framework qui se concentre sur la détermination de la formation de coalitions entre les acteurs impliqués et les retombées col-

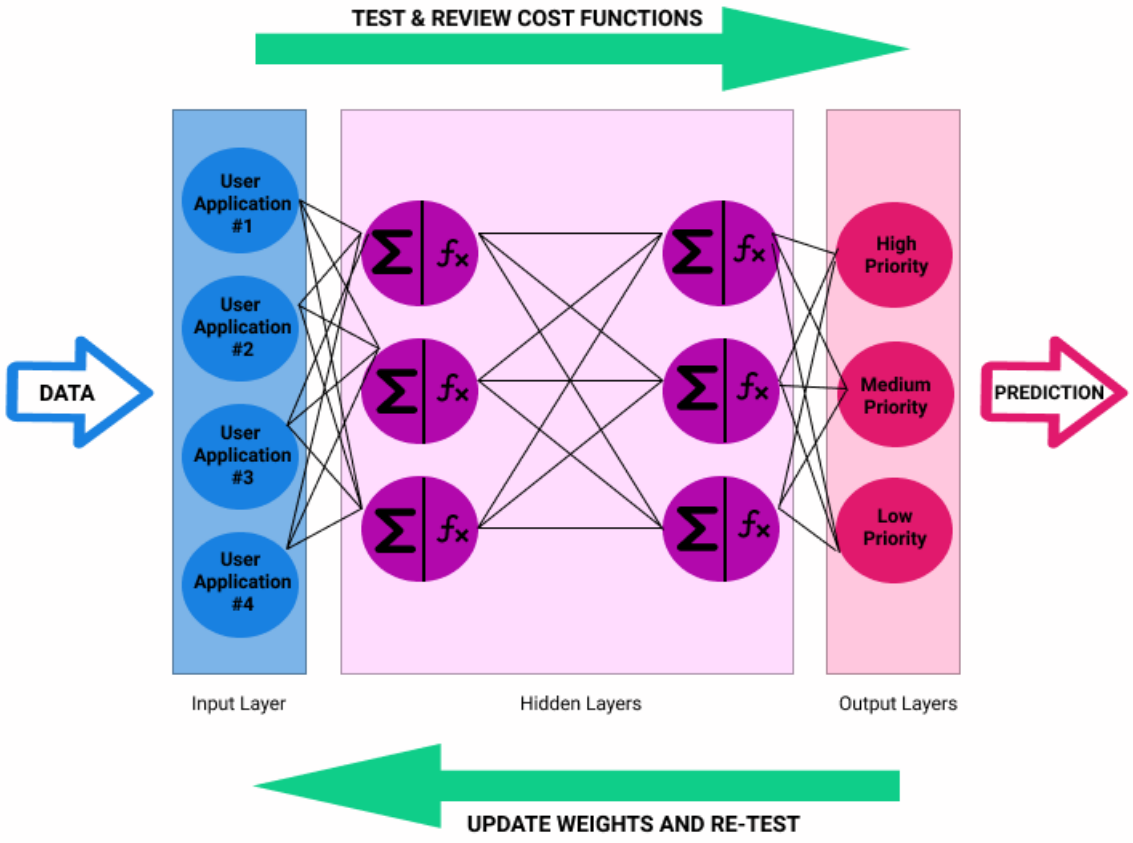

Figure IV.12 – Le framework du réseau de neurones étudié

lectives qui en résultent. Par opposition à la théorie des jeux compétitifs, qui est basée sur la détermination des actions individuelles des joueurs. Une solution au jeu coopératif peut être présentée sous le nom de "Nucleolus". La motivation de base derrière le concept de Nucleolus est que, dans un jeu (N, v) à utilité transférable, on peut fournir une allocation qui réduit le mécontentement des joueurs par rapport à l'allocation reçue appelée "récompense". N est le nombre de joueurs et v est la fonction caractéristique du jeu à partir de laquelle la solution d'allocation sera trouvée dans [52]. Pour une coalition S, l'insatisfaction d'une allocation $x \in IR^n$ est mathématiquement définie comme l'excès $e(x, S) = v(S) - \sum_{j \in S} x(j)$. Un vecteur d'allocation x représentera la solution de Nucleolus. La figure IV.13 illustre la solution Nucleolus, pour un jeu de coalition utilitaire transférable à 3 joueurs, en prenant comme exemple 3 cas de figure différents à chaque tour du jeu, respectivement 100, 200 et 300. Notre double jeu de coalition est expliqué comme suit :

- Jeu de niveau macro : joué par les SBS LTE-U, où les sous-canaux sans licence K_u

représentent le "domaine". Nous allons résoudre le problème de la faillite(bankruptcy) en utilisant le Nucleolus.

- Jeu de niveau micro : il se passe à l'échelle du réseau LTE-U . Dans ce jeu, les joueurs sont les appareils des utilisateurs de cette SBS, dont les exigences de QoS seront traduites par des "revendications", et le "domaine" sera le nombre de sous-canaux disponibles sans licence alloués à partir du jeu de niveau macro décrit ci-dessus. La solution sera également présentée comme le Nucleolus du problème de la faillite.

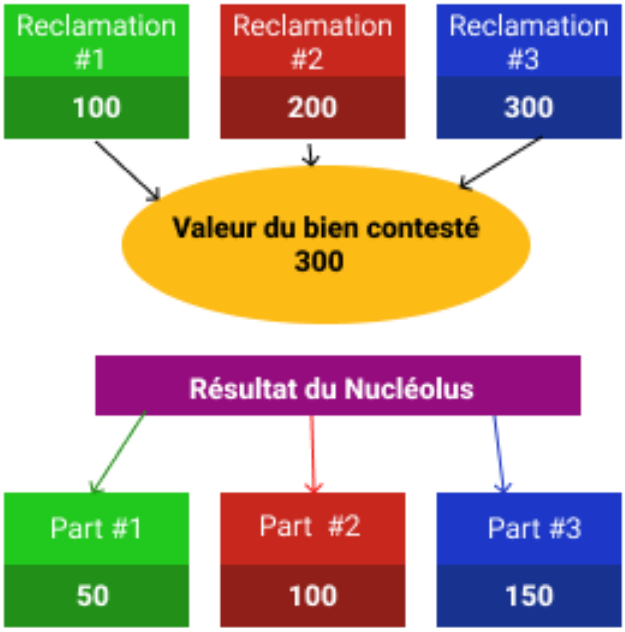

Figure IV.13 – Illustration de calcul du nucléolus pour trois joueurs

5.1.3 Réallocation des ressources à l'aide du Machine Learning

Malheureusement, le modèle de faillite ne remplit pas toujours complètement les exigences minimales des utilisateurs mobiles [50], même s'il permet de fournir un vecteur de récompense proportionné aux revendications de chaque SBS. En effet, notre modèle consiste en la conversion des exigences QoS de débit de chaque utilisateur en un nombre correspondant de sous-canaux sans licence requis. En conséquence, une allocation des ressources basée uniquement sur le calcul du Nucleolus ne sera pas suffisante pour résoudre les problèmes de rareté des ressources. Pour cette raison, il est nécessaire de redistribuer les sous-canaux non-licenciés restants, entre les

utilisateurs selon deux paramètres : la disponibilité de la ressource et la priorité des utilisateurs en QoS, qui sera évaluée à l'aide des "perceptrons multicouches" qui classent les utilisateurs en 3 groupes de priorité : "faible", "moyen" et "élevé". Pour atteindre l'objectif de coexistence entre le WiFi et la LTE dans la bande sans licence, deux conditions doivent être remplies :

- L'allocation des ressources du sous-canal sans licence entre LTE et WiFi doit être proportionnée.
- Les technologies WiFi et LTE-U devraient bénéficier d'une allocation de temps appropriée.

Si nous voulons maximiser R_i pour chaque SBS i ∈ S, cela supprimera les performances des utilisateurs WiFi. Comme les intervalles de temps globaux sur le spectre sans licence sont limités, il est impossible de maximiser les avantages des deux systèmes simultanément [37]. Nous souhaitons un résultat symbiotique pour les utilisateurs LTE-U et WiFi. Nous avons besoin d'une allocation temporelle optimale de τ pour correspondre aux attentes des deux systèmes [50]. Par conséquent ∀ i ∈ SBS on reformule le problème :

$$\begin{aligned} & max_{\tau}\left\{R_S, R_w\right\} \\ s.t. & R_{w,v}^{min} \leq R_{w,v}(\tau) \leq R_{w,v}^{max} \\ & \tau_0 \leq \tau \leq 1 \end{aligned} \tag{IV.7}$$

Avec

$$\mathrm{R}_S = \textstyle\sum_{i \in S} \sum_{j \in U_i} R_{i,j} \ , \ R_w = U_w . R_{w,v} \tag{IV.8}$$

Et τ_0 est la fraction du time slot nécessaire pour maintenir $R_{w,v}^{min}$, $\forall v \in U_w$ quand les SBS s'abstiennent de l'utilisation du spectre sans licence.

A présent le système d'équations ci-dessus est un problème multi-objectifs qui est résolu en détail dans [43]. C'est un système à partir duquel l'attribution idéale du time slots pour un ensemble donné de WAP et des SBS est :

$$\tau* = \begin{cases} (1/2) + \frac{R_{w,v}^{min}}{2.R_{w,v}^{max}} & if \mid S \mid \geq 1 \\ 1 & Otherwise \end{cases} \tag{IV.9}$$

En cas d'absence d'SBS à proximité de la zone d'interfèrence avec les WAP alors :

$R_{w,v}^{min}$ and $R_{w,v}^{max}$ seront les mêmes. Par suite, $\tau* = 1$.
Dans notre cas, nous disposons d'un ensemble d'utilisateurs U_i' qui ne sont pas satisfaits, un nombre de sous canaux sans licence $\mid C_i^u \mid$, ainsi que les attentes en sous-canaux pour subvenir à leurs besoins en QoS.

5.2 Évaluation et discussion des performances

Nous évaluons les performances de notre double framework de jeux de coalition, en utilisant une simulation implémentée à la fois en Octave et en Python. Alors que nous avons utilisé Octave pour évaluer les résultats de la simulation de la théorie des jeux, nous avons employé Python pour simuler l'algorithme d'apprentissage automatique. Il existe 5 SBS de CNO différentes et 5 WAP répartis au hasard dans la zone brouilleuse d'un diamètre de 300 mètres. Idem pour les utilisateurs de chaque nœud (SBS et WAP). Le réseau WiFi fonctionne sur la base du protocole IEEE 802. 11n dans la bande 5 GHz avec la technique RTS / CTS.

Certains des paramètres WiFi sont les mêmes que [53] montrés dans le tableau IV.1, le tableau IV.2 et le tableau IV.3, avec quelques autres paramètres nécessaires utilisés dans notre expérience. Pour notre simulation, nous reprenons les exigences de qualité de service typiques des applications multimédias[54] comme dans le tableau IV.2. Le réseau sera formé pendant 6 "epoches" avec un taux d'apprentissage de 0,5. Le réseau utilisera l'optimiseur Adam.

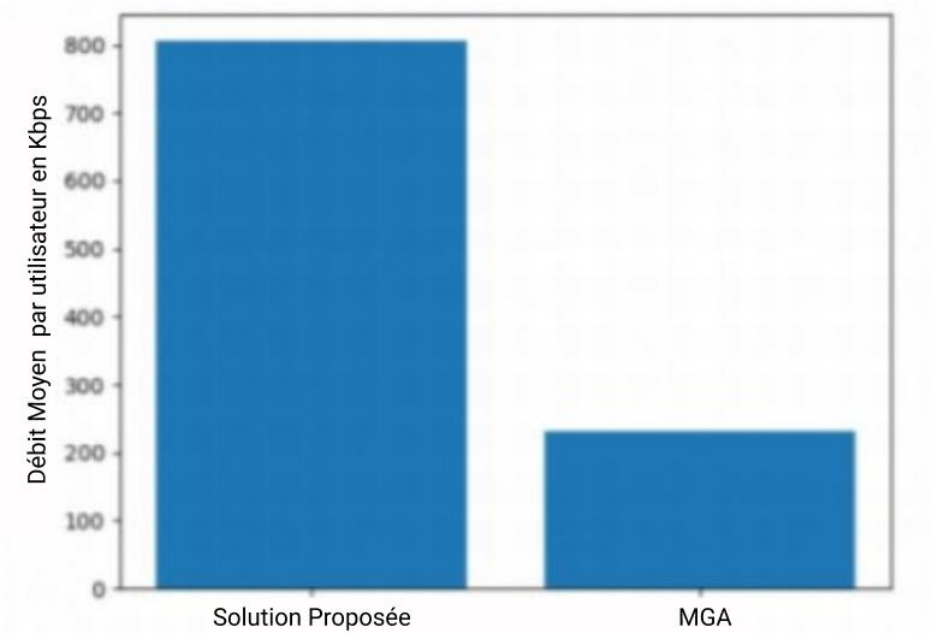

Figure IV.14 – Comparaison des débits moyens par utilisateur atteints

On suppose que les réseaux utilisent plus d'une application par appareil. Les résultats montrent que notre solution actuelle répond plus précisément (environ 92%) que l'approche décrite dans [50], qui a une précision de 76%. Cela est dû au fait que l'apprentissage automatique est plus adapté pour fournir des scénarios d'allocation sans aucune implémentation prédéfinie. Alors que le système flou n'est efficace que si les réseaux suivent un scénario d'utilisation spécifique.

Figure IV.15 – Comparaison des indicateurs de Jain

Dans la figure IV.14, nous manifestons la comparaison du taux moyen atteint par utilisateur entre différentes méthodes. La figure montre que le débit atteint de la méthode proposée est supérieur à celui généré par l'approche MGA (Multi-Game Approach) [51]. Le MGA produit environ 232,63 Kbps de débit moyen atteint par utilisateur, alors que notre approche produit environ 805,39 Kbps.

Dans la figure IV.15, nous présentons la comparaison de l'équité Jain dans les cas de la méthode proposée et MGA avec le nombre divergeant de SBS. Il montre que l'indice Jain de la méthode proposée est de 0,28072, ce qui est supérieur à MGA, dont l'indice Jain est de 0,08. Ceci montre que notre approche est bien plus équitable que la MGA en termes de satisfaction des utilisateurs LTE-U moyens.

La figure IV.16 montre les performances du réseau neuronal utilisé pour la classification de l'application de l'appareil. Après quelques "epoches", la valeur d'erreur d'apprentissage est réduite à environ 0,078. Lorsque nous comparons le framework actuel aux travaux de [50] pour les performances de précision, nous trouvons les résultats dans le tableau IV.2. Dans cette simulation, nous avons testé la précision avec laquelle chaque framework classe la qualité de service des utilisateurs dans des situations plus incertaines comme lors du changement des demandes des applications en QoS ou encore les distances entre les utilisateurs et leurs SBS

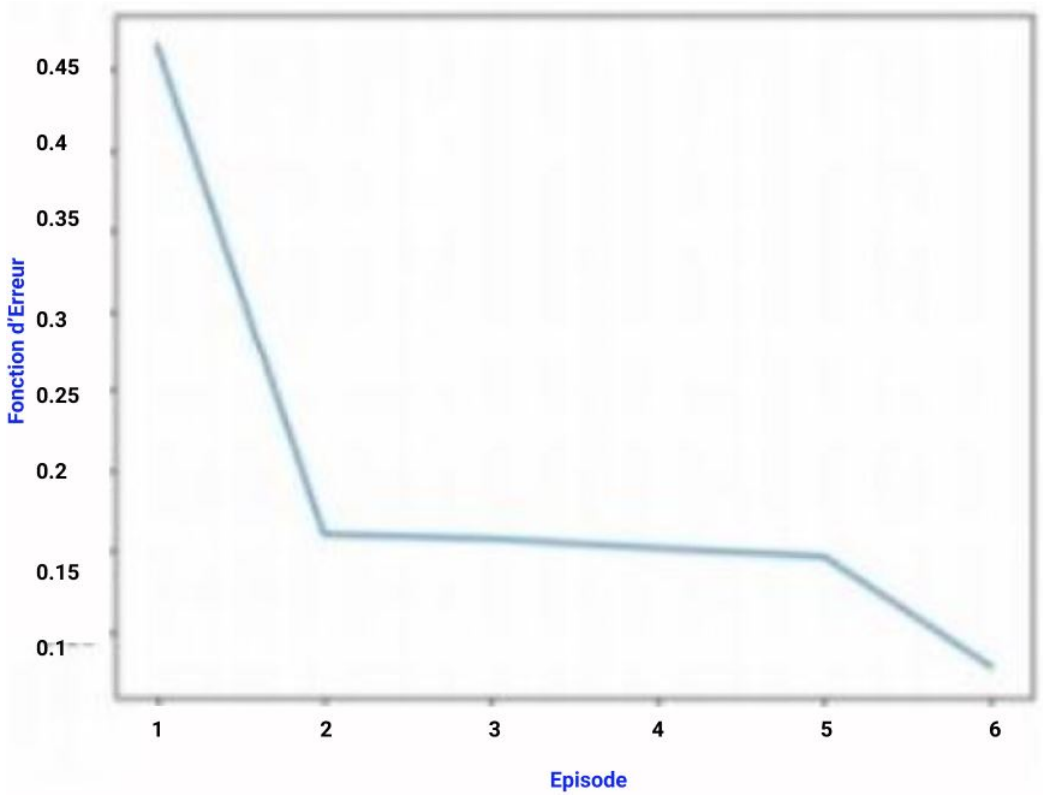

Figure IV.16 – Évolution de la fonction d'erreur d'apprentissage en fonction des "epoches"

correspondants.

6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé de répondre aux exigences de QoS des utilisateurs en augmentant le spectre sans licence avec un spectre sous licence dans le LTE-U après avoir réglé le problème de coexistence avec les WAP. Nous avons résolu ce problème de coexistence et trouvé une solution de forme fermée en utilisant le jeu coopératif double fuzzifié. Les résultats de la simulation montrent que l'approche proposée peut fournir un meilleur taux par utilisateur atteint, l'équité que la méthode [50]. De plus, cette approche protège bien mieux les utilisateurs WiFi que la LBT de base.

CHAPITRE V

GÉNÉRATEUR DE POLY-JEUX BASÉ SUR L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE POUR LA COEXISTENCE WIFI / LTE

Le cinquième chapitre détaille le principe, ainsi que l'implémentation du poly-jeux, dont les constituants ont été décrits dans les chapitres précédents. Nous allons expliquer l'équilibre de Nash, puis nous explicitons les outils algorithmiques utilisés pour l'implémentation du poly-jeux : ce dernier est fondé sur l'automatisation de prise de décision des répartition de l'allocation temporelle et spectrales. En effet, le poly-jeux a pour finalité principale la garantie de flexibilité des réseaux sans fil hétérogènes, en particulier le WiFi/LTE-U, de manière à ce que leurs utilisateurs puissent enfin s'adapter aux différentes contraintes liées aux configurations initiales, que ce soit au niveau des ressources disponibles, ou bien au niveau des utilisateurs et/ou des WAP/SBS elles-mêmes.

1 Les jeux de négociations de Nash

1.1 Definition

Le jeu coopératif de négociation de Nash est un jeu à l'issue duquel les joueurs choisissent leur stratégie de partage de l'excès d'un bien. Cela peut constituer un problème dit "de négociation". Toute solution de négociation de Nash doit respecter les cinq principes suivants : l'optimalité

de Pareto (PAR) et et la symétrie (SYM) qui aident à la convergence vers un seul problème de négociation. L'indépendance des représentations d'utilité attendues (INV) , l'indépendance des alternatives non pertinentes (IIA) et la rationalité individuelle (IR) .

1.2 Description formelle

Soit F un ensemble dit "ensemble de faisabilité", inclus dans $\mathbb{R}^2$. Si on suppose qu'on a deux joueurs dans un jeu de négociation, on pose $d = (d_1, d_2)$ qui représente le désaccord entre le joueur 1 et le joueur 2, avec d_1 et d_2 leurs gains respectifs dans le pire des cas où aucun accord entre les deux n'a eu lieu.

Chaque problème de négociation admet une solution qui choisit un accord noté ϕ dans F

1.2.1 Ensemble de faisabilité(viabilité)

Un accord viable comprend généralement toutes les actions de collaboration possibles qui mènent à un ensemble de viabilité qui comprend tous les avantages possibles. Souvent, l'ensemble des possibilités se limite à n'inclure que les récompenses qui peuvent être meilleures pour les deux agents que les points d'inadéquation.

1.2.2 Les points de désaccord

On sait que d est la valeur à laquelle le joueur peut s'attendre si la négociation échoue. Cela pourrait être l'équilibre de concentration auquel les deux joueurs pourraient s'attendre. Cela a un impact direct sur la solution négociée. Cependant, il n'est pas surprenant que chaque joueur essaie de choisir une stratégie afin de maximiser la position de négociation. Pour atteindre cet objectif, il est souvent avantageux d'augmenter l'acquisition des écarts d tout en nuisant aux conséquences de l'écart de l'adversaire (d'où l'interprétation comme une menace d'écarts). Si on considère une menace comme une action, on peut construire un jeu séparé où chaque joueur choisit la menace et reçoit des récompenses en fonction du résultat de la négociation. C'est ce qu'on appelle le jeu à menace variable de Nash.

1.3 Analyse de l'équilibre

Les stratégies sont représentées dans le jeu par une paire *(x, y)*. Où x et y sont choisis dans l'intervalle *[d, z]*, où d est le désaccord et z est la quantité totale du bien. Si $x + y$ est égal ou inférieur à z, le premier joueur obtient x et le deuxième joueur obtient y. Sinon, les deux obtiennent d. Dans la plupart des cas, $d = 0$.

Les jeux de négociation de Nash ont de nombreux équilibres de Nash. Tous les x et y de $x + y = z$ sont l'équilibre de Nash. Si l'un des joueurs augmente la demande, les deux joueurs n'obtiendront rien. Si l'un d'eux réduit sa demande, il reçoit moins que s'il demandait x ou y. Il existe également un équilibre de Nash où les deux acteurs exigent le maximum. Ici, les deux joueurs n'obtiennent rien, mais aucun des deux joueurs ne peut augmenter ses rendements en modifiant unilatéralement sa stratégie.

Dans le jeu alternatif de négociation d'offres de Rubinstein [17], les joueurs agissent à tour de rôle en tant que "clients" pour partager un surplus. La distribution du surplus dans l'équilibre parfait unique du sous-jeu dépend de la façon dont les joueurs préfèrent les gains actuels aux gains futurs. En particulier, soit d le facteur d'actualisation, qui fait référence au taux auquel les joueurs actualisent les gains futurs. En d'autres termes, après chaque étape, le surplus vaut d fois ce qu'il valait avant. Rubinstein [17] a montré que lorsque l'excès est normalisé à 1, le gain pour le joueur 1 à l'équilibre est de *1 / (1 + d)*, tandis que le gain pour le joueur 1 est de *2 d/(1+d)*.A la limite, lorsque les joueurs deviennent parfaitement patients, la division d'équilibre converge vers la solution négociée de Nash.

1.4 Formulation mathématique

Nash a prouvé que les solutions satisfaisant ces axiomes sont exactement les points (x, y) dans F qui maximisent l'expression V.1 :

$$(\text{u (x) -u (d)}) (\text{v (y) -v (d)}) \qquad \text{(V.1)}$$

Où u et v sont les fonctions d'utilité du joueur 1 et du joueur 2, respectivement, et d représente un désaccord. Autrement dit, les joueurs se comportent comme s'ils cherchaient à maximiser *(u(x) - u(d))(v(y) - v(d))*, où *u(d)* et *v(d)*, restent tels quels (l'utilitaire obtenu si l'on décide de ne pas négocier avec l'autre joueur). Le produit des deux utilitaires en excès est supplémentaires est communément appelé le produit Nash. Intuitivement, la solution consiste à ce que chaque joueur obtienne son gain de statu quo (c'est-à-dire un gain non-coopératif) en plus d'une part des avantages découlant de la coopération.

1.5 Autres Approches de négociation

1.5.1 Solution de négociation Kalai-Smorodinsky

L'indépendance des choix non pertinents peut être remplacée par un axiome de monotonie des ressources. C'est ce qu'ont montré Ehud Kalai et Meir Smorodinsky [55]. Cela conduit à la solution de trading Kalai-Smorodinsky. L'objectif étant de maintenir un gain maximum. Donc, si on normalise le problème à (0,0), le joueur 1 ne peut obtenir qu'un maximum de g_1 avec l'aide du joueur 2 (et vice-versa pour g_2), alors la solution de négociation Kalai-Smorodinsky donnerait le point ϕ sur la frontière de Pareto tel $\phi_1/\phi_2 = g_1/g_2$.

1.5.2 Solution de négociation égalitaire

La solution de négociation égalitaire, proposée par Ehud Kalai [55], est une solution qui élimine la condition d'invariance d'échelle tout en incorporant à la fois l'axiome d'indépendance des alternatives non pertinentes et l'axiome de monotonie des ressources. C'est la solution qui essaie de donner un profit égal aux deux parties. En d'autres termes, il s'agit de maximiser le paiement minimum entre joueurs. Kalai déclare que cette solution est étroitement liée aux idées égalitaires de John Rawls.

2 Les jeux compétitifs répétitifs

2.1 Definition

Dans la théorie des jeux, un jeu répétitif une grande forme de jeu qui consiste en une série de répétitions d'un jeu de base (appelé jeu de scène). Les jeux de scène sont l'un des jeux à deux joueurs les plus étudiés en général. Les jeux répétitifs capturent l'idée que les joueurs doivent considérer l'impact des actions en cours sur les actions futures des autres joueurs. Cet effet est parfois appelé "réputation". Le jeu en une étape ou le jeu en un coup est le nom d'un jeu répétitif.

3 Description du Framework

3.1 Description du Modèle

Les opérateurs de réseaux cellulaires déploient de plus en plus de SBS pour améliorer les services sans fil aux utilisateurs. Cette nature ultra dense des SBS de différents opérateurs risque

d'entrer en conflit les uns avec les autres et également avec les WAP locaux s'ils souhaitent opérer dans le même spectre sans licence. Nous étudions un scénario avec des SBS et des WAP multi-opérateurs comme indiqué dans la figure V.3., reprise de [56]. Ce scénario de déploiement dense consiste en un ensemble de SBS LTE-A bimodes (à la fois dans le spectre sous licence et sans licence) exploités par différents CNO et un ensemble de points d'accès WiFi sans chevauchement. Les SBS et les WAP fonctionnent dans la même bande au-delà de la fréquence 5 Ghz et ils sont impliqués dans les opérations de liaison descendante. Chaque SBS utilise principalement des sous-canaux sous licence pour servir ses utilisateurs et fonctionne en mode de liaison descendante supplémentaire (SDL) avec la technologie CA. Les détails des symboles utilisés dans ce document peuvent être trouvés dans le tableau V.1.
Tous sont des joueurs LTE-U dans un poly-jeu généré par notre solution, qui modélisera notre problème actuel de coexistence LTE-U/WiFi. Le scénario de déploiement comprend des SBS LTE qui fonctionnent de manière bimodale S et des points d'accès WiFi sans chevauchement. Entouré d'utilisateurs U_l LTE et d'utilisateurs U_w WiFi pour chaque point d'accès SBS et WiFi respectivement. Chaque SBS i possède K_l^i sous-canaux orthogonaux sous licence de bande passante uniforme notée B_l. Les SBS et les WAP fonctionnent dans la même bande sans licence. Le canal sans licence est beaucoup plus large qu'un sous-canal sous licence, et le système LTE fonctionne de manière centralisée, de sorte que chaque SBS divise ce canal sans licence en sous-canaux K_u avec une bande passante B_u chacun. Pour une transmission fiable des signaux de contrôle de la SBS à l'utilisateur, chaque SBS alloue au moins un sous-canal sous licence à son utilisateur LTE-U actif. Nous supposons qu'un sous-canal peut être alloué à un maximum d'un seul utilisateur LTE-U. Les SBS fonctionnent en mode liaison descendante supplémentaire (SDL) avec la technologie CA. La LTE utilise l'accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence (OFDMA) dans la couche physique, et une fois sur la même bande que le WiFi, la dégradation des performances du WiFi est élevée par rapport au LTE-U. Parce que la technologie LTE est "égoïste" quant à la consommation de ressources, elle empêchera le WiFi d'accéder correctement aux canaux.

3.2 Réseaux de neurones artificiels (RNA)

L'utilisation la plus courante de l'RNA est celle d'une approximation de fonction aléatoire. Avec de tels outils, on peut avoir une méthode rentable pour trouver les solutions qui définissent la distribution. Notre réseau de neurones comporte trois couches essentielles :

1- Couche d'entrée : la première couche d'un réseau de neurones qui reçoit les informa-

tions d'entrée et les envoie traitées à la couche cachée. Dans notre cas, la couche d'entrée est présentée par un vecteur X (X_1,X_2,X_3,X_4), chaque X_i présente, respectivement, le nombre de SBS LTE, le nombre de canaux disponibles sans licence, LTE-U somme de débit attendue, nombre de WAP.

2- Couche cachée : ces couches cachées effectuent divers types de calculs mathématiques sur les données d'entrée et reconnaissent les modèles qui en font partie. Les données provenant de la première couche passent par des transformations appelées "Feedforwarding", qui se font en deux parties. La première partie consiste à calculer le produit scalaire entre le vecteur d'entrée et le vecteur de poids qui a été initialisé par des valeurs aléatoires, celui ajouté avec une constante appelée "biais". La deuxième partie consiste à faire passer la sortie par une fonction d'activation. Nous choisirons la fonction sigmoïde, la plus couramment utilisée dans les RNA : $f(x) = \frac{1}{1+e^{-(x)}}$

3-Couche de sortie : c'est là que l'on obtient les calculs effectués par la couche cachée. Une fois la sortie calculée, on passe à la phase de rétropropagation. La première étape de la rétropropagation consiste à trouver l'erreur, qui est trouvée en calculant la différence entre la sortie attendue et le résultat trouvé. Nous utiliserons l'erreur quadratique moyenne ou la fonction de coût MSE. Une fonction de coût est une fonction qui trouve le coût des prédictions de sortie données.

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{1}^{n}(\hat{Y}_i - Y_i)^2 \tag{V.2}$$

Afin que nous puissions "enseigner" des données à un réseau de neurones, nous lui fournissons des exemples de mappages d'entrée/sortie. La figure V.2 illustre un exemple simple du fonctionnement des RNA. Une fois la formation terminée, le réseau de neurones sera testé là où les mappages n'ont pas été fournis. Il prédit la sortie et nous utilisons des fonctions d'erreur pour évaluer dans quelle mesure la sortie est correcte. Enfin, en se basant sur le résultat, le modèle met à jour les poids des réseaux de neurones artificiels pour optimiser le réseau en utilisant la technique de "descente de gradient". Les nouvelles valeurs de poids et le biais dépendront des minima de la fonction de coût, et la "descente de gradient" peut être représentée mathématiquement par :

$$\breve{W}_x = W_x - a(\frac{\partial Error}{\partial W_x}) \tag{V.3}$$

Où a est le taux d'apprentissage, $\frac{\partial Error}{\partial W_x}$ est la dérivée de l'erreur par rapport au poids, W_x est l'ancien poids et $\breve{W}_x$ est le nouveau poids.

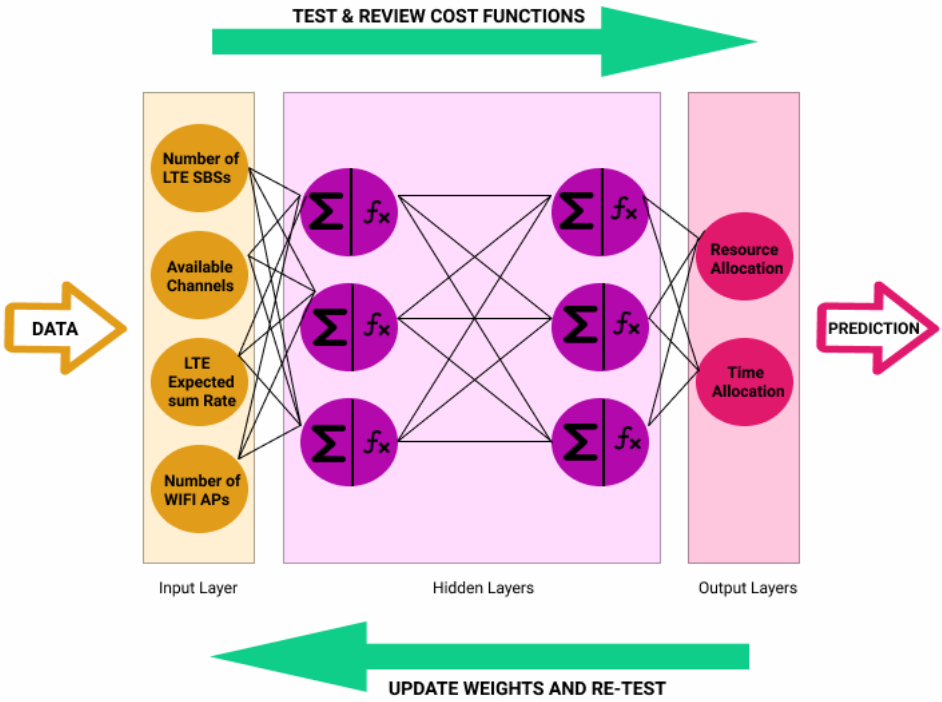

Figure V.1 – L'architecture de réseau de neurones artificiels

Figure V.2 – Illustration du modèle

3.3 Principes du poly-jeux

Dans cette section, nous proposons le framework d'un générateur poly-jeux comme nouvel outil adapté pour capturer les interactions inter-réseaux et intra-réseaux entre les réseaux LTE et les

réseaux WiFi. Un poly-jeux G est un jeu composé de plusieurs jeux interdépendants $G = G_1, \ldots, G_N$.
Chaque jeu G_i modélise un problème de gestion des ressources spécifique au niveau du WiFi, ou au niveau de la LTE. les poly-jeux générés par notre approche peuvent être définis par trois paramètres : les joueurs, les actions et la fonction d'utilité.
Les acteurs peuvent être des SBS ou des WAP, chacun étant associé à un ensemble d'actions parmi lesquelles il peut choisir sa stratégie. L'objectif naturel de chaque acteur est de choisir la stratégie qui maximise une fonction d'utilité qui correspond à son objectif dans le réseau.

Par exemple, les SBS visent à maximiser le débit alloué à leurs utilisateurs sur les bandes sans licence. D'un autre côté, sur la base du "Best service", les réseaux WiFi préfèrent fournir un maximum de ressources, sans être interférés par les SBS LTE-U. le framework de jeu poly-jeux défini pour LTE-U a deux propriétés clés :

1)Dynamique : les solutions classiques basées sur les jeux pour la coexistence LTE/WiFi dans des bandes sans licence sont basées sur des approches de théorie des jeux statiques. Ce qui signifie qu'un seul jeu statique est utilisé pour tous les types de réseaux sans fil, quels que soient les différents paramètres du réseau (nombre de SBS interférentes, nombre de WAP, nombre de canaux disponibles sans licence...). Au contraire, la solution que nous proposons est basée sur un réseau de neurones. Ce qui signifie que l'approche consiste à prédire le jeu le plus approprié pour modéliser n'importe quel réseau. Cela fournit une solution plus flexible à un environnement de réseau sans fil qui peut potentiellement changer en termes de nombre de nœuds SBS / WAP, de sous-canaux disponibles sans licence et des exigences de qualité de service des utilisateurs du réseau en termes de débit.

2) Interdépendance : outre son caractère dynamique, notre approche affiche une interdépendance entre les jeux prédits. En effet, pour une bonne coexistence entre WiFi et LTE dans les bandes sans licence, deux conditions doivent être remplies :

- Allocation de canal : une allocation de ressources proportionnée de sous-canaux non-cloisonnés entre la LTE et le WiFi.
- Allocation de temps : pour parvenir à la coexistence, les SBS LTE-U doivent s'abstenir d'accéder au spectre sans licence pendant une période de temps τ, ce qui correspond au temps nécessaire aux WAP pour fournir des ressources pour les besoins en qualité de service de leurs utilisateurs.

Ces deux conditions sont interdépendantes, puisque la portion de temps τ dépendra du débit

alloué et vice-versa. Par conséquent, les jeux qui modélisent les deux niveaux d'allocation seront également interdépendants. La figure V.1, reprise de [56] illustre comment le framework sélectionne un jeu pour chaque type d'allocation (spectrale et temporelle), en fonction de l'état actuel des paramètres du réseau. Ces paramètres ont été choisis en fonction du fait qu'ils ont un impact sur la satisfaction de l'utilisateur WiFi vis-à-vis de l'accès à la bande des 5GHz. Pour l'attribution des canaux, les joueurs, qui seront les SBS LTE, joueront soit au "jeu de la faillite", soit au "jeu de correspondance unilatéral".

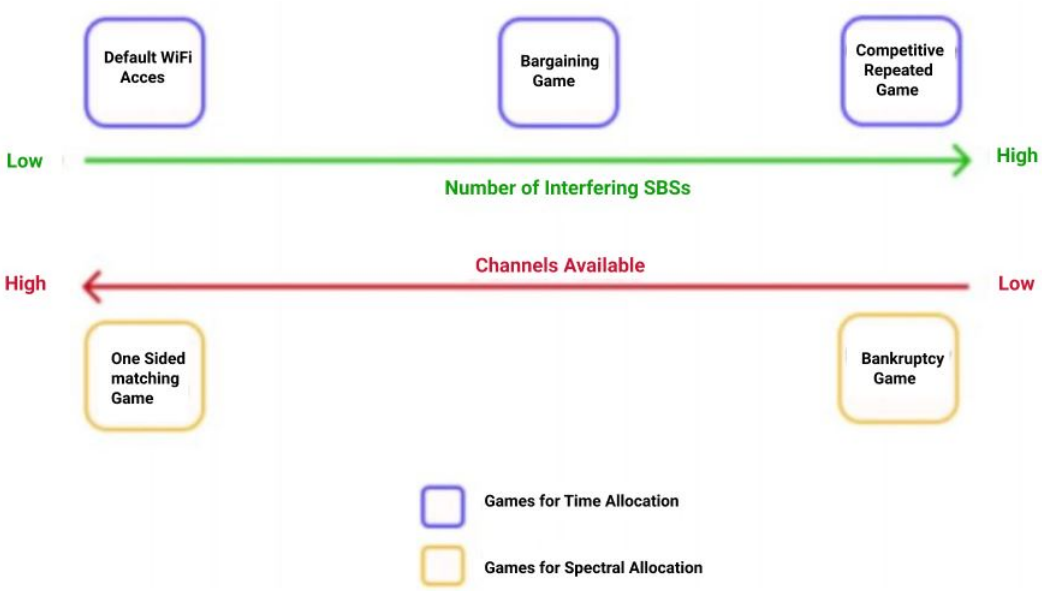

Figure V.3 – Illustration du poly-jeux

Le premier jeu sera joué lorsque les exigences de QoS des utilisateurs LTE-U dépassent les ressources disponibles sans licence, sinon ce sera le "jeu de correspondance unilatéral" qui sera joué. Pour l'allocation temporelle, trois jeux seront proposés, et chacun d'eux sera également choisi en fonction du nombre actuel de SBS LTE-U qui interfèrent avec les WAP : s'il n'y a pas de SBS dans le réseau, les WAP peuvent accéder les bandes sans licence librement, comme démontré dans la section précédente. Sinon, et en fonction de la proportion SBS LTE-U / WAP, le jeu de négociation ou le jeu compétitif répété sera joué par les WAP.

4 Évaluation et discussion des performances

Ici, nous évaluons les performances de notre framework de générateur de poly-jeux proposé en utilisant la simulation avec MATLAB. La simulation est composée de deux parties : la phase d'apprentissage et la phase de test.

Tableau V.1 – Notations

Symboles	Significations
S	Ensemble de SBS avec S éléments
W	Ensemble de WAP sans chevauchement avec des W éléments
U_i	Ensemble d'utilisateurs associés à SBS i
U_w	Ensemble d'utilisateurs actifs Uw associés au WAP w
C_i^l	Ensemble de sous-canaux sous licence de SBS i
C_i^u	Ensemble de sous-canaux sans licence de SBS i
B_l	Bande passante de chaque sous-canal sous licence
B_u	Bande passante de chaque sous-canal sans licence
Pl_i	Puissance de transmission de SBS i pour chaque utilisateur dans le spectre sous licence
Pu_i	Puissance de transmission de SBS i pour chaque utilisateur dans le spectre sans licence
x_i	Vecteur d'allocation des ressources pour SBS dans le spectre sous licence
y_i	Vecteur d'allocation des ressources pour SBS dans le spectre sans licence
$\|h_{i,j}\|^2$	Gain de canal entre AP i et récepteur j
G	Facteur de gain de puissance constant
α	Exposant de perte de chemin
$QoS_{i,j}$	Exigence de QoS de l'utilisateur j associée à SBS i
τ	Fraction de temps que les SBS partagent avec les WAP

Tableau V.2 – Exigences de qualité de service des applications multimédias

Applications	**Exigences Minimales (Kbps)**
HD video streaming	800
Video conferencing	700
VoIP	512
Audio streaming	320

Tableau V.3 – Valeurs des paramètres de simulation

Symboles	Valeur	Symboles	Valeur
S	5	$\|U_i\|$, ∀i	50
B_l	180 kHz	$\|C_i^l\|$, ∀i	50
B_u	15 kHz	$\|C^u\|$	1200
P_i^l , ∀i	19 dBm	P_i^u , ∀i	17dBm
σ^2	-174 dBm	G	-33.5dBV
U_w, ∀w	5	W	5
α	3		

Dans la phase de test, nous choisirons une situation où il y a cinq SBS de différents CNO et cinq WAP répartis de manière aléatoire dans la zone de conflit de rayon de 150 m. Les utilisateurs de chaque SBS et WAP sont répartis aléatoirement dans la zone en conflit. Le réseau WiFi fonctionne sur la base du protocole IEEE 802.11n dans la bande 5 GHz avec mécanisme RTS / CTS. Les SBS fonctionnent également dans la même bande sans licence. Certains des paramètres WiFi sont les mêmes que [44] montrés dans le tableau V.3 avec quelques autres paramètres nécessaires utilisés dans notre expérience. Nous supposons que les SBS utilisent SDL avec l'aide de CA lorsque la qualité de service des applications n'est pas satisfaite avec le spectre sous licence.

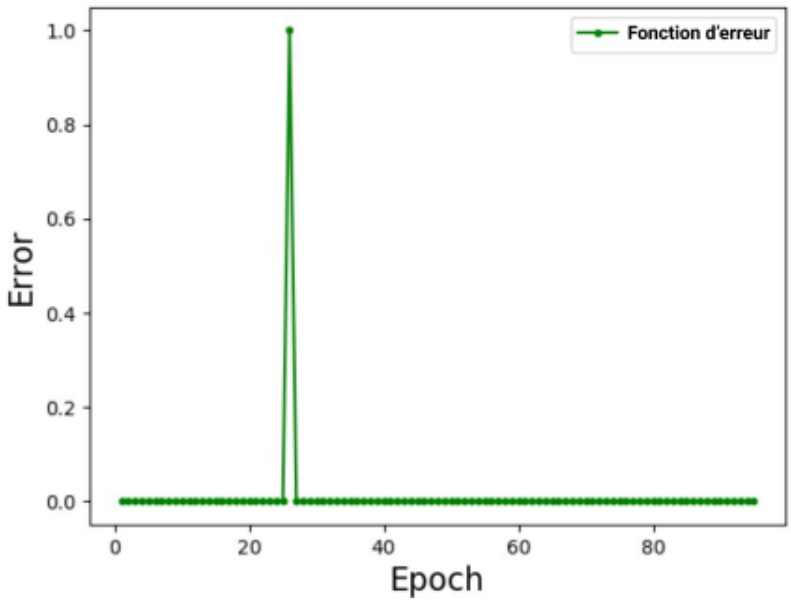

Figure V.4 – Fonction d'erreur d'apprentissage

Pour notre simulation, nous utilisons les exigences de QoS typiques des applications multimédias comme indiqué [50] dans le tableau V.2. Les paramètres sélectionnés ont servi d'entrée à notre réseau de neurones, qui est déjà formé par l'ensemble de données de paramètres. Ces entrées seront traitées et testées comme démontré dans les sections précédentes. Nous avons trouvé que la sortie correspond à la décision suivante du choix du poly-jeux à générer : le jeu de faillite pour l'allocation des ressources et le jeu de négociation pour l'attribution temporelle.

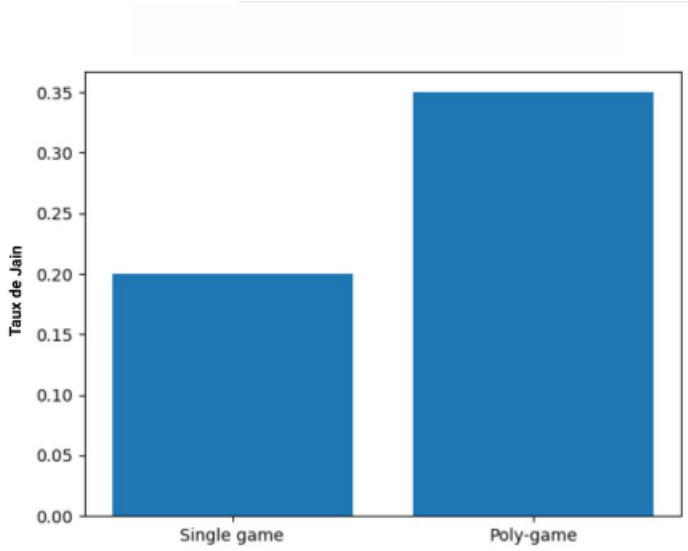

Figure V.5 – Comparaison des indices de Jain

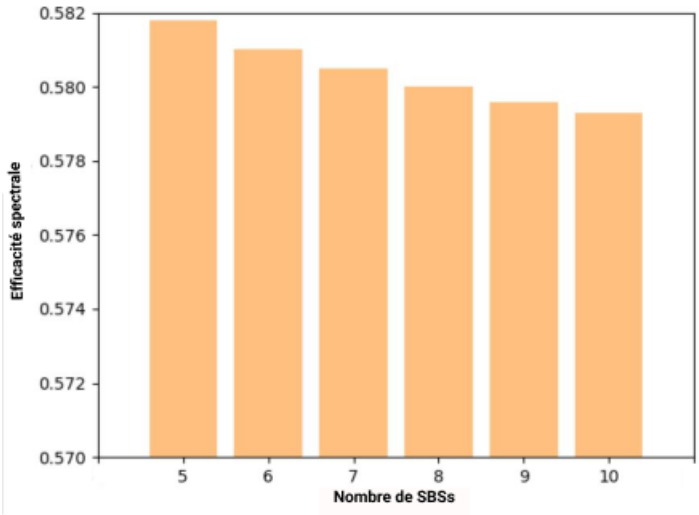

Figure V.6 – Efficacité Spectrale des utilisateurs WiFi

La figure V.4 montre la fonction d'erreur associée à notre réseau de neurones. L'experience consiste à soumettre le framework à une phase d'apprentissage, où ce dernier passe par 100 itérations appelées "epochs". La fonction d'erreur présentée par la courbe de la figure V.4 est calculée comme étant la différence entre la valeur réelle et la valeur prédite par le framework. Il est clair que dans cette figure qu'après 23 "epoches", la courbe atteint le minimum global de 0. Le fait que la courbe converge vers 0 montre que les résultats générés par le réseau de

neurones utilisé pour prédire les poly-jeux sont les mêmes que la sortie attendue, d'où un bon résultat d'apprentissage.

Selon la figure V.5, notre approche a une meilleure équité Jain que le framework à un seul jeu (35% pour notre approche contre 20% pour le framework à un seul jeu). Cette difference s'explique du fait que notre framework "poly-jeux" est de nature dynamique, car il permet davantage aux SBS de s'adapter aux différentes contraintes externes liées à la configuration et au déploiement du réseau sans fil. Etant donné que les jeux employés dans ce framework changent en fonction de ces contraintes, les utilisateurs seront plus satisfaits des débits alloés grâce au poly-jeux que si ils étaient soumis à un framework à un seul jeu.

La figure V.6 montre la variation de l'efficacité spectrale des utilisateurs WiFi en fonction du nombre de SBS interférents. Dans cette simulation, nous avons incrémenté le nombre de SBS, tout en gardant le même nombre de points d'accès WiFi. Les résultats montrent qu'avec 5 SBS, l'efficacité spectrale de le WiFi est de 58.2% . Cette valeur décroit au fur et à mesure que le nombre des SBS LTE-U augmente, jusqu'à arriver à 57.9% . Cette décroissance est cependant très sensible et l'efficacité spectrale reste supérieure à 50% , même avec 10 SBS qui interfèrent sur la même bande sans license. Ce qui constitue un indicateur supplémentaire de la performance supérieure du poly-jeux.

La figure V.7 illustre la comparaison des débits moyens alloués par le framework à jeu unique et notre framework poly-jeu, en fonction du nombre d'utilisateurs par SBS. Dans cette figure on remarque non seulement que notre approche apporte un débit moyen par SBS nettement plus élevé que l'approche à jeu unique, mais ces débits s'avèrent relativement plus stables : avec 807.6 Kbps pour 50 utilisateurs par SBS, et 807.61 pour 100 utilisateurs par SBS. Quant à l'approche du jeu unique, les débits moyens se dégradent au fur et à mesure qu'on ajoute le nombre d'utilisateurs servis par SBS : avec 208.15 Kbps pour 50 utilisateurs par SBS et seulement 87.624 Kbps pour 100 utilisateurs par SBS. La figure présente une motivation supplémentaire de la nécessité d'employer le poly-jeu, si on souhaite une stabilité en terme de satisfaction au niveau QoS. La nature dynamique de notre solution permet une résistance plus haute aux éxigences en QoS qui découlent du changement du nombre des utilisateurs servis par SBS.

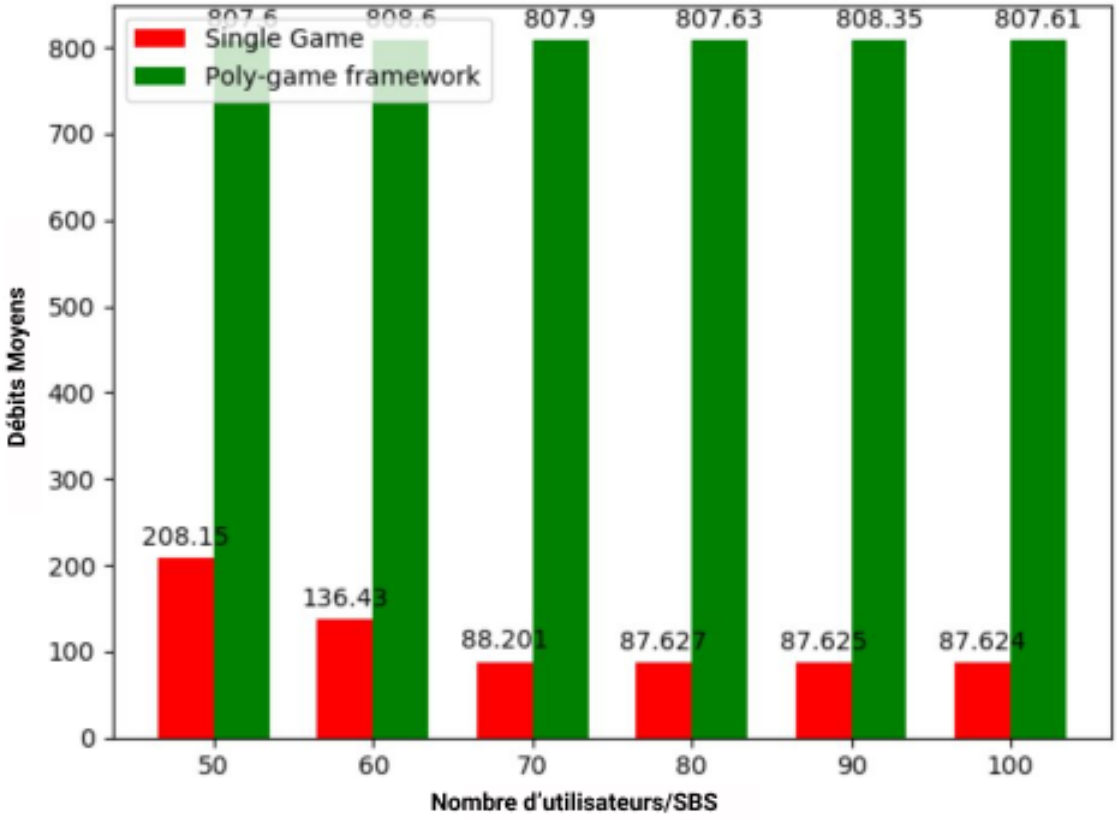

Figure V.7 – Débits alloués aux utilisateurs LTE-U

De plus, nous pouvons voir sur la figure V.7, qu'il y a un grand écart de débit alloué en faveur de notre approche par rapport au framework de jeu unique, compte tenu des différents nombres de SBS LTE-U. Le débit moyen alloué pour un utilisateur LTE-U peut atteindre 808 Kbps en utilisant le poly-jeux, pour environ 208 Kbps seulement en utilisant la coexistence LTE-U / WiFi basée sur un seul jeu.

5 Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre le framework de poly-jeux basé sur l'apprentissage automatique pour une coexistence optimale entre WiFi et LTE dans la bande non-protégée. Le rôle principal de ce poly-jeux consiste à déployer un réseau hétérogène qui s'adapte aux différents paramtres de configuration, que ce soit du réseau même ou des facteurs externes. Par conséquent, ce framework constitue une enveloppe de tout les outils algorithmiques décrits dans les chapitres précédents.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les frameworks proposés dans le cadre de cette thèse s'inscrivent dans la problématique de la coexistence entre les réseaux WiFi et la LTE-U sont basés sur la théorie des jeux coopératifs utilisée pour une équité de ressources spectrales entre les utilisateurs.
Plus précisément, les frameworks proposés visent à optimiser l'exploitation des bandes sans licence entre les WAPs et les SBSs, de manière à satisfaire le plus grand nombre possible d'utilisateurs.

Le choix des frameworks est induit par les différentes caractéristiques de la problématique de la coexistence entre les réseaux LTE-U/WiFi : si les SBS LTE transmettent en continu sur les bandes sans licence, les points d'accès sans fil (WAP) subiront des interférences élevées de la part des SBS, ce qui entraînera de longues périodes d'attente qui détérioreront les performances du réseau WiFi. D'un autre côté, si les SBS réduisent leur trafic sur les bandes sans licence pour faire face aux caractéristiques WiFi, cela aura un impact direct sur les garanties de QoS qui peuvent être fournies par les SBS dans le système LTE.
Quant au choix des techniques, la théorie des jeux a été consolidée par l'apprentissage automatique, ainsi que la logique floue. Ce couplage est justifié pour des fin d'autonomie du framework par rapport aux aléas du déploiement et de l'utilisation du réseau hétérogène.

Dans le chapitre 2, nous avons décrit la CCG pour la coexistence entre le WiFi et la LTE-U. La CCG est divisée en deux parties : la première consistera à résoudre le problème de satisfaction du débit entre les SBSs, en utilisant le problème du jeu de coalition, où les SBS seront les "joueurs". La deuxième partie portera sur le problème de la répartition des récompenses entre les utilisateurs de chacun des SBS, en utilisant le jeu de la faillite (Bankruptcy). Cela se fait en

générant toutes les coalitions possibles entre les SBS. Chaque coalition est associée à une valeur de récompense qui représentera le débit total pour une coalition entière. Cette récompense se répartit entre elles en utilisant une règle d'équité appropriée, de manière à ce que chaque SBS ait une récompense proportionelle aux exigences de ses utilisateurs en débit.

Dans le chapitre 3, nous avons parlé d'une approche automatisée qui a pour but de trouver la meilleure valeur de la fraction temporelle pour que les WAPs du WiFi puissent exploiter les ressources spectrales sans se faire interférer par les SBSs LTE-U. Nous avons employé le Q-learning à cet effet, car il s'avère très utile en termes d'exploration et de l'apprentissage des valeurs possibles des time-slots, associée aux rendements en débits. La récompense est fonction du débit alloué associé à la fraction de temps (état), selon que les points d'accès WiFi choisiront la valeur de la fraction de temps.

Dans le chapitre 4, nous avons expliqué deux approches : la première utilise la logique fuzzy pour la classification des utilisateurs des SBS LTE-U, selon leur QoS en débit, avant d'alloer les sous canaux. Si des sous canaux sans licence résiduels existent encore à une itération donnée, ceux-ci seront redistribués, de manière à satisfaire le plus d'utilisateurs LTE-U possible. Quant à la deuxième approche, elle utilise l'apprentissage automatique pour la classification. La deuxième approche constitue une version 2.0 de la première solution : les réseaux de neurones impliqués dans le système s'entraînent en apprenant à partir dâun ensemble de données, mais aussi donnent an aspect plus prédictif au niveau de l'évaluation des besoins des utilisateurs en débit.

Quant au chapitre 5, nous avons décrit le "poly-jeu", qui est considéré comme un méga-framework, car il est constitué de multitudes de jeux décrits dans les chapitres précédents. Le but est de rendre la solution plus dynamique face aux changements des contraintes liées à la configuration des réseaux ou au niveau des utilisateurs.

Lors des simulations réalisées et présentées dans chaque chapitre, des tests d'évaluation ont été implémentés en Octave et en Python. Afin de comparer de manière équitable l'efficacité de nos approches à celle de [16] et de [21], nous avons utilisé, lors de ces tests, les mêmes valeurs des paramètres utilisées dans [16]. De plus, nous avons ajouté quelques tests supplémentaires ayant davantage rapport à chaque utilisateur du réseau hétérogène LTE-U/WiFi. En effet, l'étendue

de l'importance de la condition de la QoS à satisfaire pour les utilisateurs LTE-U et WiFi sur la bande 5GhZ a été omises dans la plupart des travaux précédant nos contributions. C'est pour cela que nous avons jugé qu'il serait judicieux d'approfondir la définition même de la coexistence entre les réseaux WiFi et LTE-U, afin d'inclure la satisfaction d'un nombre maximum d'utilisateurs de point de vue QoS en débit.

En nous basant sur cette nouvelle définition, notre stratégie de réalisation de cette coexistence, dans chaque chapitre s'est avérée plus efficace que les travaux de référence [16] et [21].

Les résultats du chapitre 2 montrent que le débit de données moyen atteint grâce à notre approche du jeux canonique combinant les deux sous-jeux macro et micro, est supérieur au débit moyen attendu. Nous avons également constaté que le Q-learning appliqué à la théorie des jeux coopératifs, illustré dans le chapitre 3, a aidé à réduire grandement les ressources spectrales non utilisées, grâce à une série de redistributions méthodiques des sous canaux sans licence aux utilisateurs nécessiteux.

Une autre technique de redistribution des ressources spectrales résiduelles a été illustrée dans le chapitre 4, où les utilisateurs des réseaux LTE-U seront classifiés par ordre de priorité, en fonction de leurs attentes QoS en débit. Pour cela, deux méthodes de classification ont été proposées dans ce chapitre : la classification par la méthode floue qui a prouvé pouvoir garantir une efficacité spectrale d'au minimum 57.8% au niveau des réseaux WiFi. Ainsi que la classification par les réseaux de neurones, qui a permis un débit moyen par utilisateur LTE-U supérieur à celui trouvé dans le multigame proposé dans [21].

Enfin, dans le chapitre 5, nous décrivons l'approche "Poly-jeux", qui englobe la totalité de nos contributions décrites précédemment, et qui par conséquent, rassemble tous les points forts du CCG, ainsi que les deux approches illustrées dans le chapitre 4. En effet, le "Poly-Game" a permis un débit alloué moyen satisfaisant au niveau des utilisateurs LTE-U, tout en gardant une efficacité spectrale élevée au niveau du réseau WiFi.

A l'issue de cette thèse, nous envisageons les perspectives suivantes :

1- L'apprentissage automatique constitue un axe de recherche d'actualité dans le domaine des

réseaux sans fil. Les algorithmes et les modèles basés sur l'apprentissage automatique peuvent permettre l'analyse du réseau sans fil et la gestion des ressources et peuvent âtre avantageux pour gérer le volume croissant de communication et de calcul pour les applications de réseau en évolution. A cet effet, il serait intéressant d'explorer davantage les récents progrès de l'apprentissage automatique afin de les appliquer pour la résolution d'autres problèmes liés aux réseaux sans fil hétérogènes.

2- L'implémentation de nos frameworks dans un contexte 6G. Le réseau 6G succédera très bientôt à la 4G et à la 5G, en s'appuyant sur l'infrastructure remaniée et la capacité avancée actuellement mise en place sur les réseaux 5G à ondes millimétriques. En utilisant des bandes radio à haute fréquence, il donnera aux réseaux des vitesses beaucoup plus rapides et une latence plus faible, capables de prendre en charge des appareils et des systèmes mobiles sophistiqués comme les voitures automatisées. Cependant, le déploiement de la 6ème génération de réseaux sans fil n'est pas sans obstacles. En effet, plusieurs détails doivent être pris en compte comme les distances inter-réseaux, et le "path loss" du à la fréquence exploitée élevée (au-delà des 90 GHZ). Il serait jugé intéressant d'appliquer nos frameworks, avec quelques améliorations si nécessaires, dans la résolution des défis liés à la 6G.

GLOSSAIRE

IEEE : Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens.

Listen Before Talk (LBT) : une technique utilisée dans les radiocommunications par laquelle un émetteur radio détecte d'abord son environnement radio avant de commencer une transmission.

Multiple Inputs Multiple Outputs (MIMO) : une technologie d'antenne pour les communications sans fil dans laquelle plusieurs antennes sont utilisées à la fois à la source (émetteur) et à la destination (récepteur).

Orthogonal Frequency Division Multiplex(OFDM) : consiste à transmettre les données en parallèle sur un très grand nombre de sous-porteuses.

(OFDMA) : version multi-utilisateurs de la technologie de modulation numérique OFDM

Aggrégation de porteuses (CA) : utilisé dans LTE-Advanced afin d'augmenter la bande passante, et donc d'augmenter le débit binaire.

WiFi Access Point(WAP) : équipement qui crée un réseau local sans fil, ou WLAN, généralement dans un bureau ou un grand bâtiment.

SBS (Small Base Stations) : une station de base miniature, spécialement faite pour étendre la capacité de données, la vitesse et l'efficacité d'un réseau cellulaire.

Iterative Trial and Error Learning - Best Action (ITEL-BA) : Framework utilisé pour conduire à la convergence vers un équilibre de Nash pour la coexistence WiFi LTE-U.

Carrier Sensing Adaptive Transmission (CSAT) : une approche majeure de l'industrie pour aborder la coexistence entre LTE et WiFi dans les bandes sans licence.

Time Division Multiplexing (TDM) : une méthode consistant à placer plusieurs flux de données dans un seul signal en séparant le signal en plusieurs segments, chacun ayant une durée très courte.

Distributed Coordination Function(DCF) : technique utilisée pour éviter les collisions dans la norme WLAN (WiFi) basée sur IEEE 802.11.

Wideband Code Division Multiple Access(WCDMA) : technique de codage utilisée dans la partie radio (UTRAN) des réseaux de téléphonie mobile UMTS, de troisième génération.

3rd Generation Partnership Project(3GPP) : un projet de partenariat réunissant des organisations nationales de développement de normes (SDO) du monde entier pour développer initialement des spécifications techniques pour la 3e génération de télécommunications mobiles et cellulaires, UMTS.

Technologies avancées d'accès radio(RAT) : méthode de connexion physique sous-jacente pour un réseau de communication radio.

Physical Control Format Indicator Channel(PCFICH) : utilisé au début de chaque sous-trame de 1 ms. Il fournit des informations sur le nombre de symboles utilisés pour la transmission PDCCH.

Physical downlink control channel(PDCCH) : principalement utilisé pour transporter des informations de planification vers des UE individuels, c'est-à-dire des affectations de ressources pour des données de liaison montante et descendante et des informations de contrôle.

Physical Hybrid ARQ Indicator Channel(PHICH) : canal de liaison descendante spécialement fait qui transporte ACK ou NACK pour le PUSCH receptionné par le réseau.

Synchronization Signal(SS) : utilisé par l'UE pour obtenir l'identité de la cellule et la synchronisation de la trame.

La modulation et le codage adaptatifs (AMC) : technique de modulation/codage adaptative de l'information

Espace intertrame distribué(DIFS) : le temps nécessaire à une interface sans-fil pour traiter une trame et répondre avec une trame de réponse.

User Equipment (UE) : un élément d'un réseau de téléphonie mobile cellulaire de troisième (UMTS) ou de quatrième génération (LTE, LTE Advanced).

Cluster Network Operators(CNO) : déploie et gère les composants réseau du cluster sur un cluster OpenShift Container Platform

Station de base macro (MBS) : une station de base cellulaire qui envoie et reçoit des signaux radio à travers de grandes tours et antennes.

Transferable utility (TU) : la notion selon laquelle un joueur peut transférer sans perte une partie de son utilité à un autre joueur.

Quality of Service (QoS) : l'utilisation de mécanismes ou de technologies qui fonctionnent sur un réseau afin d'examiner le trafic des données et satisfaires les applications à hautes contraintes avec une capacité de réseau limitée.

Machine Learning based Double Game (MLDG) : Framework basé sur le double jeu coopératif entre les SBSs LTE-U et entre les utilisateurs de chaque SBS.

La technique RTS / CTS : le mécanisme facultatif utilisé par le protocole de réseau sans fil 802.11 pour réduire les collisions de trames introduites par le problème de noeud caché.

Support Vector Machine(SVM) : une famille d'algorithmes d'apprentissage automatique qui permettent de résoudre des problèmes tant de classification que de régression ou de détection d'anomalie.

Perceptrons multicouches(MLP) : Une catégorie basique des RNA, composé d'au moins une couche de neurones. Les données sont receptionnées à la couche d'entrée, puis sont transformées en informations prédictives à la couche de la sortie.

Processus de décision de Markov fini (FMDP) : MDP dont les espaces d'états et d'actions sont finis.

LISTE DES PUBLICATIONS

-Hager Hafaiedh,Ines El Korbi,Leila Azouz Saidane,Abdellatif Kobbane,"LTE-U and WiFi coexistence in the 5 GHz unlicenced spectrum : A survey",IFIP International Conference on Performance Evaluation and Modeling in Wireless Networks (PEMWN 2017),November 2017,Paris,France.

-Hager Hafaiedh,Ines El Korbi,Rami Langar,Leila Azouz Saidane,Abdellatif Kobbane,"Canonical Coalition Game for Solving Wifi and LTE Coexistence Issues on the 5Ghz Band",International Wireless Communications and Mobile Computing Conference,(IWCMC 2019),June 2019, Tangier, Morrocco.

-Hager Hafaiedh,Ines El Korbi,Rami Langar,Leila Azouz Saidane,Abdellatif Kobbane,"Fuzzified Double Game for Qos-Aware LTE-U and Wifi Coexistence in 5Ghz Band",Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS 2020),October 2020, Tunis,Tunisia.

-Hager Hafaiedh,Ines El Korbi,Rami Langar,Leila Azouz Saidane, "WiFi/LTE learning based Qos-aware Coexistence", 9th IFIP International Conference on Performance Evaluation and Modeling in Wireless Networks (PEMWN 2020), December 2020,Berlin , Germany(virtual).

BIBLIOGRAPHIE

[1] Cisco, "Cisco Visual Networking Index : Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015 - 2020," White Paper, 2016.

[2]3GPP, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) ; Carrier Aggregation ; Base Station (BS) Radio Transmission and Reception (Rel 10)," 3GPP TR 36.808, V10.1.0, July 2013.

[3] 3GPP, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) ; Carrier aggregation enhancements ; User Equipment (UE) and Base Station (BS) radio transmission and reception (Rel 11)," 3GPP TR 36.823, V11.1.0, November 2013.

[4] 3GPP, "Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTEAdvanced) (Rel 12)," 3GPP TR 36.913, V12.0.0, October 2014.

[5] 3GPP TR 36.889, "Study on Licensed-Assisted Access to Unlicensed 3rd Generation Partnership Project, "Requirements for Evolved UTRA (EUTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN) (Release 7), " 3GPP TR 25.913,January 2015.

[6] ITU, "IMT Vision Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond," Rep. ITU-R M.2083-0, 2015.

[7] M. Chiani, M. Z. Win, and H. Shin, "MIMO networks : the effects of interference," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 56, no. 1, pp.336-349, January 2010

[8] A. K. Bairagi, N. H. Tran, N. Kim, and C. S. Hong, "QoS Aware Collaborative Communications with Incentives in the Downlink of Cellular Network : A Matching Approach," in 2016 18th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS), pp. 1-6, October 2016

[9] S. M. A. Kazmi, N. H. Tran, T. M. Ho, and D. K. Lee, and C. S. Hong, "Decentralized Spectrum Allocation in D2D Underlying Cellular Networks," in 2016 18th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS), pp. 1-6, October 2016

[10] Qualcomm, Qualcomm Research LTE in Unlicensed Spectrum : Harmonious Coexistence with Wi-Fi, 2014, White Paper.

[11] R. Zhang, M. Wang, L. X. Cai, X. S. Shen, L.-L. Xie, and Y. Cheng,"Modeling and analysis of MAC protocol for LTE-U co-existing with Wi-Fi", IEEE GLOBECOM, San Diego, CA, USA, Dec. 2015, pp. 1-6

[12] C. Cano and D. J. Leith, "Coexistence of WiFi and LTE in unlicensed bands : A proportional fair allocation scheme," in Proc. IEEE ICC Workshops, London, U.K., Jun. 2015, pp. 2288-2293.

[13] F. Liu, E. Bala, E. Erkip, M. C. Beluri, and R. Yang, "Small cell traffic balancing over licensed and unlicensed bands," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 64, no. 12, pp. 5850-5865, Dec. 2015.

[14] J. Perez-Romero, O. Sallent, H. Ahmadi, I. Macaluso. "On Modeling Channel Selection in LTE-U as a Repeated Game". In Wireless Communications and Networking Conference, IEEE WCNC 2016, 3-6 April 2016, Doha, Qatar

[15] Michel Le Breton and Karine Van der Straeten, Alliances Electorales et Gouvernemen-

tales,Vol. 127, No. 4 (juillet-aout 2017), pp. 637-736

[16] H. Yu, G. Iosifidis, J. Huang and L. Tassiulas, "Auction-Based Coopetition Between LTE Unlicensed and Wi-Fi", IEEE journal on selected areas in communications, Vol. 35, No. 1, January 2017.

[17] Rubinstein, A. Perfect equilibrium in a bargaining model. Econometrica : Journal of the Econometric Society 1982,pp. 97-109.

[18] Camerer, C.F. Behavioral game theory : Experiments in strategic interaction ; Princeton University Press, 2011

[19] Z. Han, N. Dusit, W. Saad, T. Basar, and A. HjÃ¸rungnes, Game theory in wireless and communication networks : theory, models, and applications. Cambridge University Press, 2012.

[20] Piraveenan, M. Applications of Game Theory in Project Management : A Structured Review and Analysis.Mathematics 2019, 7, 858

[21] Chang, S.L. ; Piraveenan, M. ; Pattison, P. ; Prokopenko, M. Game theoretic modelling of infectious disease dynamics and intervention methods : a review. Journal of biological dynamics 2020, 14, 57-89

[22] Peldschus, F. Experience of the game theory application in construction management. Technological and Economic Development of Economy 2008, 14, 531-545.

[23] Schotter, A. The economic theory of social institutions, 2008

[24] Morrow, J.D. Game theory for political scientists ; Princeton University Press, 1994.

[25] Zhong, X. ; Yin, H. ; He, Y. ; Zhu, H. Joint Transmit Power and Bandwidth Allocation for Cognitive Satellite Network Based on Bargaining Game Theory. IEEE Access 2018, 7, 6435-6449

[26] Halpern, J.Y. Computer science and game theory. The New Palgrave Dictionary of Economics : Volume 1-8, 2008, pp. 984-994.

[27] Shoham, Y. Computer science and game theory. Commun. ACM 2008, 51, 74-79.

[28]Nash, J. Non-cooperative games. Annals of mathematics 1951, pp. 286-295

[29] Myerson, R.B. Nash equilibrium and the history of economic theory. Journal of Economic Literature 1999, 37, 1067-1082

[30] M. Chen, W. Saad, and C. Yin, "Optimized uplink-downlink decoupling in lte-u networks : An echo state approach," in IEEE International Conference on Communications (ICC), Mobile and Wireless Networks Symposium, May 2016.

[31] Park, M. ; Oh, H. Cooperative information-driven source search and estimation for multiple agents. Information Fusion 2020, 54, 72-84.

[32] Ma, Y. ; Wang, G. ; Hu, X. ; Luo, H. ; Lei, X. Cooperative occupancy decision making of Multi-UAV in Beyond-Visual-Range air combat : A game theory approach. IEEE Access 2019, 8, 11624 11634.

[33] K. Hamidouche, W. Saad and Merouane Debbah, "A Multi-Game Framework for Harmonized LTE-U and WiFi Coexistence over Unlicensed Bands", IEEE Wireless Communications Journal, Vol. 23, No. 6, December 2016

[34] R. Etkin, A. Parekh, and D. Tse, "Spectrum sharing for unlicensed bands," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 25, no. 3, pp. 517-528, 2007.

[35] F. Teng, D. Guo, and M. L. Honig, "Sharing of unlicensed spectrum by strategic operators," in IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP), 2014, pp.

288-292

[36] Spectrum (Release 13)", November, 2014.3GPP TR 36.889, "Study on Licensed-Assisted Access to Unlicensed Spectrum (Release 13)" November, 2014

[37] A. K. Bairagi, N. H. Tran, W. Saad, and Ch. S. Hong, Dept. of Computer Science and Engineering, Kyung Hee University, Korea. Bargaining Game for Effective Coexistence between LTE-U and Wi-fi Systems . NOMS 2018 - 2018 IEEE/IfiP Network Operations and Management Symposium

[38] Edwin Ho, Arvind Rajagopalan, Alex Skvortsov, Sanjeev Arulampalam, and Mahendra Piraveenan , Game Theory in defence applications : a review, 2 Nov 2021

[39] Igor Bimbiloski ; Valentin Rakovic ; Anis Sefidanoski ; Aleksandar Risteski,Competitive Game Theory Efficiency ICT Model in MultiPlayer Market,July 2019

[40] R. J. Brachman, T. Dietterich ESSENTIALS OF GAME THEORY Cambridge University Press, 2012

[41] A. M. Cavalcante, E. Almeida, R. D. Vieira, S. Choudhury, E. Tuomaala, K. Doppler, F. Chaves, R. C. D. Paiva, and F. Abinader, "Performance evaluation of LTE and WI-FI coexistence in unlicensed bands," in 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), pp. 1-6, June 2013.

[42] Qualcomm Inc, "Office of engineering and technology and wireless telecommunications bureau seek information on current trends in LTE-U and LAA technology," Comments of Qualcomm Inc., June 2015.

[43] N.Rupasinghe and IGuve-nc Licensed-assisted access for Wifi-LTE coexistence in the unlicensed spectrum . Globecom 2014 Workshop - Emerging Technologies for 5G Wireless Cellular Networks

[44] G. Bianchi, "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function, " IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 18, no. 3, pp. 535-547, March 2000

[45] R. Serrano Four Lectures on the Nucleolus and the Kernel Delivered at the hebrew University of Jerusalem 10th Summer School in Economic Theory

[46] Robert J. Aumann,Michael Maschler,Game theoretic analysis of a bankruptcy problem from the Talmud,Volume 36, Issue 2, August 1985, Pages 195-213.

[47] B. OâNeill, "A problem of rights arbitration from the Talmud," Mathematical Social Sciences, vol. 2, no. 4, pp. 345-371, June 19

[48] T. Q. S. Quek, G. de la Roche, I. Guvenc, and M. Kountouris, "Small Cell Networks : Deployment, PHY Techniques, and Resource Allocation," Cambridge University Press, 2013.

[49] Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller llXr TRANSACTIONS ON SYSTTMS. MAN, ANI) CâYI3TRYTTICâS. VOI.. 20. NO. 2. MAKCâkl/APKII. 1990

[50] R Jain, D-M Chiu, WR Hawe, A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system, vol. 38 (Eastern Research Laboratory, Digital Equipment Corporation Hudson, MA, 1984).

[51] Bairagi, A. K., Tran, N. H., Hong, C. S. (2018). A multigame approach for effective coexistence in unlicensed spectrum between LTE-U system and WiFi access point. 2018 International Conference on Information Networking (ICOIN). doi :10.1109/icoin.2018.8343145

[52] H. Hafaiedh, I El Korbi, R. Langar, L. A. Saidane, and A. Kobbane, Canonical Coalition Game for Solving WiFi and LTE Coexistence Issues on the 5Ghz Band, IWCMC2019.

[53] Jorge Casillas Oscar Cordon Francisco HerreraLuis Magdalena, "Accuracy Improvements

to Find the Balance Interpretability-Accuracy in Linguistic Fuzzy Modeling : An Overview".

[54] H. Hafaiedh, I El Korbi, R. Langar, L. A. Saidane, and A. Kobbane, Fuzzified Double Game for Qos-Aware LTE-U and Wifi Coexistence in 5Ghz Band, 2020 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS).

[55] Ehud Kalai and Meir Smorodinsky , Other Solutions to Nash's Bargaining Problem, Vol. 43, No. 3 (May, 1975), pp. 513-518 (6 pages)

[56] Hager Hafaiedh,Ines El Korbi,Rami Langar,Leila Azouz Saidane, "WiFi/LTE learning based Qos-aware Coexistence", 9th IFIP International Conference on Performance Evaluation and Modeling in Wireless Networks (PEMWN 2020), December 2020,Berlin , Germany(virtual).