



République Algérienne Démocratique et Populaire
Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen
Faculté des Sciences
Département d'Informatique

Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en Informatique
Option: Réseaux et Systèmes Distribués (RSD)

THÈME

**Approche coopérative pour l'optimisation de la QoS dans
un réseau de radio cognitive basé sur l'OFDM**

Réalisé par :

- ARICHI Bochra
- HAOUACA Sara

Présenté devant le jury composé de :

- *Mr LEHSAINI Mohamed*
- *Mme AMRAOUI Asma*
- *Mr BENMAMMAR Badr*
- *Mr BENDELLA Saléh*

Président

Examinatrice

Encadrant

Co-Encadrant

Année universitaire: 2020/2021

Remerciement

C'est avec un immense plaisir que nous réservons ces quelques lignes en signe de gratitude et de reconnaissance à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Tout d'abord, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et adresser nos remerciements les plus sincères à notre encadrant Mr. BENMAMMAR Badr pour sa disponibilité, sa patience, ses recommandations judicieuses et son précieux suivi tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous tenons également à remercier notre Co-encadrant Mr. BENDELLA Saléh qui a partagé avec nous ses brillantes intuitions et propositions. Nous le remercions aussi pour son soutien, ses conseils, sa disponibilité, ses remarques pour améliorer ce travail et l'aide précieuse qu'il nous a apporté.

Nous souhaiterions remercier aussi les membres du jury Mr. LEHSAINI Mohamed (président du jury), Mme. AMRAOUI Asma (examinatrice) pour avoir consacré une partie de leur temps à la lecture de ce mémoire et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Nos remerciements s'étendent à tous nos enseignants du département d'Informatique de l'Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen. Nous resterons reconnaissants à leur participation à notre formation.

Nous remercions enfin l'ensemble des personnes qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à l'élaboration de ce travail.

Dédicace

À mes très chers parents pour tous les sacrifices qu'ils ont faits et pour tout le soutien qu'ils ont offert tout au long de mes études.

À chaque membre de ma petite famille,

À ma famille et à tous mes amis,

À ma binôme Bochra Arichi,

Je dédie ce modeste travail

Sara

Je dédie ce modeste travail

A la mémoire de mon cher papa (rebbi yrahmou); je ne saurais exprimer mon grand chagrin en ton absence. J'aurais aimé que tu sois à mes côtés ce jour. Que ce travail soit une prière pour le repos de ton âme

À ma chère maman qui m'a entouré d'amour, d'affection et qui fait tout pour ma réussite, que dieu la garde,

À mon frère, mes sœurs et ma belle-sœur pour leur soutien et leur encouragement,

À ma famille et à tous mes amies.

À ma binôme Sara Haouaça,

Bochra

Table des matières

GLOSSAIRE.....	i
Liste des figures	iii
Liste des tableaux.....	iii
Résumé:.....	v
Introduction générale	1
I. CHAPITRE I: INTRODUCTION AUX RESEAUX DE RADIO COGNITIVE.....	3
I.1 Introduction	3
I.2 Radio logicielle	3
I.2.1 Radio logicielle restreinte	3
I.3 Radio cognitive	4
I.3.1 Historique.....	4
I.3.2 Définition	4
I.3.3 Relation entre RC et SDR.....	4
I.3.4 La norme IEEE 802.22	5
I.3.5 Principe de la radio cognitive	5
I.3.5.1 Utilisateurs primaires.....	6
I.3.5.2 Utilisateurs secondaires	6
I.3.6 Architecture de la radio cognitive.....	6
I.3.7 Cycle de cognition	7
I.3.8 Composantes de la radio cognitive	8
I.3.9 Fonctions de la radio cognitive	10
I.3.9.1 Détection du spectre (Spectrum sensing)	10
I.3.9.2 Gestion du spectre (Spectrum management).....	10
I.3.10 Architecture de réseaux de radio cognitive	11
I.3.11 Domaines d'application de la radio cognitive.....	12
I.4 Conclusion.....	13
II. CHAPITRE II: LES SYSTEMES MULTI-AGENTS.....	15
II.1 Introduction	15

II.2	Historique	15
II.3	Notion d'agent	15
II.3.1	Définition	15
II.3.2	Propriétés d'un agent.....	16
II.3.3	Types d'agent	16
II.3.3.1	Les agents cognitifs	16
II.3.3.2	Les agents réactifs	17
II.4	Les systèmes multi agents	18
II.4.1	Définition	18
II.4.2	Caractéristiques des SMAs.....	18
II.4.3	Utilisation d'un SMA	19
II.4.4	Domaines d'applications des SMA	19
II.4.5	Les types d'interaction dans les SMAs	19
II.4.5.1	La coordination.....	19
II.4.5.2	La coopération	20
II.4.5.3	La négociation	20
II.4.6	Les plateformes de SMAs	20
II.4.6.1	Plateforme JADE.....	21
II.5	Conclusion	22
III.	CHAPITRE III : IMPLEMENTATION DE L'APPLICATION ET EVALUATION DES RESULTATS OBTENUS	24
III.1	Introduction	24
III.2	Technique de transmission par répartition orthogonale de fréquences (OFDM)	24
III.2.1	Historique.....	24
III.2.2	Notion d'orthogonalité.....	24
III.2.3	Avantages de l'OFDM.....	25
III.2.4	Principe de fonctionnement	25
III.3	Méthode d'optimisation multicritères TOPSIS	26
III.3.1	Définition et origine.....	26
III.3.2	Principe de TOPSIS	26
III.3.3	Algorithme TOPSIS.....	27
III.3.4	Exemple d'utilisation de l'algorithme TOPSIS	28
III.4	Environnement de développement et de simulation.....	31
III.4.1	Java	31
III.4.2	Netbeans	31

III.4.3	JADE	31
III.4.4	JavaFX.....	32
III.5	Optimisation de la QoS pour l'utilisateur secondaire.....	33
III.6	Implémentation de l'application.....	35
III.6.1	Présentation de l'application	36
III.6.2	Les interactions entre le CSU et les SUs.....	40
III.7	Evaluation des résultats obtenus.....	41
III.7.1	Impact de TOPSIS sur le temps d'exécution	41
III.7.2	Impact de la coalition sur la batterie consommée	42
III.7.3	Impact du nombre de sous-porteuses sur le temps d'exécution	43
III.7.4	Impact du nombre de SUs sur le temps de réponse.....	44
III.7.5	Impact de TOPSIS sur la valeur des critères	45
III.8	Conclusion	48
	Conclusion générale.....	50
	Références bibliographiques	52
	Résumé:.....	54

GLOSSAIRE

Acronyme	Signification
ACL	Access Control List
AHP	Analytic Hierarchy Process
AMS	Agent Management System
CPU	Coalition Primary User
DAB	Digital Audio Broadcasting
DF	Director Facilitator
FCC	Federal Communications Commission
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents
IAD	Intelligence Artificielle Distribuée
IAP	Intelligence Artificielle Parallèle
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
JADE	Java Agent DEvelopment Framework
KTH	Kungliga Tekniska högskolan
LAN	Local Area Network
MAC	Media Access Control
MAN	Metropolitan Area Network
PU	Primary User
QoS	Quality Of Service
RC	Radio Cognitive
RDP	Résolution Distribuée de Problèmes
RF	Radio Frequency
RMA	Remote Management Agent
RRC	Réseaux de Radio Cognitive
SDR	Software Defined Radio
SMA	Système Multi Agents
SP	Sensory Perception

SU	Secondary User
TOPSIS	Technique for O rders Preference by S imilarity to I deal S olution
VA	Vie Artificielle
WRAN	W ireless R egional A ccess N etworks

Liste des figures

Figure I.1: Les différentes actions de la radio cognitive.	4
Figure I.2: Relation entre la RC et la SDR [5]	5
Figure I.3: Architecture de la RC [7].	6
Figure I.4: Protocoles utilisés par la RC [4].....	7
Figure I.5: Cycle de cognition de Mitola [8].....	8
Figure I.6: Composantes de la radio cognitive [6].	9
Figure I.7: Accès coopératif et non coopératif au spectre [11].	11
Figure I.8: Coexistence entre deux types de réseau : primaire et secondaire [14].	12
Figure II.1: Agent Cognitif [17].....	17
Figure II.2: Agent réactif [17].....	17
Figure III.1: Transmission des fréquence orthogonale [21].	24
Figure III.2: Exemple de partage de spectre entre PU et SU dans un système de communication multi-porteuse [22].	26
Figure III.3: Les étapes de l’algorithme TOPSIS.	27
Figure III.4: Interface graphique (jade GUI).	32
Figure III.5: Interface accueil.	36
Figure III.6: Onglet de configuration des SUs.	37
Figure III.7: Onglet pour gérer les canaux de communication.	38
Figure III.8: Onglet pour lancer la simulation.	39
Figure III.9: Onglet pour les statistiques.	40
Figure III.10: Agent Sniffer pour la méthode TOPSIS.....	41
Figure III.11: Impact de TOPSIS sur le temps d’exécution.....	42
Figure III.12: La batterie concommée dans l’approche centralisée et l’approche distribuée.	43
Figure III.13: Impact du nombre de sous-porteuses sur le temps d’exécution.	44
Figure III.14: Impact du nombre de SUs sur le temps de réponse coté CSU.	44
Figure III.15: Le débit pour chaque application : RC classique Vs RC avec TOPSIS.....	46
Figure III.16: La puissance pour chaque application : RC classique Vs RC avec TOPSIS.	46
Figure III.17: L’interférence pour chaque application : RC classique Vs RC avec TOPSIS.	47
Figure III.18: Le taux d’erreur pour chaque application : RC classique Vs RC avec TOPSIS.	48

Liste des tableaux

Tableau II.1: Les Types d'agent dans JADE [20].	21
Tableau III.1: Pondération des types de données d'application.....	35
Tableau III.2: Critères et seuils pour les quatre applications.	35
Tableau III.3: Moyenne des valeurs des quatre critères pour les quatre applications.	45

Résumé:

Fournir la qualité de service aux utilisateurs des réseaux de radio cognitive est un enjeu très important surtout pour ceux utilisant des applications gourmandes en termes de ressources. Dans ce projet de fin d'études, nous avons utilisé la méthode d'optimisation multicritère TOPSIS afin d'optimiser quelques critères de qualité de service dans un réseau de radio cognitive se basant sur l'OFDM. Pour ce faire, nous avons mis en place un agent coopératif qui coordonne les utilisateurs secondaires afin d'augmenter les performances du réseau. Les simulations effectuées dans cette étude ont été réalisées à l'aide de la plate-forme multi-agents JADE et les résultats obtenus sont très satisfaisants.

Mot clés: Qualité de service, Réseaux de radio cognitive, OFDM, TOPSIS, Systèmes multi-agents.

Abstract:

Providing quality of service to users of cognitive radio networks is a very important issue, especially for those using resource-intensive applications. In this final year project, we used the TOPSIS multi-criteria optimization method to optimize the QoS parameters in a cognitive radio network based on OFDM. For this purpose, we implemented a cooperative agent that coordinates secondary users in order to increase the network performance. The simulations carried out in this study were performed using the multi-agent platform JADE and the results obtained are very satisfactory.

Keywords: Quality of service, Cognitive radio network, OFDM, TOPSIS, Multi-agent systems.

ملخص:

يعد توفير جودة الخدمة لمستخدمي الشبكات الراديوية الإدراكية مسألة مهمة للغاية ، خاصة لأولئك الذين يستخدمون تطبيقات كثيفة الاستخدام للموارد. في مشروع التخرج هذا، استخدمنا طريقة تحسين TOPSIS متعددة المعايير لتحسين بعض معايير جودة الخدمة في شبكة راديو معرفية تعتمد على OFDM. للقيام بذلك، أنشأنا وكبلاً تعاونياً ينسق المستخدمين الثانويين من أجل زيادة أداء الشبكة. تم إجراء عمليات المحاكاة التي تم إجراؤها في هذه الدراسة باستخدام منصة JADE متعددة العوامل وكانت النتائج التي تم الحصول عليها مرضية للغاية.

الكلمات المفتاحية: جودة الخدمة ، شبكة راديو معرفية ، OFDM ، TOPSIS ، أنظمة متعددة الوكلاء.

Introduction générale

Introduction générale

Contexte et problématique

Nous vivons à une époque où le développement de la technologie suit un rythme effréné, et les innovations se succèdent dans le but d'optimiser et de maximiser toujours les ressources disponibles. Les développements récents dans les technologies sans fil ont conduit à une forte demande de spectre radio, entraînant une pénurie de ressources spectrales telles qu'elles sont utilisées actuellement.

Des études établies par la Federal Communications Commission (FCC) en 2003 ont montré que certaines bandes de fréquences sont surchargées tandis que d'autres bandes restent largement inexploitées. Pour cela, les chercheurs ont proposé un nouveau paradigme qui est la radio cognitive (RC). Celle-ci permet à des utilisateurs sans licence (utilisateurs secondaires « SU ») d'utiliser des fragments du spectre sans nuire aux communications des utilisateurs avec licence (utilisateurs primaires « PU »).

Dans ce contexte, les réseaux de radio cognitive (RRC) doivent pouvoir coexister avec la possibilité de générer des interférences aux autres utilisateurs avec un faible débit pour les données utilisées.

Afin de traiter ce problème, l'idée de la coopération entre les utilisateurs pour détecter et partager le spectre en minimisant les interférences est mise en place avec l'utilisation d'un schéma de modulation de multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) pour effectuer efficacement les tâches requises et obtenir un débit de données plus élevé.

Motivation

La résolution coopérative de problèmes occupe une place prépondérante dans les recherches sur l'intelligence artificielle distribuée (IAD). Un domaine de recherche très actif et largement appliqué, dérivé de l'IAD, est celui des systèmes multi agents (SMA).

Dans ce PFE, nous allons bénéficier des caractéristiques des SMAs afin de modéliser les interactions entre les utilisateurs d'un réseau de radio cognitive se basant sur l'OFDM.

Contribution

Notre objectif dans le cadre de ce projet de fin d'études est de satisfaire les besoins des utilisateurs en termes de QoS tout en minimisant les interférences qui peuvent se produire entre eux.

Pour répondre aux besoins des utilisateurs, nous avons opté à une méthode d'optimisation multicritère qui est TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) vu qu'il ya plusieurs critères à optimiser (le débit, les interférences, la puissance du canal et le taux d'erreur). Nous avons également utilisé un agent coalition CSU (Coalition Secondary User) jouant

le rôle du coordinateur pour l'ensemble des SUs et par conséquent augmenter les performances de notre réseau.

Organisation du manuscrit

Notre rapport est construit autour de trois chapitres ; les deux premiers sont théoriques et le dernier est pratique représentant notre contribution dans le cadre de ce PFE.

Chapitre I : Introduction aux réseaux de radio cognitive

Dans ce chapitre nous avons défini le concept de la radio cognitive en introduisant ses composants, ses principes, ses objectifs et ses domaines d'application.

Chapitre II : Les systèmes multi-agents

Ce chapitre présente les SMAs en se focalisant sur les différents types d'agents ainsi que leurs propriétés. Ensuite, nous donnerons plus de détails concernant les différents types d'interaction entre agents. Pour enfin présenter les plateformes SMA ; en particulier la plateforme JADE puisque nous allons l'utiliser pour la partie réalisation de notre PFE.

Chapitre III : Implémentation de l'application et évaluation des résultats obtenus

Ce dernier chapitre est consacré à notre contribution dans le cadre de ce PFE, notamment les simulations faites avec JADE et l'évaluation des résultats obtenus en utilisant l'agent coalition et la méthode TOPSIS dans le contexte d'un RRC basé sur l'OFDM.

CHAPITRE I

Introduction aux réseaux de radio cognitive

I. CHAPITRE I: Introduction aux réseaux de radio cognitive

I.1 Introduction

Les derniers développements de la technologie sans fil ont conduit à une forte demande de ressources spectrales. Afin de résoudre ce problème il est nécessaire de bien gérer le spectre et donc augmenter l'efficacité de son utilisation. C'est dans ce contexte que les recherches sont effectuées dans le domaine de la radio cognitive.

La radio cognitive a été proposée au début des années 2000, par Joseph Mitola comme une approche prometteuse en termes d'accès dynamique et opportuniste au spectre pour répondre au besoin lié à la gestion de l'environnement du terminal radio.

Ce premier chapitre s'intéresse à la radio cognitive dans ses différents aspects: ses principes, son architecture, ses fonctions et ses différents domaines d'application.

I.2 Radio logicielle

Le concept de la radio logicielle est issu des travaux de Joseph Mitola en 1991 pour définir une classe de radiocommunication configurable utilisant des techniques de traitement numérique du signal sur des circuits numérique programmables.

La radio logicielle permettra de configurer les systèmes radio par logiciel et de manière dynamique. La bande passante du signal, la modulation et l'accès au réseau, la fréquence porteuse sont réalisés sous forme matériel. Les radios logicielles modernes mettent également en œuvre des fonctions cryptographiques ainsi d'un codage correcteur d'erreur de la vidéo ou des données [1].

La radio logicielle est le but ultime intégrant toute les fonctionnalités en logiciel, mais elle impose des phases intermédiaires combinant anciennes et nouvelles techniques, on parle alors de radio logicielle restreinte (*software defined radio*). Les contraintes de puissance de calcul, de consommation électrique, de coûts, etc. imposent actuellement de passer par cette phase intermédiaire.

I.2.1 Radio logicielle restreinte

La radio logicielle restreinte est un système de communication radio qui peut s'adapter à n'importe quelle bande de fréquence et recevoir n'importe quelle modulation en utilisant le même matériel [2].

Les opportunités qu'offre le SDR lui permettant de résoudre des problèmes de la gestion dynamique du spectre [1].

Pour obtenir des informations sur l'environnement proche, Joseph Mitola a défini la radio intelligente (*cognitive radio*) comme l'intégration du raisonnement à base de modèles avec les technologies de radio logicielle afin d'améliorer ses performances radio.

I.3 Radio cognitive

I.3.1 Historique

Le terme « radio cognitive » (RC) a été présenté officiellement par Joseph Mitola III lors d'une conférence à KTH, l'Institut royal de technologie, en 1998, publié plus tard dans l'article de Mitola et Gerald Q. Maguire, Jr en 1999 [3]. Ses recherches s'étaient concentrées sur l'apprentissage automatique et l'intelligence artificielle pour mettre en place la technologie de la radio cognitive.

I.3.2 Définition

Une radio cognitive est un système de communication sans fil intelligent qui est conscient de son environnement et qui permet à un émetteur/récepteur de détecter intelligemment les canaux de communication qui sont en cours d'utilisation et ceux qui ne le sont pas, et peut se déplacer dans les canaux inutilisés. Ceci permet d'optimiser l'utilisation des fréquences radio disponibles (RF) du spectre tout en minimisant les interférences avec d'autres utilisateurs. La figure I.1 illustre les différentes actions de la radio cognitive.

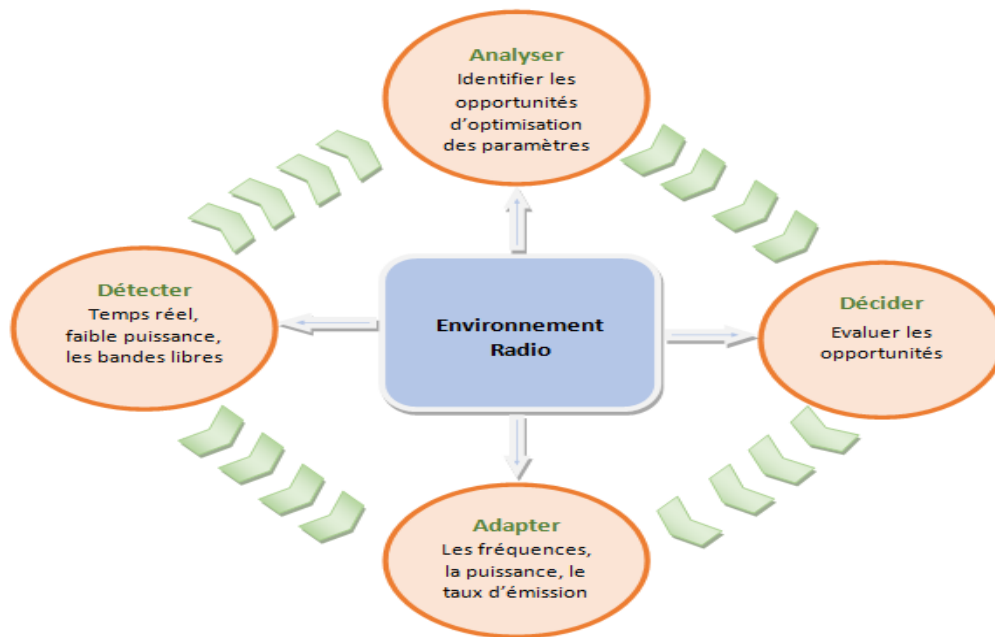


Figure I.1 : Les différentes actions de la radio cognitive.

I.3.3 Relation entre RC et SDR

La radio cognitive (RC) traite un ensemble de caractéristiques comme la capacité d'adaptation de la bande passante, de la puissance du signal, de la modulation, des fréquences porteuses, ainsi que les besoins de l'utilisateur et l'état du réseau [1].

La SDR est capable d'offrir les fonctionnalités de flexibilité, de reconfigurabilité et de portabilité inhérentes à l'aspect d'adaptation de la RC. Par conséquent, cette dernière doit être

mise en œuvre autour d'une SDR. En d'autres termes, la SDR est une technologie habilitante pour la radio cognitive [4].

Bien que de nombreux modèles différents soient possibles l'un des plus simples qui décrit la relation entre la RC et la SDR est illustré dans la figure I.2.

Dans ce modèle, les éléments de la RC entourent le support SDR. Le moteur cognitif représente la partie chargée de l'optimisation ou du contrôle du module SDR en se basant sur quelques paramètres d'entrée tels que les informations issues de la perception sensorielle ou de l'apprentissage de l'environnement radio, du contexte utilisateur, et de l'état du réseau [4].

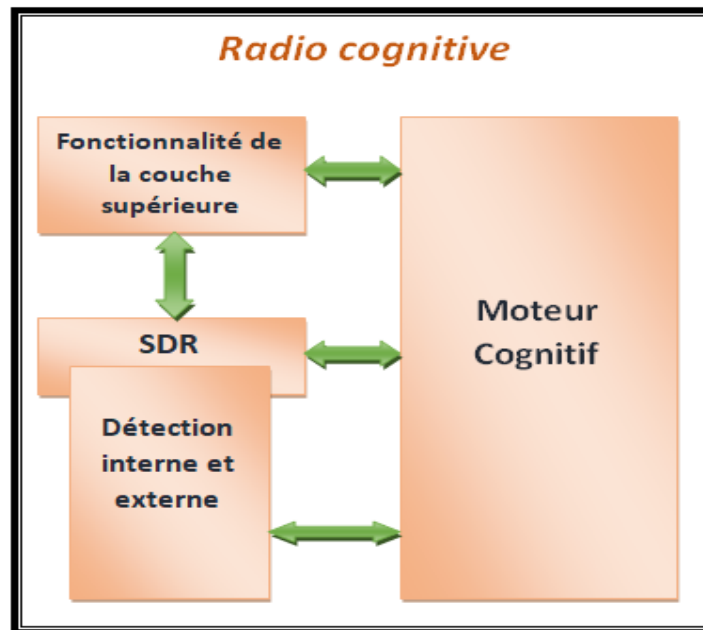


Figure I.2: Relation entre la RC et la SDR [5].

I.3.4 La norme IEEE 802.22

La norme IEEE 802.22 est une norme pour les réseaux régionaux sans fil (WRAN) utilisant les espaces blancs du spectre de fréquences de la télévision. Le développement de la norme IEEE 802.22 WRAN vise à utiliser les techniques de la radio cognitive pour permettre le partage du spectre géographiquement inutilisé attribué au service de diffusion télévisuelle [6].

La norme IEEE 802.22 est une norme de radio cognitive qui vise à doter les régions rurales moins peuplées d'un accès à large bande en utilisant des canaux de télévision vacants, et aussi assurer la coexistence avec les microphones et les systèmes de télévision.

I.3.5 Principe de la radio cognitive

Le principe de la radio cognitive, repris dans la norme IEEE 802.22, nécessite une gestion alternative du spectre basée sur deux éléments omniprésents.

I.3.5.1 Utilisateurs primaires

Les utilisateurs primaires sont des utilisateurs qui disposent d'une licence qui leur permet d'opérer sur des bandes spectrales qui leur sont réservées, ainsi ils ont le droit de communiquer en toute liberté à tout instant sur leurs bandes de fréquence.

I.3.5.2 Utilisateurs secondaires

Les utilisateurs secondaires ne possédant pas de licence, ils accèdent au spectre de façon opportuniste, mais ils doivent veiller à ne pas gêner les utilisateurs primaires. En effet ils doivent prendre la responsabilité de ne jamais interférer avec les utilisateurs primaires.

Un mobile dit secondaire pourra à tout moment accéder à des bandes de fréquence qu'il juge libre, c'est-à-dire, non occupées par l'utilisateur dit primaire possédant une licence sur cette bande. L'utilisateur secondaire devra les céder une fois le service terminé ou une fois qu'un utilisateur primaire aura montré des velléités de connexion [2].

I.3.6 Architecture de la radio cognitive

L'architecture de la radio cognitive introduite par J. Mitola, est un ensemble de six composantes réalisant une série de fonctions et de services. Cette architecture est illustrée dans la Figure I.3.

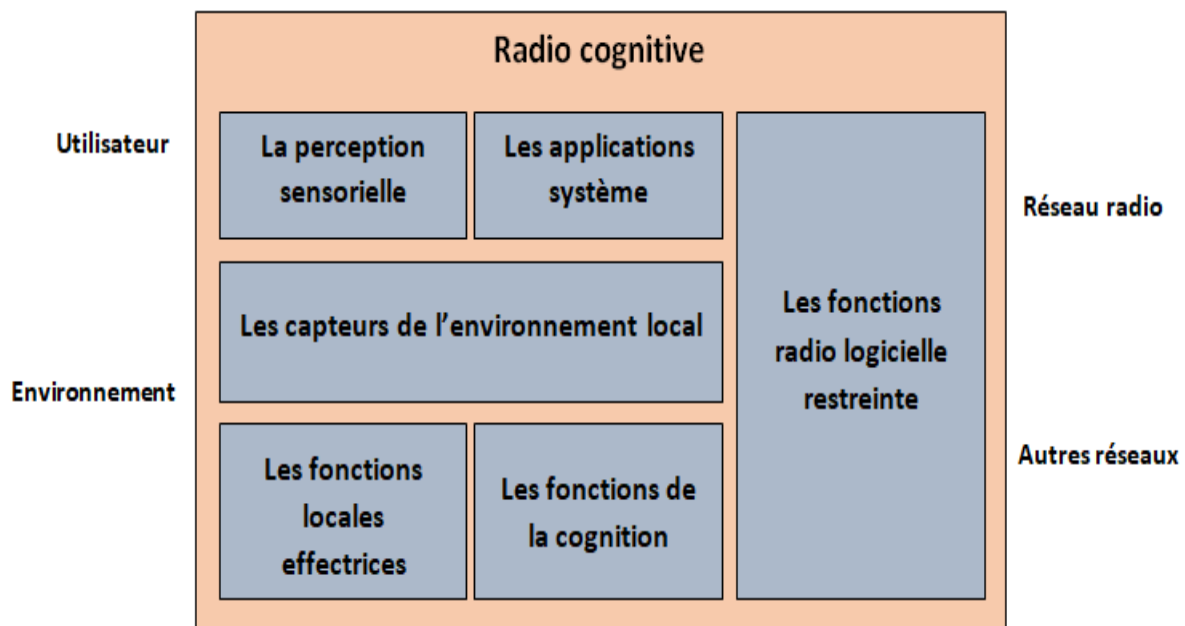


Figure I.3: Architecture de la RC [7].

- La perception sensorielle (Sensory Perception : SP) de l'utilisateur qui inclut l'interface haptique (du toucher), acoustique, la vidéo et les fonctions de détection et de la perception.

- Les capteurs de l'environnement local (emplacement, température, accéléromètre, etc.).
- Les applications système (les services médias indépendants comme un jeu en réseau).
- Les fonctions SDR (qui incluent la détection RF et les applications radio de la SDR).
- Les fonctions de la cognition (pour les systèmes de contrôle, de planification et d'apprentissage)
- Les fonctions locales effectrices (synthèse de la parole, du texte, des graphiques et des affiches multimédias)

L'architecture de la RC utilise les protocoles d'adaptation de la couche MAC pour établir des interfaces entre l'émetteur/récepteur SDR et les applications sans fil (l'état du réseau), la couche physique dont le RF est définie par logiciel et traite le signal par des algorithmes intelligents. La figure I.4 présente les protocoles utilisés par la radio cognitive [1].

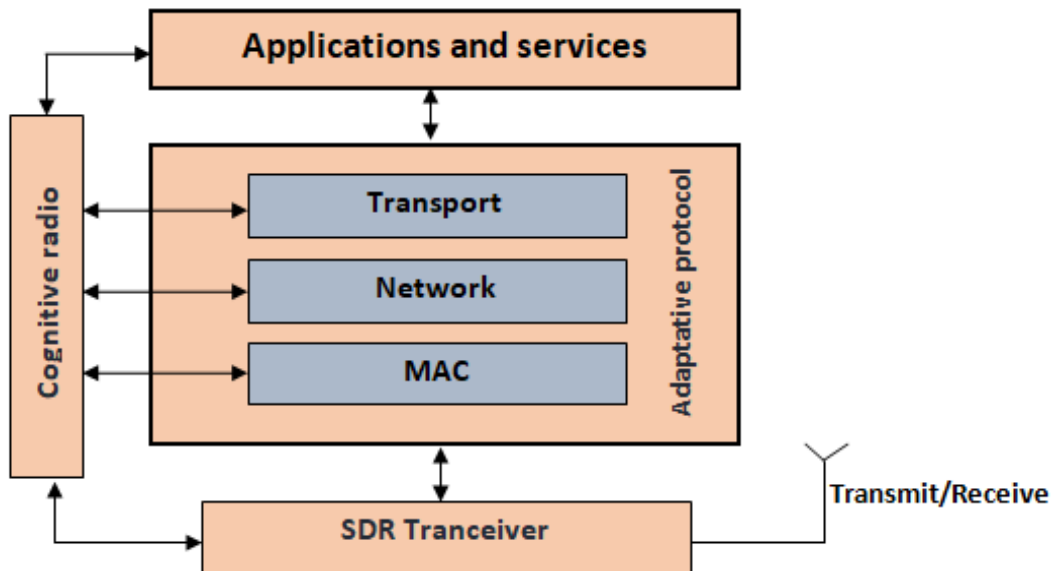


Figure I.4 : Protocoles utilisés par la RC [4].

I.3.7 Cycle de cognition

Le cycle cognitif consiste en différentes étapes comme mentionné dans la figure I.5.

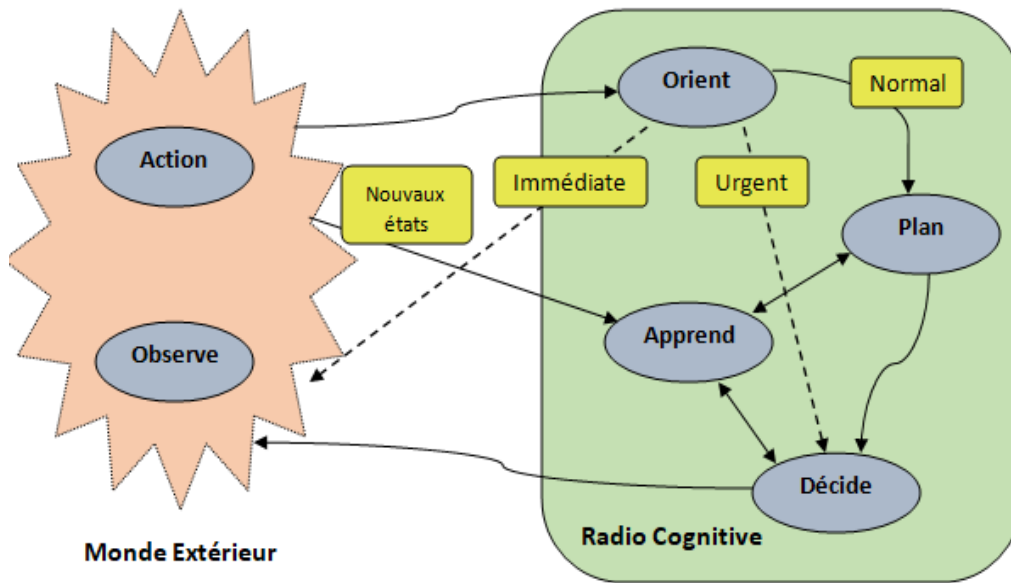


Figure I.5 : Cycle de cognition de Mitola [8].

La figure I.5 décrit en détail ce cycle en commençant par l'étape d'observation jusqu'à l'étape d'action afin de permettre à la radio cognitive d'interagir avec son environnement. Les systèmes cognitifs observent, orientent, planifient, décident et agissent, tout en apprenant de leur environnement afin d'être plus efficaces au fil du temps. Les différentes étapes du cycle cognitif sont les suivantes [9] :

- ❖ **Phase d'observation:** Vise à extraire plusieurs informations à partir de l'environnement comme la fréquence radio, le type de données transmises (audio, vidéo, etc.), la position, etc.
- ❖ **Phase d'orientation :** Afin d'évaluer la situation et détermine si elle est familière et réagir immédiatement, si nécessaire.
- ❖ **Phase de planification :** Pour identifier les actions alternatives à prendre.
- ❖ **Phase de décision :** Pour prendre une décision entre les actions candidates en choisissant la meilleure d'entre elles.
- ❖ **Phase d'action :** Pour permettre de lancer les processus sélectionnés.
- ❖ **Phase d'apprentissage:** Afin de s'informer à partir de l'expérience acquise à travers l'observation de l'environnement.

I.3.8 Composantes de la radio cognitive

Les différentes composantes d'un émetteur/récepteur radio cognitive qui mettent en œuvre ces fonctionnalités sont présentées dans la figure I.6.

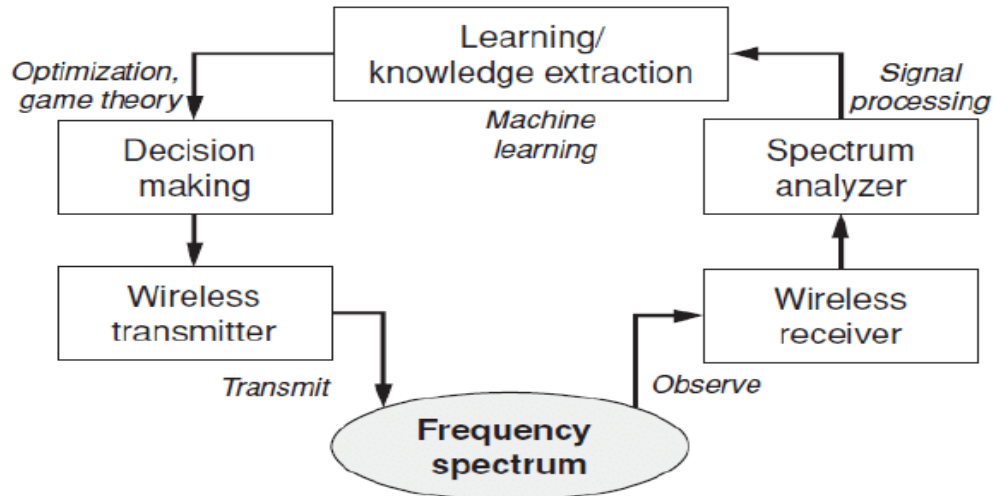


Figure I.6: Composantes de la radio cognitive [6].

Emetteur / Récepteur: Un émetteur/récepteur SDR sans fil est le composant majeur avec les fonctions du signal de transmission de données et de réception. En outre, un récepteur sans fil est également utilisé pour observer l'activité sur le spectre de fréquence (spectre de détection). Les paramètres émetteur/récepteur dans le nœud de la radio cognitive peuvent être modifiés dynamiquement comme dicté par les protocoles de couche supérieure [2].

Analyseur de spectre: L'analyseur de spectre utilise les signaux mesurés pour analyser l'utilisation du spectre (par exemple pour détecter la signature d'un signal provenant d'un utilisateur primaire (PU ou Primary User) et trouver les espaces blancs du spectre pour les utilisateurs secondaires (SU ou Secondary User)). L'analyseur de spectre doit s'assurer que la transmission d'un utilisateur primaire n'est pas perturbée si un utilisateur secondaire décide d'accéder au spectre. Dans ce cas, diverses techniques de traitement du signal peuvent être utilisées pour obtenir des informations sur l'utilisation du spectre [2].

Extraction de connaissances et apprentissage: L'apprentissage et l'extraction de connaissances utilisent les informations sur l'utilisation du spectre pour comprendre l'environnement ambiant RF (par exemple le comportement des utilisateurs sous licence). Une base de connaissances de l'environnement d'accès au spectre est construite et entretenue, qui est ensuite utilisée pour optimiser et adapter les paramètres de transmission pour atteindre l'objectif désiré sous diverses contraintes. Les algorithmes d'apprentissage peuvent être appliqués pour l'apprentissage et l'extraction de connaissances [2].

Prise de décision: Après que la connaissance de l'utilisation du spectre soit disponible, la décision sur l'accès au spectre doit être faite. La décision optimale dépend du milieu ambiant, elle dépend du comportement coopératif ou compétitif des utilisateurs secondaires. Différentes techniques peuvent être utilisées pour obtenir une solution optimale [2].

I.3.9 Fonctions de la radio cognitive

I.3.9.1 Détection du spectre (Spectrum sensing)

Il s'agit de la fonctionnalité de base de la RC. Elle vise à détecter les portions de spectre vides des utilisateurs sous licence, elle consiste à :

- Détecter le spectre non utilisé.
- Partager le spectre sans interférence avec d'autre utilisateur.

L'objectif de cette fonctionnalité est de détecter des interférences pour obtenir l'état du spectre (libre ou occupé) par l'utilisateur secondaire.

I.3.9.2 Gestion du spectre (Spectrum management)

L'objectif de cette fonctionnalité est de capturer la bande de fréquence disponible pour répondre aux besoins de communication des utilisateurs avec des fonctions classées comme suit :

- **Analyse du spectre :**

Analyser les résultats de la détection du spectre pour estimer la qualité du spectre (la disponibilité de ses espaces blancs, sa durée moyenne, etc.).

- **Décision sur le spectre**

- **Modèle de décision:** La prise de décision pour l'accès au spectre dépend des résultats de l'analyse du spectre afin de Partager les portions de spectre détectés avec d'autres utilisateurs ou la coexistence avec eux sur la même bande de fréquence [1].
- **Compétition / coopération dans un environnement multi utilisateurs:** Dans un environnement non-coopératif, chaque utilisateur a son propre objectif, tandis que dans un environnement coopératif, tous les utilisateurs peuvent collaborer pour atteindre un seul objectif. Par exemple, plusieurs utilisateurs secondaires peuvent entrer en compétition les uns avec les autres pour accéder au spectre (par exemple, O1, O2, O3, O4 dans la figure I.7) de sorte que leur débit individuel soit maximisé. Au cours de cette opération, tous veillent à ce que l'interférence causée à l'utilisateur primaire est maintenue en dessous d'un seuil prédéfini [10].

Dans un environnement coopératif, les RCs coopèrent les unes avec les autres pour prendre une décision pour accéder au spectre et maximiser une fonction objective commune en tenant compte des contraintes. Dans un tel scénario, un contrôleur central peut coordonner la gestion du spectre.

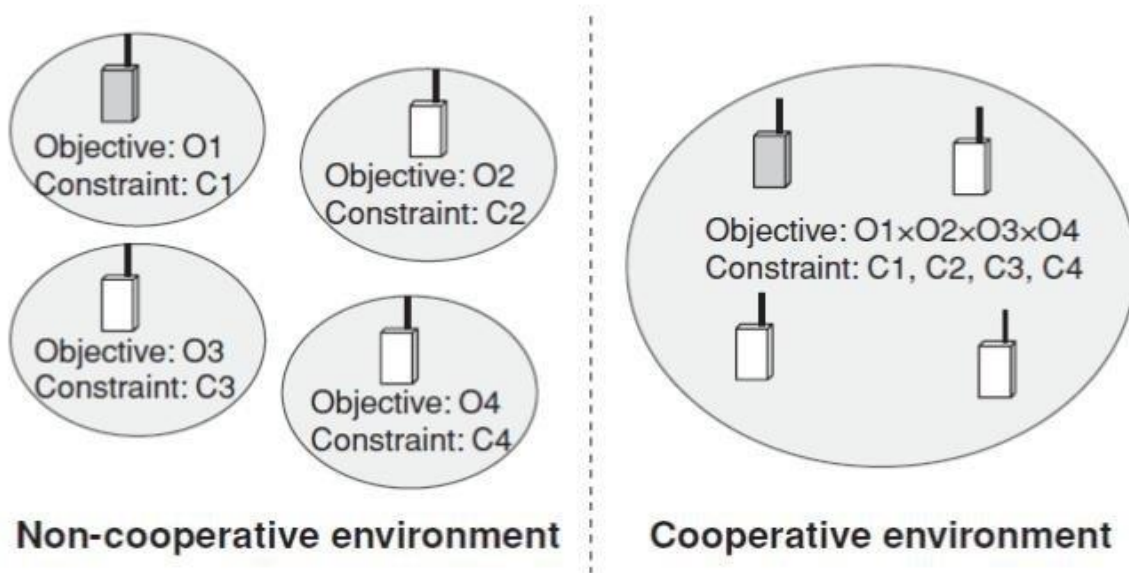


Figure I.7: Accès coopératif et non coopératif au spectre [11].

I.3.10 Architecture de réseaux de radio cognitive

Un réseau de radio cognitive coordonne les transmissions suivant différentes bandes de fréquences et différentes technologies en exploitant les bandes disponibles à un instant donné et à un endroit donné. Il a besoin d'une station de base capable de travailler sur une large gamme de fréquences afin de reconnaître différents signaux présents dans le réseau et se reconfigurer intelligemment [11]. Il comprend des réseaux primaires et des réseaux secondaires.

- ❖ **Le réseau primaire :** Se compose généralement d'un ou plusieurs PU et d'une ou plusieurs stations de base primaires. Les PUs disposent d'une licence et sont autorisés à utiliser la plage qui leur a été attribuée à n'importe quel moment, les PUs sont coordonnés par les stations de base primaires. Ils communiquent entre eux via la station de base uniquement. En général, les PUs ainsi que les stations de base primaires n'ont pas de propriétés dites cognitives [12].
- ❖ **Le réseau secondaire :** Celui qu'on nomme réseau de radios cognitives ou réseau non-licencié. Il ne dispose pas de licence pour opérer sur la bande spectrale. D'où la nécessité d'une multitude de fonctionnalités supplémentaires de manière à pouvoir répartir les bandes spectrales licenciées de façon opportuniste [13].

Les éléments qui forment les réseaux de radio cognitive (RRC) sont représentés dans la Figure I.8.

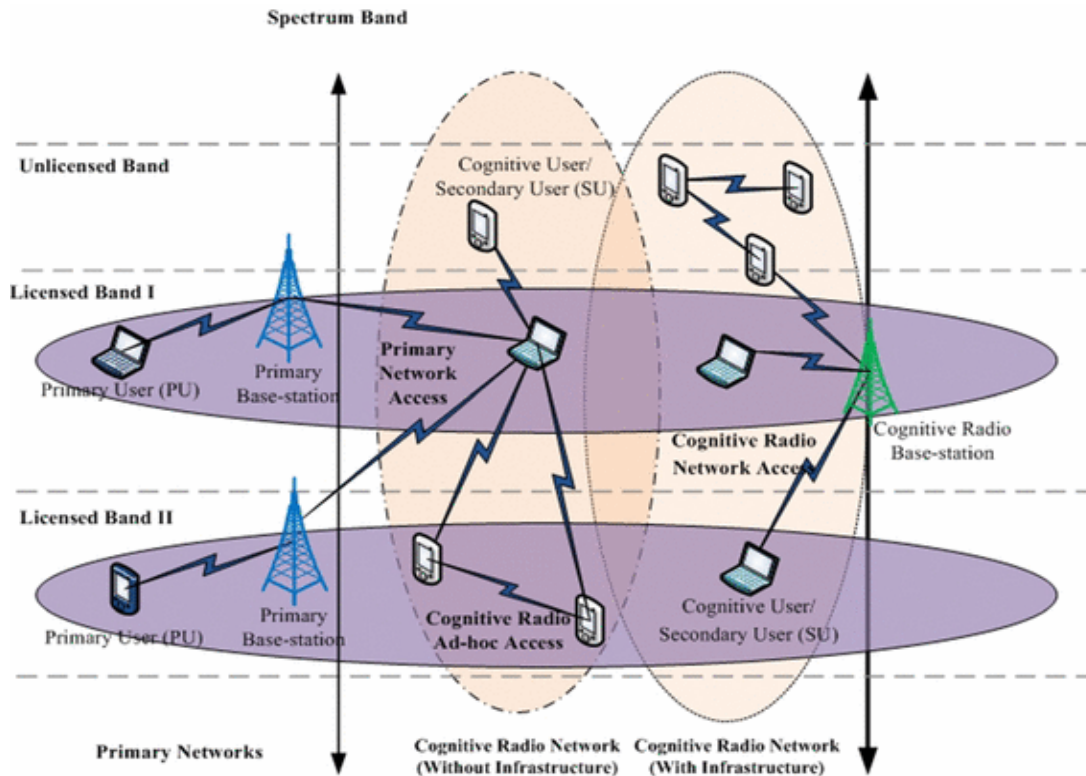


Figure I.8 : Coexistence entre deux types de réseau : primaire et secondaire [14].

I.3.11 Domaines d'application de la radio cognitive

Parmi les domaines d'application de la radio cognitive, on peut citer :

- **Les réseaux sans fil de prochaine génération** : La RC est apparue comme une technologie clé pour la prochaine génération des réseaux sans fil hétérogènes.
- **Coexistence de différentes technologies sans fil** : La RC est une solution fournissant la coexistence de différentes technologies sans fil.
- **Services de cyber santé (eHealth services)** : Dans ce cas, les équipements et appareils utilisent la transmission RF. L'utilisation du spectre doit être choisie avec soin pour éviter toute interférence, donc les concepts de la radio peuvent être appliqués.
- **Réseaux d'urgence** : Les réseaux d'urgence peuvent profiter des concepts de la RC pour fournir la fiabilité et la flexibilité de communication sans fil.
- **Réseaux militaire** : Les paramètres de la radiocommunication sans fil peuvent être adaptés de manière dynamique dépendant du temps et de l'emplacement.

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit un des problèmes majeurs rencontrés aujourd'hui dans la gestion des réseaux de télécommunications sans fil, il s'agit de la rareté du spectre. À cet effet, nous nous sommes intéressés au concept d'accès dynamique au spectre qui représente la solution au problème de la pénurie du spectre, ainsi qu'à sa mise en œuvre à travers la technologie de la radio cognitive. Cette dernière se définit comme étant une radio capable de s'adapter à son environnement RF, tout en respectant le cadre réglementaire contrôlant l'accès au spectre, et en assurant la qualité de service espérée par l'utilisateur.

Le chapitre suivant sera consacré aux systèmes multi-agents en se focalisant sur les modèles d'interaction entre les agents ainsi sur les plateformes de SMA en particulier JADE qui sera utilisé pour la réalisation de notre application.

CHAPITRE II

Les systèmes multi-agents

II. CHAPITRE II: Les systèmes multi-agents

II.1 Introduction

Les systèmes multi-agents (SMA) ont suscité un intérêt considérable dans les travaux de recherche récents en tant qu'outil permettant de résoudre des problèmes complexes en les décomposant en petites tâches après en les distribuant aux agents. Tel qu'un agent peut percevoir, communiquer, prendre des décisions, agir et réagir dans son environnement.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les systèmes multi-agents ainsi que leurs plateformes ; en particulier la plateforme JADE.

II.2 Historique

L'approche multi-agents se situe au carrefour de nombreuses disciplines. Les deux plus importantes sont l'intelligence artificielle distribuée (IAD) qui a pour objet de réaliser des organisations de systèmes capables de résoudre des problèmes par le biais d'un raisonnement le plus généralement fondé sur une manipulation de symboles, et la vie artificielle (ou VA) qui cherche à comprendre et à modéliser des systèmes doués de vie, c'est-à-dire capable de survivre, de s'adapter et de se reproduire dans un milieu parfois hostile [15].

L'IAD est un sous-domaine de l'intelligence artificielle qui s'occupe des situations où plusieurs systèmes interagissent pour résoudre un problème commun. Elle se divise en trois branches :

- **Résolution distribuée de problèmes (RDP):** Elle s'intéresse à la manière de diviser un problème particulier sur un ensemble d'entités distribuées et coopérants. Elle étudie aussi comment distribuer des compétences au niveau de chaque entité du système, de façon à ce qu'il soit globalement plus compétent que chacune de ses parties.
- **Intelligence artificielle parallèle (IAP) :** Elle concerne le développement de langages et d'algorithmes parallèles pour l'IAD. L'IAP vise l'amélioration des performances des systèmes d'intelligence artificielle sans, toutefois, s'intéresser à la nature du raisonnement ou au comportement intelligent d'un groupe d'agents..
- **Les systèmes multi-agents (SMA):** Ils traitent le comportement d'un ensemble d'agents autonomes qui essaient de résoudre un problème commun.

II.3 Notion d'agent

II.3.1 Définition

Dans la littérature on trouve plusieurs définitions du terme agent. Elles se ressemblent toutes, mais diffèrent selon le type d'application pour laquelle est conçu l'agent. Dans ce qui suit, nous allons citer les définitions les plus connues :

- Un agent est une entité physique ou virtuelle qui est capable d'agir dans un environnement, qui peut communiquer directement avec d'autres agents, qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction). L'agent possède des ressources propres, qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement, qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune), qui possède des compétences et offre des services, qui peut éventuellement se reproduire, dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit [15].
- Un agent est un système informatique, situé dans un environnement, et qui agit d'une façon autonome et flexible pour atteindre les objectifs pour lesquels il a été conçu [16].

II.3.2 Propriétés d'un agent

Les chercheurs en intelligence artificielle s'accordent sur la nécessité de l'existence de quelques propriétés pour qu'on puisse parler d'agents intelligents. Voici les cinq propriétés d'un agent intelligent [7].

- ❖ **Autonome:** Agir sans l'intervention directe d'un humain (ou d'un autre agent) en contrôlant ses actions et son état interne.
- ❖ **Proactif :** Capable d'avoir un comportement opportuniste, dirigé par ses buts ou sa fonction d'utilité, et prendre des initiatives au moment approprié.
- ❖ **Flexible:** Capable de répondre à temps.
- ❖ **Social :** Capable d'interagir avec les autres agents (artificiels ou humains).
- ❖ **Situé :** Recevoir des entrées sensorielles provenant de son environnement et ainsi effectuer des actions qui sont susceptibles de changer cet environnement.

II.3.3 Types d'agent

En fonction de la taille d'un agent, de sa complexité, de ses connaissances et de son raisonnement, nous pouvons classer les agents en deux grandes catégories : cognitif et réactif.

II.3.3.1 Les agents cognitifs

Ce type d'agents dispose d'une capacité de raisonnement et d'exécution de tâches complexes sur une base de connaissances et d'une aptitude relative à la gestion des interactions avec les autres agents et avec l'environnement. La figure II.2 illustre le fonctionnement d'un agent cognitif.

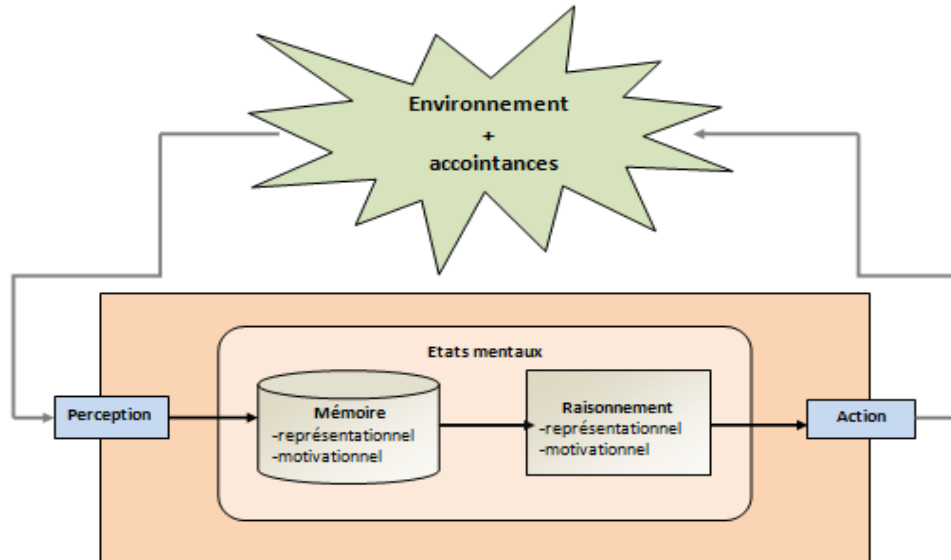


Figure II.1: Agent Cognitif [17].

II.3.3.2 Les agents réactifs

Il s'agit d'agents passifs qui réagissent seulement à un stimulus. Ce type d'agent ne dispose pas de module de raisonnement interne. Il ne possède pas, non plus, une représentation complète de son environnement. Il n'est pas capable de tenir compte de ses actions passées. La figure II.3 illustre le fonctionnement d'un agent réactif.

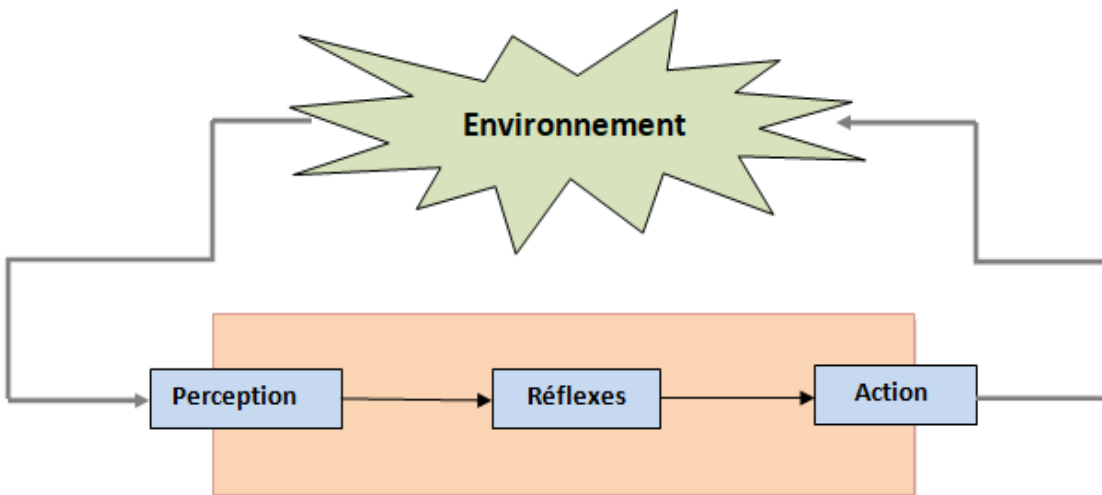


Figure II.2: Agent réactif [17].

Un autre type d'agents appelé « agent hybride » apportant une réponse aux imperfections des deux types précédents a été proposé ensuite dans la littérature.

II.4 Les systèmes multi agents

II.4.1 Définition

Un système multi-agents (SMA) est un système composé d'un ensemble d'agents autonomes qui interagissent, communiquent et coopèrent pour résoudre collectivement un problème ou élaborer une expertise dans l'intervention d'un externe au système afin d'atteindre leurs objectifs.

Ferber [15] donne la définition suivante : Un système multi-agent est un système composé des éléments suivants:

- ❖ **Un environnement** : C'est à dire un espace disposant généralement d'une métrique.
- ❖ **Un ensemble d'objets** : Situés dans l'espace, ils sont passifs, ils peuvent être perçus, détruits, créés et modifiés par les agents.
- ❖ **Un ensemble d'agents** : Qui sont les entités actives du système.
- ❖ **Un ensemble de relations** : Qui unissent les objets entre eux.
- ❖ **Un ensemble d'opérations** : Permettant aux agents de percevoir, de détruire, de créer, de transformer et de manipuler les objets.
- ❖ **Un ensemble d'opérateurs** : Chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification.

D'après [18], un système multi-agents est un système distribué composé d'un ensemble d'agents. L'interaction entre ces agents se présente sous forme de coopération, coordination, compétition, négociation, concurrence, etc. Chaque agent du système possède généralement un certain point de vue sur son environnement et les autres agents qui l'entourent.

II.4.2 Caractéristiques des SMAs

Un SMA a une vision locale et décentralisée. Tout d'abord, chaque agent est soigneux de ses connaissances et de son comportement (autonomie), mais aussi de l'organisation qu'il a mise en place avec les autres agents. Deuxièmement, on s'efforce d'éliminer tout contrôle central. Les tâches à effectuer et les compétences pour effectuer cette opération sont réparties entre les agents. Un SMA peut-être :

- ❖ **Ouvert** : Les agents y entrent et en sortent librement.
- ❖ **Fermé** : L'ensemble d'agents reste le même.
- ❖ **Homogène** : Tous les agents sont construits sur le même modèle.
- ❖ **Hétérogène** : Des agents de modèles différents, de granularité différentes.

II.4.3 Utilisation d'un SMA

Les SMAs sont utilisés en général lorsque le problème est trop complexe mais décomposable pour être résolu par un seul système à cause de quelques limitations logicielles ou matérielles. Aussi quand le problème proposé n'a pas de solution générale ou qu'elle est trop coûteuse en CPU. Pour qu'un SMA soit efficace, il faut que plusieurs agents travaillent en même temps (paralléliser le problème), ce qui réduit le temps de résolution vu la vitesse utilisée qui est due principalement au parallélisme.

II.4.4 Domaines d'applications des SMA

Un SMA est généralement adapté au développement de systèmes complexes et de systèmes distribués et hétérogènes, où la solution est le résultat de l'interaction de plusieurs entités. Par conséquent, plusieurs domaines sont considérés comme des domaines d'application idéals. Bien entendu, il est difficile d'énumérer tous les domaines d'application des SMAs. Donc, nous choisissons de citer quelques domaines comme : les systèmes manufacturiers, les systèmes financiers, les loisirs, les télécommunications, le contrôle-commande, les systèmes embarqués, la recherche d'information, la gestion des bases de données, la robotique distribuée, les systèmes distribués, les IHM et le diagnostic médical...

II.4.5 Les types d'interaction dans les SMAs

Une des principales propriétés de l'agent dans un SMA est celle d'interagir avec les autres agents. Ces interactions sont généralement définies comme toute forme d'action exécutée au sein du système d'agents et qui a pour effet de modifier le comportement d'un autre agent.

Ferber [15] définit les interactions comme étant la mise en relation dynamique de deux ou plusieurs agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproques. L'interaction entre agents s'effectue par la communication, les actes de langages et les protocoles d'interaction. Les agents interagissent entre eux. Pour atteindre son objectif ou pour améliorer la coordination des actions.

Les interactions inter-agents et la manière dont celles-ci sont organisées permettent aux agents de se coordonner, de coopérer ou encore de négocier. Les types courants d'interaction incluent la coopération (travailler ensemble à la résolution d'un but commun); la coordination (organiser la résolution d'un problème de telle sorte que les interactions nuisibles soient évitées ou que les interactions bénéfiques soient exploitées); et la négociation (parvenir à un accord acceptable pour toutes les parties concernées).

II.4.5.1 La coordination

La coordination se traduit par un comportement individuel visant à servir ses propres intérêts tout en essayant de satisfaire le but global du système. Elle est caractérisée par deux aspects étroitement liés, à savoir les engagements et les conventions. Les engagements fournissent la structure nécessaire pour des interactions prévisibles. Pendant que les situations changent, les

agents doivent évaluer si les engagements existants sont encore valides. Les conventions fournissent des moyens pour contrôler les engagements dans des circonstances changeantes [19].

II.4.5.2 La coopération

On dit que deux agents sont en situation de coopération si les conditions suivantes surviennent :

- ❖ Ils poursuivent chacun des buts qui peuvent entrer en interférence, soit au niveau des résultats, soit au niveau des procédures.
- ❖ Ils font en sorte de traiter ces interférences pour que les activités de chacun soient réalisées de façon à faciliter la réalisation de celles de l'autre ou la réalisation de la tâche commune (si elle existe).

Les protocoles de coopération consistent à décomposer un problème en tâches puis à les distribuer. Cette approche a l'avantage de réduire la complexité d'un problème. Mais il risque d'avoir des interactions entre les tâches et par conséquent des conflits entre les agents. Il existe plusieurs mécanismes pour distribuer les tâches. On cite les mécanismes d'élection où les tâches sont attribuées à des agents suite à un accord ou un vote, les réseaux contractuels où des tâches sont attribuées aux agents suite à des cycles d'appels d'offres ou de propositions.

II.4.5.3 La négociation

Les protocoles de négociation sont utilisés dans le cas où les agents ont des buts différents. Les dispositifs principaux de la négociation sont : le langage utilisé (il s'agit d'étudier les primitives de communication pour la négociation, leur sémantique et leur usage dans les protocoles) , le protocole suivi dans le principe de négociation et la procédure de décision que chaque agent utilise pour déterminer ses positions, ses concessions et ses critères pour l'accord.

La négociation joue un rôle fondamental dans les activités de coopération en permettant aux personnes de résoudre des conflits qui pourraient mettre en péril des comportements coopératifs.

II.4.6 Les plateformes de SMAs

Il existe une multitude de plateformes multi agents dédiées à différents modèles d'agent. Les plateformes fournissent une couche d'abstraction permettant de facilement implémenter les concepts des systèmes multi agents. D'un autre côté, elle permet aussi le déploiement de ces systèmes. Ainsi, elles constituent un réceptacle au sein duquel les agents peuvent s'exécuter et évoluer. En effet, les plates-formes sont un environnement permettant de gérer le cycle de vie des agents et dans lequel les agents ont accès à certains services.

Parmi les plateformes les plus connus il y a Madkit, Mason, NetLogo et Gama. Cependant, ces plateformes n'intègrent pas de mécanismes de parallélisme, il est nécessaire de développer une sur-couche à la main, pour distribuer ou paralléliser une simulation [7].

Un autre type de plateformes multi-agents prennent en compte nativement le parallélisme comme RepastHPC, D-Mason, Pandora, FLAME et JADE (Java Agent DEvelopment) [7]. Cette dernière est utilisée pour la réalisation de notre application [7].

II.4.6.1 Plateforme JADE

JADE est une plate-forme multi-agents créée par le laboratoire TILAB. Elle permet le développement de systèmes multi-agents. Elle est implémentée entièrement en JAVA.

Un agent selon JADE est conforme au standard FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents), possède un cycle de vie, possède un ou plusieurs comportements (Behaviours), communique avec des messages de type Agent Communication Language (ACL) et rend des services. Un agent est identifié de manière globale par un nom unique (l'Agent Identifier ou AID).

Chaque instance de JADE est appelée conteneur et peut contenir plusieurs agents. Ainsi, un ensemble de conteneurs constitue une plateforme et chaque plateforme doit contenir un conteneur spécial appelé main-container et tous les autres conteneurs s'enregistrent auprès de celui-là dès leur lancement.

Le main-container se distingue des autres conteneurs car il contient toujours deux agents spéciaux appelés AMS (Agent Management System) et DF (Director Facilitator) qui se lancent automatiquement avec le main-container.

❖ Les contenants de plateforme JADE

Un environnement d'exécution : l'environnement où les agents peuvent vivre. Il doit être activé pour pouvoir lancer les agents.

Une librairie de classes : que les développeurs utilisent pour écrire leurs agents. Une suite d'outils graphiques qui facilitent la gestion et la supervision de la plateforme des agents.

Les agents de base de Jade : Jade compte quelques agents de base indispensables pour le bon fonctionnement de la plateforme. Ces agents sont montrés dans le tableau II.1.

Tableau II.1: Les Types d'agent dans JADE [20].

Agent	Signification	Description	Indispensable
AMS	Agent Management System	L'agent qui gère l'ensemble de la plateforme	Oui
DF	Directory Facilitator	L'agent représentant la mémoire de la plateforme	Oui
RMA	Remote Management Agent	L'agent fournissant une interface graphique pour la gestion de la plateforme	Non

La plateforme contient également d'autres modules tels que :

❖ **Dummy Agent**

L'outil « Dummy Agent » permet aux utilisateurs d'interagir avec les agents JADE d'une façon particulière. L'interface permet la composition et l'envoi de messages ACL et maintient une liste de messages ACL envoyés et reçus. Cette liste peut être examinée par l'utilisateur et chaque message peut être vu en détail ou même édité. Plus encore, le message peut être sauvegardé sur le disque et renvoyé plus tard.

❖ **Sniffer Agent**

Quand un utilisateur décide d'épier un agent ou un groupe d'agents, il utilise un agent Sniffer. Chaque message partant ou allant vers ce groupe est capté et affiché sur l'interface du sniffer. L'utilisateur peut voir et enregistrer tous les messages, pour éventuellement les analyser plus tard..

❖ **Introspector Agent**

Cet agent permet de gérer et de contrôler le cycle de vie d'un agent s'exécutant et de la file de ses messages envoyés et reçus.

II.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une brève description des concepts de base des systèmes multi-agents qui présentent un domaine très ouvert pour la recherche. Nous nous sommes focalisés en particulier sur la description des agents ainsi que sur leurs interactions. Le chapitre présente également quelques plateformes d'agents en se focalisant sur la plateforme JADE.

Le chapitre suivant présente notre contribution dans le cadre de ce PFE.

CHAPITRE III

Implémentation de l'application et évaluation des résultats obtenus

III. Chapitre III : Implémentation de l'application et évaluation des résultats obtenus

III.1 Introduction

Dans le cadre de ce travail, nous visons à optimiser la QoS des utilisateurs dans un réseau de radio cognitive se basant sur l'OFDM. Pour réaliser cette tâche, nous avons utilisé une des méthodes de la décision multicritère qui est la méthode TOPSIS.

Nous avons également évalué sur quatre applications différentes qui sont : l'audio de haute qualité, l'Email, la visioconférence et la transaction. Les critères qui ont été évalués avec TOPSIS sont le débit, la puissance, le taux d'erreur et les interférences. Nous avons aussi utilisé la technique des coalitions en se basant sur un agent CSU dont l'objectif est de gérer un ensemble de SUs.

III.2 Technique de transmission par répartition orthogonale de fréquences (OFDM)

III.2.1 Historique

L'OFDM est une technique de transmission de données qui a apparue depuis les années 60, et délaissée lors du développement de la théorie de l'égalisation pour les systèmes mono-porteuses (de moindre complexité).

Le retour de l'OFDM a été effectif vers le milieu des années 80 dans le cadre du projet de la radio diffusion numérique (digital audio broadcasting ou DAB).

III.2.2 Notion d'orthogonalité

La technique OFDM distribue les données sur un grand nombre de porteuses qui sont espacées à des fréquences précises égale à $1/T$ (Hz). Cet espacement fournit « l'orthogonalité » dans cette technique qui empêche les démodulateurs de voir des fréquences autres que les leurs.

La figure III.1 montre la transmission orthogonale des fréquences.

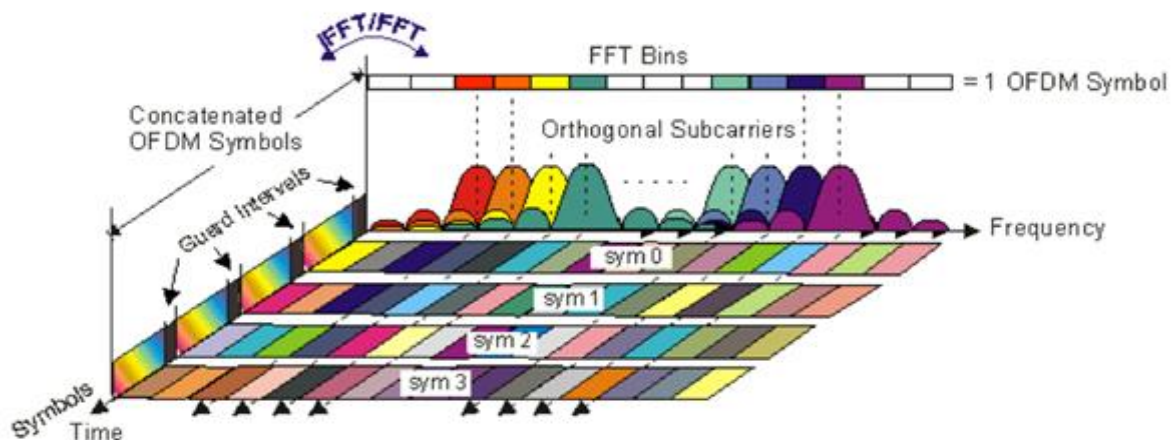


Figure III.1 : Transmission des fréquence orthogonale [21].

L'orthogonalité se traduit par la durée de la transmission d'un symbole qui est inversement proportionnelle à l'espacement entre sous-porteuses. Ainsi, si les sous-porteuses sont espacées de 15 kHz, la durée de la transmission d'un symbole est de $66,67 \mu\text{s}$ ($1/15 \text{ kHz}$).

Le bloc de données à transmettre est une suite binaire. La modulation OFDM permet de faire une modulation M-QAM sur chacune des porteuses.

A titre d'exemple, pour une modulation 64-QAM, 6 bits sont modulés par sous-porteuse. Les 6 bits forment un symbole.

III.2.3 Avantages de l'OFDM

Les transmissions à partir d'appareils cognitifs peuvent utiliser l'OFDM, cette dernière présente plusieurs avantages par rapport à l'approche de la transmission utilisant une seule porteuse. Parmi ses avantages :

❖ Réduction d'interférence - efficacité de la bande passante

En OFDM, plusieurs bits peuvent être envoyés en parallèle, ou en même temps, dans des canaux de sous-porteuse séparés. Cela permet au débit de données de chaque sous-porteuse d'être inférieur à ce qui serait requis par une seule porteuse de bande passante similaire. Par conséquent, le système devient moins sensible aux interférences et permet une bande passante de données plus efficace.

❖ Vitesses inférieures - Détection plus facile

Les multiples sous porteuses permettent au récepteur de détecter plus facilement les signaux dans des environnements à trajets multiples et autres interférences. De plus, chaque sous-porteuse peut transmettre un signal à vitesse réduite, qui sont tous agrégés du côté réception dans le signal à grande vitesse d'origine. Les signaux à plus faible vitesse sont également plus facilement déchiffrés à l'extrémité de réception.

III.2.4 Principe de fonctionnement

Dans ce PFE et en se basant sur le travail réalisé dans [22], nous considérons que le PU et le SU partagent des bandes de fréquences adjacentes comme illustré sur la figure III.2, où le PU occupe la bande de fréquence centrale, tandis que les bandes de fréquences libres détectées par le SU sont divisées en N sous-porteuses, les deux moitiés qui se situent de part et d'autre de la bande exploitée par le PU.

Nous supposons également que le SU détecte périodiquement le spectre de PU afin d'identifier les bandes libres pour sa transmission.

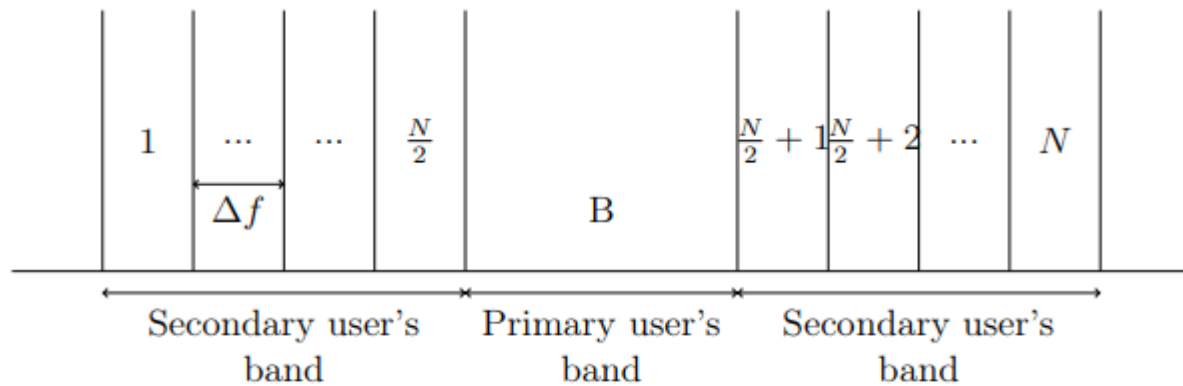


Figure I.2 : Exemple de partage de spectre entre PU et SU dans un système de communication multi-porteuse [22].

Chaque sous-porteuse est caractérisée par son débit binaire, sa puissance d'émission, son niveau d'interférence et son taux d'erreur. Ces paramètres sont choisis en raison de leur dépendance à la QoS.

Un canal peut être sélectionné pour la transmission en fonction du type d'application utilisée par le SU lors de la transmission. Dans notre cas, on a utilisé 4 types d'applications : l'audio de haute qualité, la visioconférence, l'Email et la transaction. Chaque application présente un besoin pour un taux élevé ou minimal des caractéristiques citées des sous-porteuses, qui seront évaluées par la suite à l'aide de la méthode TOPSIS pour assurer la sélection de la meilleure sous-porteuse disponible pour le SU.

III.3 Méthode d'optimisation multicritères TOPSIS

III.3.1 Définition et origine

La technique d'ordre de préférence par similarité à la solution idéale (TOPSIS) est une méthode d'analyse décisionnelle multicritères, qui a été initialement développée par Ching-Lai Hwang et Yoon en 1981 [23] avec des développements ultérieurs par Yoon en 1987 [24].

III.3.2 Principe de TOPSIS

TOPSIS est basée sur le concept selon lequel la solution choisie doit avoir la distance la plus courte de la solution idéale et la distance la plus longue de la solution anti-idéale.

❖ Solutions Idéale et Anti-Idéale

- Solution Idéale: $A^* = \{g_1^*, \dots, g_j^*, \dots, g_n^*\}$
avec g_j^* la meilleure valeur pour le $j^{\text{ème}}$ critère parmi toutes les actions.
- Solution Anti-Idéale $A' = \{g_1', \dots, g_j', \dots, g_n'\}$.
avec g_j' la plus mauvaise valeur pour le $j^{\text{ème}}$ critère parmi toutes les actions [7].

❖ Matrice de décision

Elle se compose de m alternatives (solutions) et de n attributs (critères).

Soit x_{ij} le poids de l'option i par rapport au critère j .

$$D = \begin{matrix} & x_1 & x_2 & x_3 & \cdots & x_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \left| \begin{matrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \cdots & x_{2n} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \cdots & x_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{m3} & \cdots & x_{mn} \end{matrix} \right. \end{matrix}$$

III.3.3 Algorithme TOPSIS

La figure III.3 décrit les différentes étapes de l'algorithme TOPSIS:

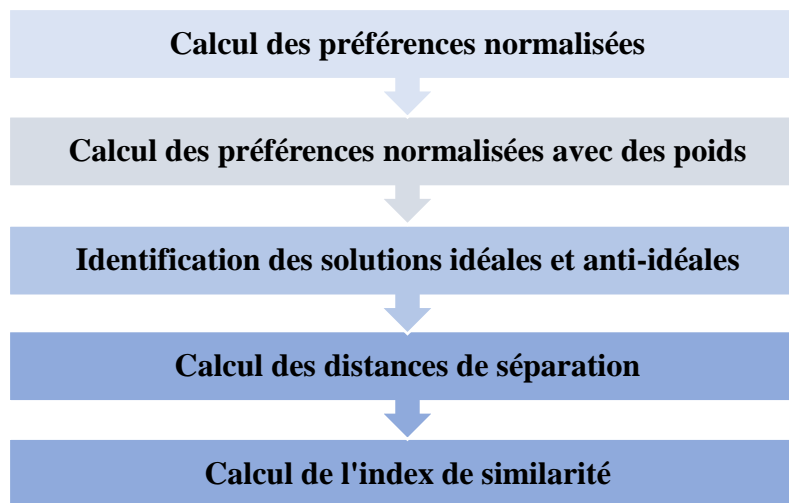


Figure III.3: Les étapes de l'algorithme TOPSIS.

Étape 01 : Calcul des préférences normalisées (normalized ratings).

La valeur normalisée est calculée comme suit :

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m x_{ij}^2}} \quad i = 1 \dots m, j = 1 \dots n.$$

Étape 02 : Calcul des préférences normalisées avec des poids associés aux critères.

La construction d'une matrice normalisée et pondérée.

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & \cdots & v_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & \cdots & v_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & \cdots & w_n r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 r_{m1} & \cdots & w_n r_{mn} \end{bmatrix}$$

$$V_j(x_i) = w_j r_j(x_i) \quad i=1, \dots, m, j=1, \dots, n.$$

$w_j = \{ w_1, w_2, \dots, w_n \}$: L'ensemble des poids associés aux critères.

Étape 03 : Identification des solutions idéales et anti-idéales.

$$A^* = \{V_1^*, \dots, V_j^*, \dots, V_n^*\}, \quad \text{où} \quad V_j^* \{(\max(V_{ij})/j \in J_1), (\min(V_{ij})/j \in J_2)\}.$$

$$A' = \{V_1', \dots, V_j', \dots, V_n'\}, \quad \text{où} \quad V_j' \{(\min(V_{ij})/j \in J_1), (\max(V_{ij})/j \in J_2)\}.$$

J₁ : ensemble des critères de bénéfice. **J₂** : ensemble des critères de coût.

Étape 04 : Calcul des distances de séparation.

Distance idéale :

$$d_j^* = \sqrt{\{\sum_{i=1}^n (v_{ij}^* - v_{ij})^2\}}, \quad j=1, \dots, m$$

$$d_j' = \sqrt{\{\sum_{i=1}^n (v_{ij}' - v_{ij})^2\}}, \quad j=1, \dots, m$$

Étape 05 : Calcul de l'indice de similarité à la solution idéale.

$$C(x_i) = \frac{d'(x_i)}{(d^*(x_i) + d'(x_i))} \quad 0 < C(x_i) < 1 \quad i = 1 \dots m.$$

$$C(x_i) = 1 \quad \text{Si } A(x_i) = A^* \text{ (solution idéale).}$$

$$C(x_i) = 0 \quad \text{Si } A(x_i) = A' \text{ (solution anti-idéale).}$$

III.3.4 Exemple d'utilisation de l'algorithme TOPSIS

Dans ce qui suit nous allons détailler un exemple d'utilisation de l'algorithme TOPSIS [24].

Le vecteur de poids est comme suit : Poids $(W_i) = \{0.1, 0.4, 0.3, 0.2\}$.

La matrice de décision est comme suit :

	<i>Style</i>	<i>Fiabilité</i>	<i>Carburant Eco</i>	<i>Coût</i>
<i>Civic</i>	7	9	9	8
<i>Saturn</i>	8	7	8	7
<i>Ford</i>	9	6	8	9
<i>Mazda</i>	6	7	8	6

Étape 1: Calculer $\sqrt{\sum_{j=1}^m x_{ij}^2}$ pour chaque colonne, puis diviser chaque x_{ij} de la matrice de décision sur la valeur calculée de sa colonne pour obtenir r_{ij} .

	Style	Fiabilité	Carburant Eco	Cout
Civic	0.46	0.61	0.54	0.53
Saturn	0.53	0.48	0.48	0.46
Ford	0.59	0.41	0.48	0.59
Mazda	0.40	0.48	0.48	0.40

Étape 2 : Multiplier chaque colonne par le poids associé w_j pour avoir le V_{ij} .

	Style	Fiabilité	Carburant Eco	Cout
Civic	0.046	0.244	0.162	0.106
Saturn	0.053	0.192	0.144	0.092
Ford	0.059	0.164	0.144	0.118
Mazda	0.040	0.192	0.144	0.080

Étape 3:

a) Déterminer la solution idéale A^*

$$A^* = \{0.059, 0.244, 0.162, 0.118\}$$

	Style	Fiabilité	Carburant Eco	Cout
Civic	0.046	0.244	0.162	0.106
Saturn	0.053	0.192	0.144	0.092
Ford	0.059	0.164	0.144	0.118
Mazda	0.040	0.192	0.144	0.080

b) Déterminer la solution idéale A'

$$A' = \{0.040, 0.164, 0.144, 0.080\}$$

	Style	Fiabilité	Carburant Eco	Cout
Civic	0.046	0.244	0.162	0.106
Saturn	0.053	0.192	0.144	0.092
Ford	0.059	0.164	0.144	0.118
Mazda	0.040	0.192	0.144	0.080

Étape 4:

a) Distance idéale

$$A^* = \{0.059, 0.244, 0.162, 0.118\}$$

$$d_j^* = \sqrt{\{\sum_j^i (v_j^* - v_{ij})^2\}} \text{ pour chaque colonne } j.$$

	Style	Fiabilité	Carburant Eco	Cout
Civic	$(0.046 - 0.059)^2$	$(0.244 - 0.244)^2$	$(0.162 - 0.162)^2$	$(0.106 - 0.118)^2$
Saturn	$(0.053 - 0.059)^2$	$(0.192 - 0.244)^2$	$(0.144 - 0.162)^2$	$(0.092 - 0.118)^2$
Ford	$(0.059 - 0.059)^2$	$(0.164 - 0.244)^2$	$(0.144 - 0.162)^2$	$(0.118 - 0.118)^2$
Mazda	$(0.040 - 0.059)^2$	$(0.192 - 0.244)^2$	$(0.144 - 0.162)^2$	$(0.080 - 0.118)^2$

	$\sum_{i=1}^n (v_j^* - v_{ij})^2$	$S_i^* = \sqrt{\{\sum_{i=1}^n (v_j^* - v_{ij})^2\}}$
Civic	0.000313	0.01769
Saturn	0.0031316	0.05596
Ford	0.006724	0.082
Mazda	0.004829	0.06949

b) Distance anti-idéal

$$A' = \{0.040, 0.164, 0.144, 0.080\}$$

$$d_j' = \sqrt{\{\sum_j^i (v_j' - v_{ij})^2\}} \text{ pour chaque colonne } j.$$

	Style	Fiabilité	Carburant Eco	Cout
Civic	$(0.046 - 0.040)^2$	$(0.244 - 0.164)^2$	$(0.162 - 0.144)^2$	$(0.106 - 0.080)^2$
Saturn	$(0.053 - 0.040)^2$	$(0.192 - 0.164)^2$	$(0.144 - 0.144)^2$	$(0.092 - 0.080)^2$
Ford	$(0.059 - 0.040)^2$	$(0.164 - 0.164)^2$	$(0.144 - 0.144)^2$	$(0.118 - 0.080)^2$
Mazda	$(0.040 - 0.040)^2$	$(0.192 - 0.164)^2$	$(0.144 - 0.144)^2$	$(0.080 - 0.080)^2$

	$\sum_j^i (v_j' - v_{ij})^2$	$S'_i = \sqrt{\{\sum_j^i (v_j' - v_{ij})^2\}}$
Civic	0.08046	0.283
Saturn	0.001097	0.0331
Ford	0.001801	0.0000032
Mazda	0.000784	0.00000061

Étape 5: Calcul de l'indice de similarité à la solution idéale.

$$C_i^* = \frac{d'_i}{(d_i^* + d'_i)}$$

	$\frac{d'_i}{(d_i^* + d'_i)}$	=	C_i^*	→	
Civic	$\frac{0.283}{0.30069}$	=	0.94116	→	La meilleure solution
Saturn	$\frac{0.0331}{0.08906}$	=	0.37165		
Ford	$\frac{0.0000032}{0.0820032}$	=	0.000039		
Mazda	$\frac{0.00000061}{0.06949}$	=	0.0000087	→	La mauvaise solution

III.4 Environnement de développement et de simulation

III.4.1 Java

Java est à la fois un langage de programmation informatique orienté objet et un environnement d'exécution informatique portable créé par James Gosling et Patrick Naughton employés de Sun Microsystems avec le soutien de Bill Joy (cofondateur de Sun Microsystems en 1982), présenté officiellement le 23 mai 1995 au SunWorld [25].

Les applications Java peuvent s'exécuter sur n'importe quel système d'exploitation sur lequel la plate-forme Java est développée et avec le nom de technologie Java Runtime Environment (JRE). Le deuxième cas est la machine virtuelle Java (JVM). Il s'agit d'un programme qui interprète le code Java et le convertit en code natif. Cependant, le JRE inclut généralement une bibliothèque standard pour créer tous les logiciels Java. C'est la garantie de portabilité qui a fait la réussite de ce langage.

III.4.2 Netbeans

NetBeans est un environnement de développement intégré (IDE) open source pour le développement avec Java, PHP, C++ et d'autres langages de programmation. NetBeans est également appelé plate-forme de composants modulaires utilisés pour développer des applications de bureau Java.

NetBeans est codé en Java et fonctionne sur la plupart des systèmes d'exploitation avec une JVM, y compris Solaris, Mac OS et Linux.

III.4.3 JADE

JADE (Java Agent Development Framework) est une plateforme multi agents en java développée par Gruppo Telecom Italia en 1997 [1]. C'est un outil open source qui répond à la norme FIPA. Une application jade est une plateforme déployée sur une ou plusieurs machines, la plateforme héberge un ensemble d'entités de type « cognitifs », identifiés de manière unique, pouvant communiquer avec les autres agents de façon bidirectionnelle (langage de communication FIPA ACL). Chaque agent

s'exécute dans un conteneur (container) qui lui fournit son environnement d'exécution [26].

L'architecture globale de la plateforme jade se base sur :

- ❖ **AMS (Agent Management System)** : agent qui supervise les autres agents et l'accès à la plateforme, pages blanches.
- ❖ **ACC (Agent Communication Chanel)** : agent qui fournit la route pour les interactions entre agents dans et en dehors de la plateforme.
- ❖ **DF (Director Facilitator)** : agent qui fournit un service de pages jaunes.

La figure III.4 représente l'interface graphique de Jade (**Jade GUI**). Elle permet de contrôler les agents disponibles.

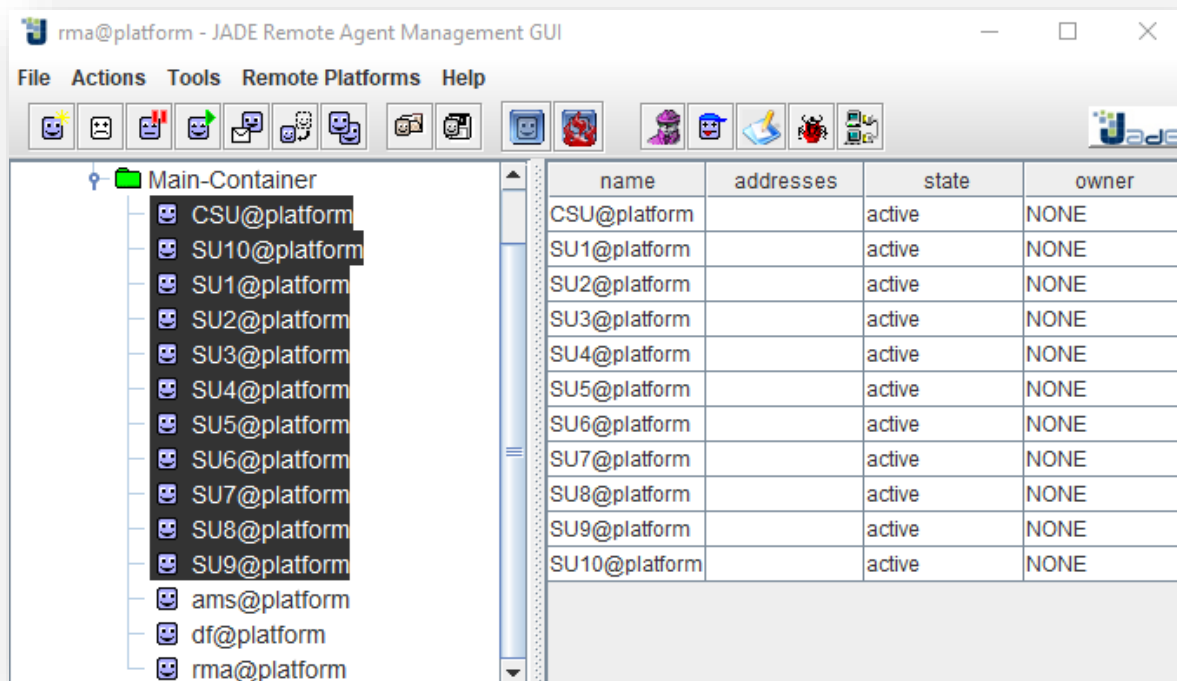


Figure I.4 : Interface graphique (jade GUI).

III.4.4 JavaFX

JavaFX est une plate-forme d'applications clientes open source de nouvelle génération pour les systèmes de bureau, mobiles et embarqués basés sur Java. Il s'agit d'un effort de collaboration entre de nombreuses personnes et entreprises dans le but de produire une boîte à outils moderne, efficace et complète pour le développement d'applications clientes riches [27].

Créée à l'origine par Sun Microsystems qui appartient désormais à Oracle. Cette bibliothèque a été conçue pour remplacer Swing et AWT, qui ont été développés à partir de la fin des années 90.

JavaFX contient des outils très divers, notamment pour les médias audio et vidéo, le graphisme 2D et 3D etc. L'API JavaFX met à disposition toute une série de classes et de classes utilitaires associées

pour afficher des graphiques de données statistiques avec une haute qualité, et qui peuvent mettre à jour immédiatement leur contenu en cas de modification des séries ou des données qu'elles contiennent via un ensemble complexe d'écouteurs [28].

III.5 Optimisation de la QoS pour l'utilisateur secondaire

En optimisation, les mesures utilisées pour évaluer la qualité de la solution sont exprimées sous la forme de critères. Par conséquent, le processus d'optimisation inclura la minimisation ou même la maximisation de ces fonctions autant que possible. Bien que la QoS soit un concept qualitatif et ait des significations quantitatives différentes pour chaque application, il est souvent dit dans le domaine des télécommunications qu'elle est liée à ce qui suit :

- Maximiser le débit.
- Minimiser la puissance.
- Minimiser le taux d'erreur.
- Minimiser les interférences.

Les expressions mathématiques normalisées pour modéliser les quatre critères ci-dessus sont les suivantes :

❖ Débit

$$Débit = \log_2(Symbol) * \frac{1}{t}$$

Où :

- **t** désigne le temps d'affichage de symbol est égale à 0.0001.
- **Symbol** désigne la modulation. Pour notre application nous avons utilisé le type QAM (Quadrature Amplitude Modulation) et pour chaque type de modulation nous avons des index (nombre de bits par symbole) 2^i avec $i \in [1,10]$ (i correspond à l'indice de modulation).

❖ Puissance

Les valeurs de la puissance d'émission ont été choisies dans le respect des règles de la FCC (Federal Communications Commission) et ne doivent en aucun cas dépasser un certain seuil même pour le PU. La plage de puissance d'émission prise varie entre 0,1 mW et 2,4808 mW, avec un pas de 0,025 mW donnant 94 valeurs de puissance.

❖ Taux d'erreur

Il existe différents types de fonctions pour mesurer le taux d'erreur ($\overline{P_{be}}$) sur les canaux. Ces fonctions sont spécifiques à chaque type de modulation utilisée. Dans notre cas, nous avons utilisé QAM [22].

$$\overline{P_{be}}(M - ary QAM) = \frac{4}{\log_2(M)} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q \left(\sqrt{\frac{3 * \log_2(M) P_i}{M - 1} \frac{1}{N}} \right)$$

La fonction présentée utilise la fonction $Q(x)$, qui représente la fonction d'erreur de Gauss, l'estimation de cette fonction est sous la forme [29] :

$$Q(x) = \frac{e^{-\frac{x^2}{2}}}{1,64x + \sqrt{0,76x^2 + 4}}$$

Avec :

- $\overline{P_{be}}$: Taux d'erreur moyen pour chaque sous-porteuse.
- P_i : Puissance du signal sur la sous-porteuse i .
- M : Indice de modulation.
- N : Indice d'atténuation.

• **Atténuation** : C'est la diminution de l'amplitude ou de la puissance d'un signal lors de sa transmission, c'est une valeur aléatoire entre 0 et 1 dB attribuée pour chaque canal et répétée pour tous les individus.

❖ Interférence

Le système utilisé avec OFDM nous permet de calculer les interférences générées par le SU à l' i ème sous-porteuse comme suit :

$$I_i(d_i, P_i) = \int_{d_i - \beta/2}^{d_i + \beta/2} |g_i|^2 \phi_i(f) df$$

Avec:

- d_i est la distance spectrale entre l' i ème sous-porteuse et la fréquence centrale de la bande du PU.
- β est la bande passante de PU.
- P_i est la puissance d'émission du SU.
- g_i est l' i ème gain de canal de sous-porteuse de la station de base au PU.

$\phi_i(f)$ est le spectre de densité de puissance de l' i ème sous-porteuse SU, il peut s'écrire comme suit :

$$\phi_i(f) = P_i T_s \left(\frac{\sin \pi f T_s}{\pi f T_s} \right)^2$$

T_s est la durée du symbole.

Pour l'implémentation de la méthode TOPSIS, nous avons utilisé les poids mentionnés dans le tableau III.1 et fournis à l'aide de la méthode AHP [30].

Tableau III.1: Pondération des types de données d'application.

	Débit	Interférence	Puissance	Taux d'erreur
Audio haute qualité	0.38	0.3	0.12	0.20
Visioconférence	0.6	0.2	0.08	0.12
Transaction	0.14	0.2	0.08	0.58
Email	0.08	0.27	0.53	0.12

Pour l'audio haute qualité et la visioconférence, le débit a le poids le plus fort car il représente le paramètre le plus pertinent pour ces deux types d'applications. Ainsi, dans la solution idéale, nous allons essayer de le maximiser. Pour la transaction, le taux d'erreur a le poids le plus fort. Ainsi, dans la solution idéale, nous allons essayer de le minimiser. Pour l'email, la puissance a le poids le plus fort. Ainsi, dans la solution idéale, nous allons essayer de la minimiser.

Pour gérer la dégradation de la QoS des différentes applications, nous avons proposé pour chaque application un seuil qui est indiqué dans le tableau III.2.

Tableau III.2 : Critères et seuils pour les quatre applications.

	Audio haute qualité	Email	Transaction	Visioconférences
Critère	Débit	puissance	Taux d'erreur	Débit
Seuil	128 Kbit	10^{-3} mW	10^{-6}	384 Kbit

III.6 Implémentation de l'application

Cette partie est consacrée au fonctionnement de notre application. Nous allons montrer les configurations utilisées ainsi que les résultats obtenus sous forme de graphes. Par la suite, nous discuterons ces résultats à travers des comparaisons effectuées avec d'autres solutions déjà implémentées auparavant.

La réalisation de cette application a été faite sous Netbeans version 8.2.0 en se basant sur JADE version 4.3.3 avec l'utilisation de langage javaFX pour créer des graphiques et des diagrammes de très bonne qualité.

III.6.1 Présentation de l'application

L'architecture de notre réseau se base sur une coalition de SUs. Nous avons donc 10 SUs et 1 seul CSU. Ce dernier contiendra les informations sur les paramètres relatifs à ces SUs. Chaque SU détiendra deux paramètres (le type d'application et le temps d'allocation), et chaque application détiendra quatre critères (le débit, l'interférence, la puissance et le taux d'erreur).

Nous allons montrer à travers notre application, la performance et l'efficacité de la méthode TOPSIS par rapport à une utilisation classique de la RC pour l'évaluation de ces quatre paramètres et cela pour chaque application étudiée.

Les interfaces suivantes présentent les différentes étapes pour paramétrer nos simulations.

❖ Interface principale

Dès le lancement de notre application, la fenêtre d'accueil illustrée dans la figure III.5 apparaît.



Figure III.5: Interface accueil.

Cette fenêtre contient deux boutons :

- « **Entrer** » pour lancer l'application.
- « **Quitter** » pour sortir sans lancer l'application.

En cliquant sur **Entrer**, l'interface de simulation s'affiche.

❖ Onglet accueil

Cet onglet permet le retour à l'interface principale.

❖ **Onglet configuration**

Il est destiné à paramétrer les SUs comme indiqué dans la figure III.6 :

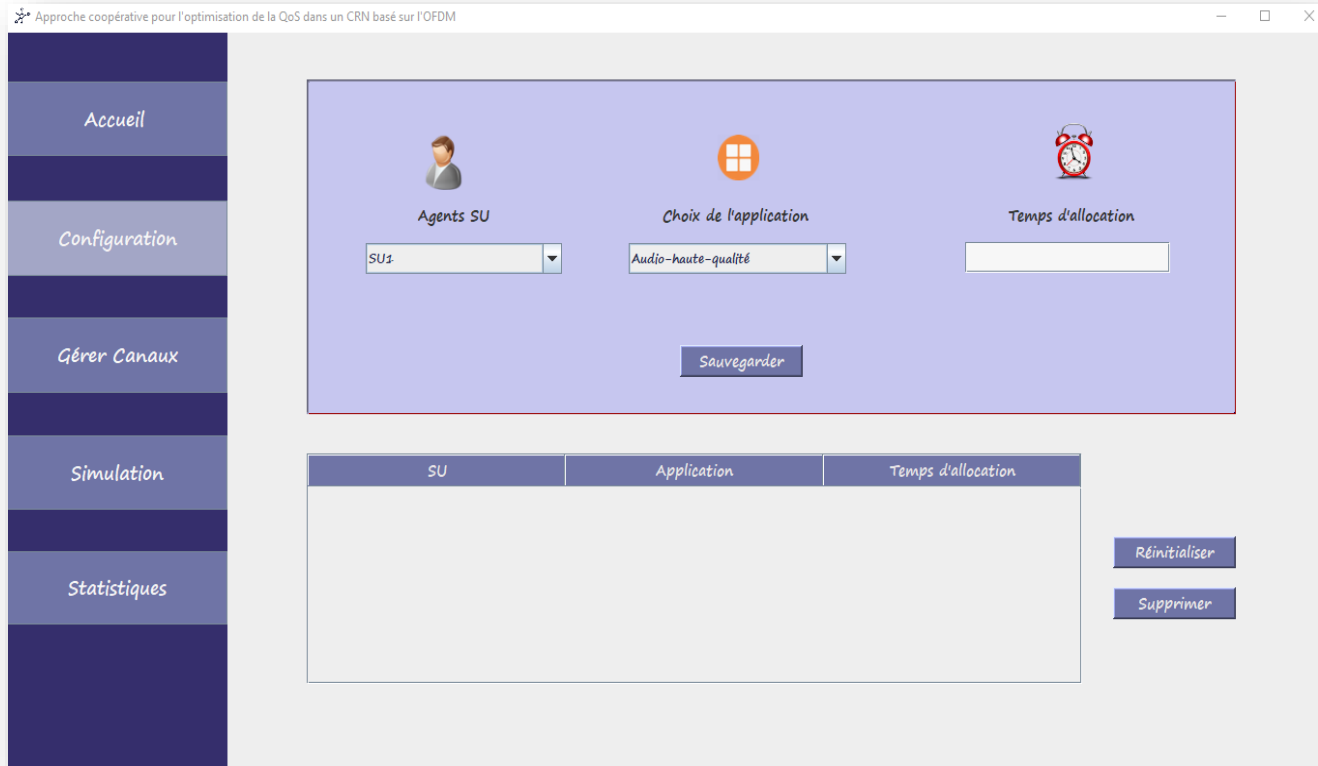


Figure III.6: Onglet de configuration des SUs.

Pour gérer les SUs, nous avons deux listes de type JComboBox. La première permet de sélectionner les SUs. La deuxième désigne le type d'application utilisée par chaque SU sélectionné. 4 choix sont possibles pour le SU :

- Audio-haute-qualité.
- Visioconférence.
- Email.
- Transaction.

Cette IHM contient également champ de saisie de type JTextField qui désigne le temps d'allocation pour ce SU. Ces paramètres seront enregistrés dans une table de type Jtable en cliquant sur le bouton « **Sauvegarder** ».

Nous avons aussi deux boutons de type JButton :

- Bouton « **Réinitialiser** » : permet de vider la table.
- Bouton « **Supprimer** » : permet de supprimer une ligne sélectionné dans la table.

❖ Onglet gérer canaux

Cet onglet est destiné à la création des canaux.



Figure III.7: Onglet pour gérer les canaux de communication.

Nous avons une liste de type JComboBox qui désigne le nombre de canaux utilisés. Les valeurs possibles sont les suivantes : {2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 251, 512, 1024} ainsi qu'un bouton « **Créer** » de type JButton pour la création des canaux.

Les caractéristiques des canaux créés seront visibles dans un écran d'affichage de type JTextArea.

❖ Onglet simulation

Nous retrouvons dans cette onglet cinq boutons de type JRadioButton, dont deux permettant le choix entre une configuration « **homogène** » (c.à.d : utilisation de la même application pour les différents SUs) et une configuration « **hétérogène** » (c.à.d : utilisation d'application différentes pour les SUs). Les trois autres boutons permettent le choix de la méthode à utiliser dans la simulation.

- Bouton « **RC classique** » : pour étudier le comportement classique de la radio cognitive.
- Bouton « **TOPSIS centralisé** » : pour étudier la méthode TOPSIS dans l'approche centralisée (c.à.d : où il existe une coalition de plusieurs SUs et 1 seul CSU).

- Bouton « **TOPSIS distribué** » : pour étudier la méthode TOPSIS dans l'approche distribuée (c.à.d : en absence de l'agent coalition CSU).

Et un bouton « **Start** », pour lancer la simulation muni d'un écran d'affichage de type JTextArea pour afficher les événements pendant cette simulation. La figure III.8 montre ces différents composants.



Figure III.8: Onglet pour lancer la simulation.

❖ Onglet statistique

C'est le quatrième et le dernier onglet. Il est destiné à l'affichage d'histogrammes et des courbes. Il contient 8 boutons de type JRadioButton permettant de choisir la comparaison souhaitée.

Le bouton « **Afficher les statistiques** » visualise le résultat sous forme d'histogramme ou de courbe. Le résultat sera affiché dans un conteneur à gauche de type JLayeredPane.

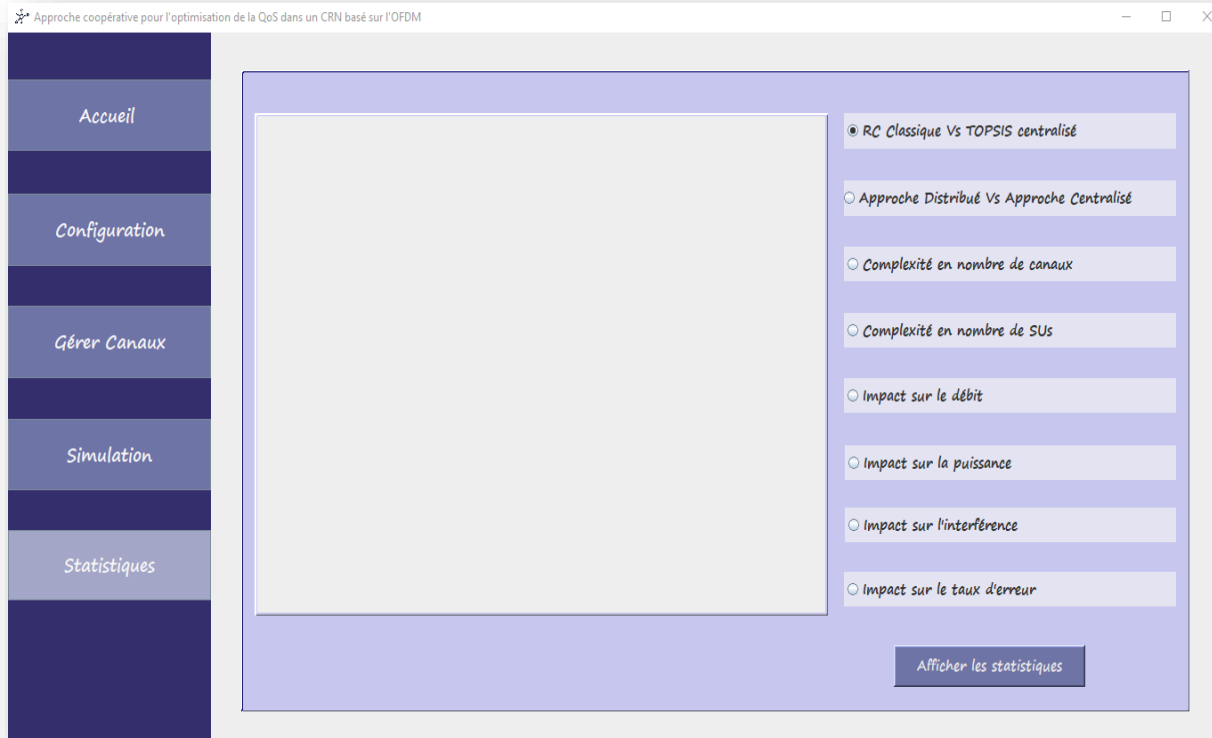


Figure III.9: Onglet pour les statistiques.

III.6.2 Les interactions entre le CSU et les SUs

La figure III.10 nous décrit les interactions entre l'agent CSU et les agents SUs pendant la négociation.

- **[1, 5]** : Chaque SU envoie au CSU un message de type REQUEST pour demander un canal libre.
- **{6, 8, 10, 11, 14}** : Le CSU envoie au SUs des messages de type INFORM pour partager le canal choisi.
- **{7, 9, 12, 13, 15}** : Chaque SU renvoie un message de type INFORM Pour indiquer qu'il a accepté le canal.
- **[15,25]** : Le CSU informe les SUs qu'une dégradation de QoS est détectée et leurs envoient par conséquent les nouveaux canaux pour le partage. Chaque message de CSU a un retour de la part des SUs.

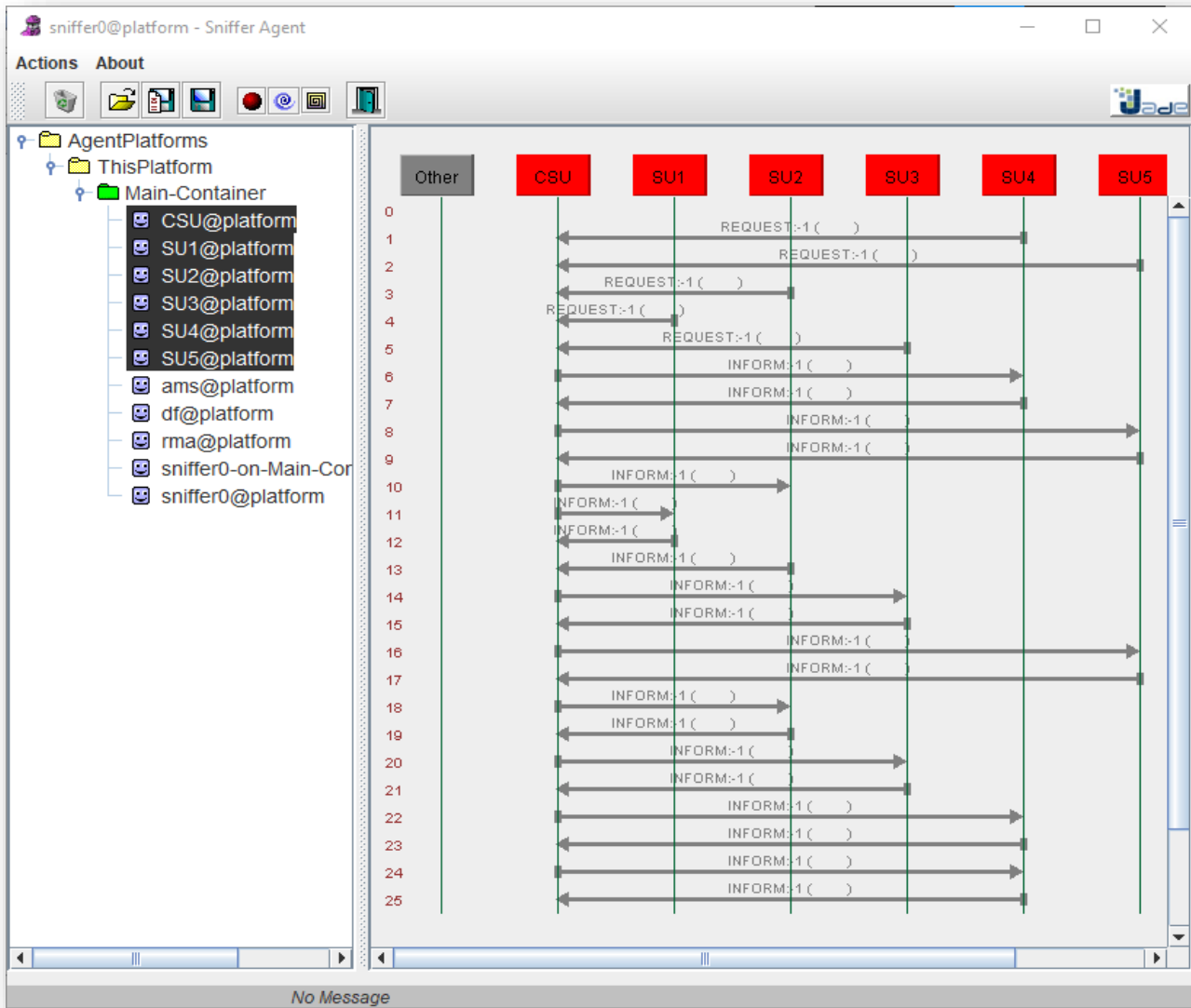


Figure III.10: Agent Sniffer pour la méthode TOPSIS.

III.7 Evaluation des résultats obtenus

Le scénario étudié dans ce qui suit est constitué de 4 SUs afin d’analyser les résultats obtenus.

III.7.1 Impact de TOPSIS sur le temps d’exécution

Dans ce qui suit, nous allons comparer la RC classique (sans TOPSIS) et la RC avec TOPSIS en termes de temps d’exécution. Le CSU exécute TOPSIS afin de satisfaire les 4 SUs dans un premier scénario. Dans le second scénario, chaque SU et en se basant sur le comportement classique de la RC trouvera lui même le canal approprié.

La figure III.11 montre le résultat obtenu.

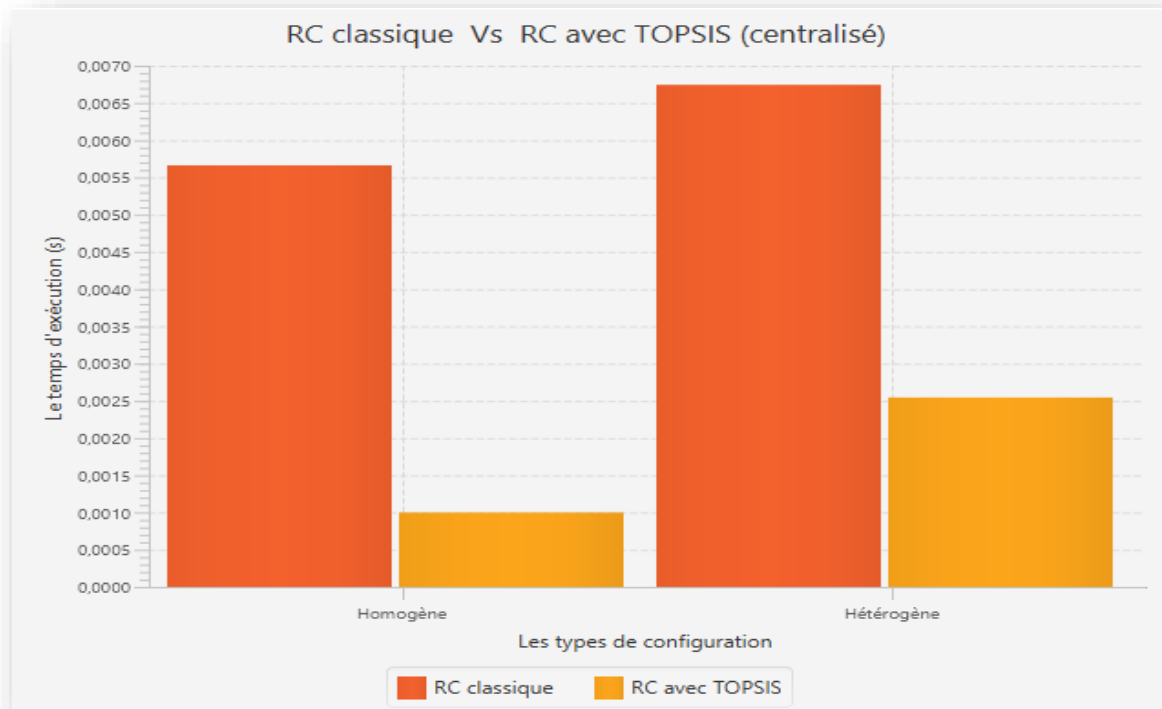


Figure III.11: Impact de TOPSIS sur le temps d'exécution.

Le principe de la radio classique est basé sur les sauts entre les canaux de communications (handover spectral) pour trouver un canal approprié selon l'application utilisée. Donc, elle prend un certain temps pour choisir le canal, surtout si ce dernier n'est pas le bon après plusieurs handovers spectraux.

Par contre, TOPSIS fournit directement le canal optimal pour l'application choisie selon les poids donnés. Dans cette méthode nous avons deux cas :

- Si les applications choisies sont homogènes donc TOPSIS sera exécutée une seule fois par le CSU. Le canal optimal sera affecté au premier SU, le deuxième canal sera affecté au deuxième SU et ainsi de suite afin de satisfaire les 4 SUs.
- Si les applications choisies sont hétérogènes, TOPSIS sera exécutée pour chaque application ou chaque SU.

Le temps d'exécution pour le cas homogène sera par conséquent plus petit que le cas hétérogène.

III.7.2 Impact de la coalition sur la batterie consommée

Dans ce qui suit et pour simuler la dégradation de la QoS, nous avons attribué pour chaque SU un temps d'allocation égal à 60 secondes. Le temps de la mise à jour de la liste des canaux est effectué chaque 20 secondes afin de tester la dégradation de la QoS.

Nous allons considérer deux scénarios. Dans le premier (approche centralisée), la méthode TOPSIS est exécutée côté CSU avec la configuration homogène. Dans le second (approche distribuée), chaque SU exécute lui-même la méthode TOPSIS afin de trouver le canal approprié.

Pour la gestion de la batterie consommée, nous supposons que chaque appel de TOPSIS consommera 1% de la batterie du SU ou du CSU (selon le scénario).

La méthode TOPSIS sera lancée dans le cas d'une dégradation détectée de la QoS afin de trouver un autre canal optimal.

La figure III.12 représente la somme de la batterie consommée pendant 10 simulations.

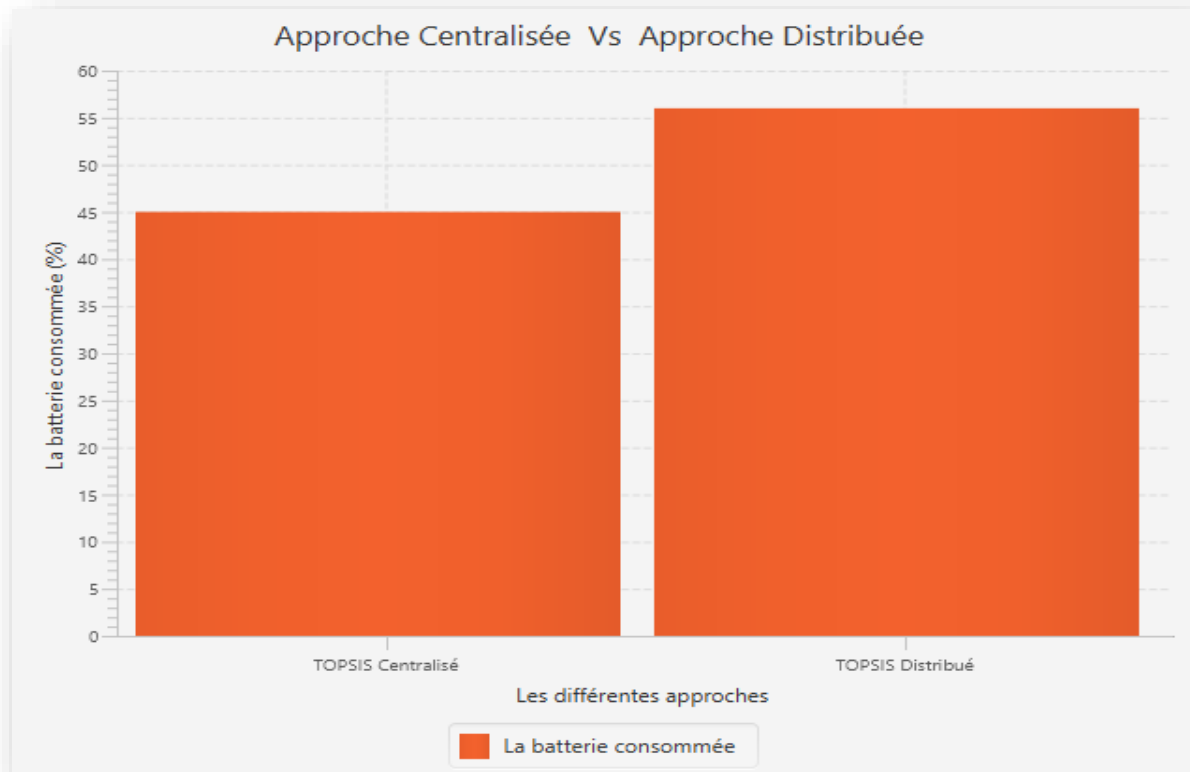


Figure III.12: La batterie consommée dans l'approche centralisée et l'approche distribuée.

Le résultat montré dans la figure III.12 est logique. En effet, un seul appel de TOPSIS est nécessaire pour le cas centralisé afin de satisfaire les 4 SUs. Par contre, sans le CSU, chaque SU doit lancer lui-même la méthode TOPSIS afin de trouver le canal approprié. Par conséquent, le TOPSIS distribué consomme plus de batterie que le TOPSIS centralisé.

III.7.3 Impact du nombre de sous-porteuses sur le temps d'exécution

La figure III.13 montre l'impact du nombre de sous porteuses sur le temps d'exécution. Nous remarquons clairement que le temps d'exécution augmente de manière proportionnelle avec le nombre de sous porteuses.

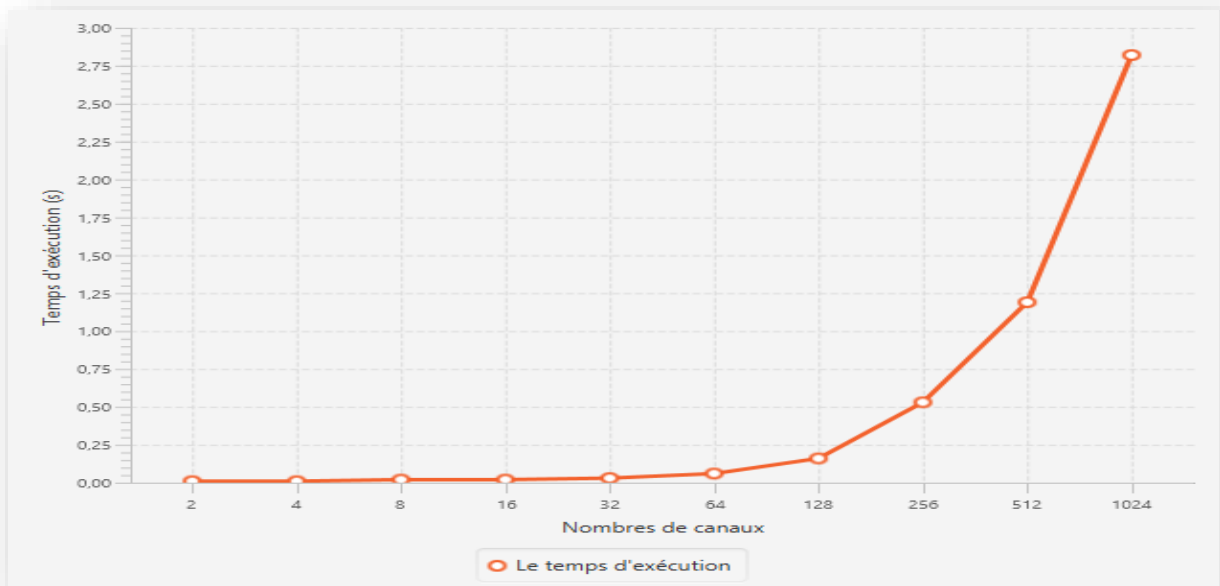


Figure III.13: Impact du nombre de sous-porteuses sur le temps d'exécution.

III.7.4 Impact du nombre de SUs sur le temps de réponse

Pour étudier l'impact du nombre de SUs sur le temps de réponse, nous avons varié le nombre de SUs de 1 à 10 avec la présence du CSU qui lance la méthode TOPSIS pour satisfaire les SUs.

La figure III.14 représente le résultat obtenu.

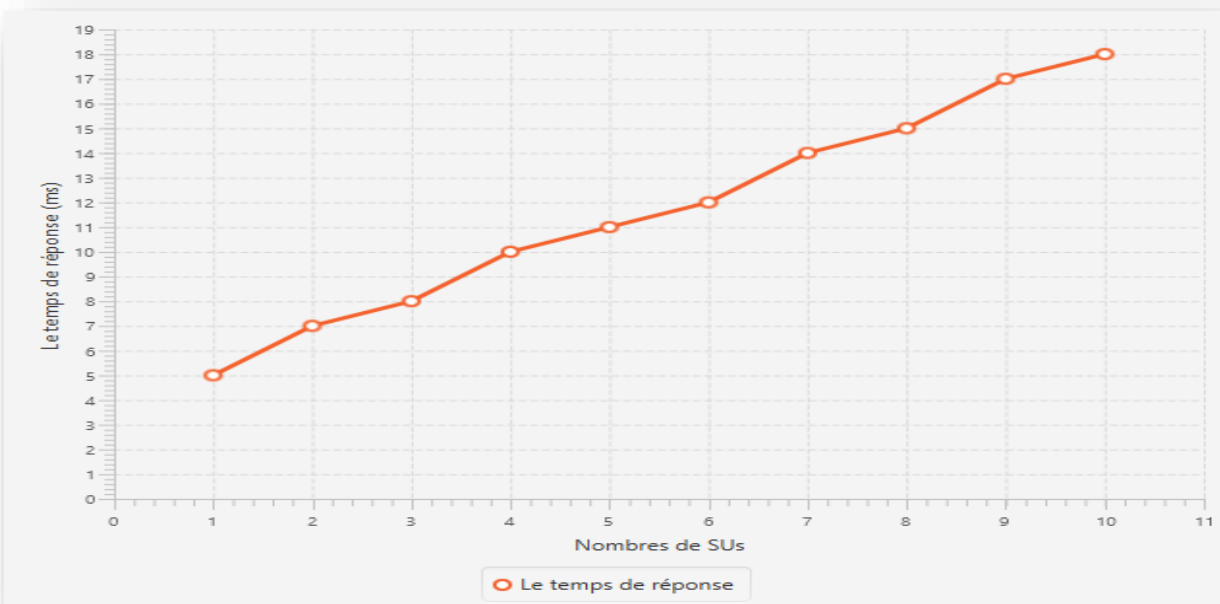


Figure III.14 : Impact du nombre de SUs sur le temps de réponse coté CSU.

Selon la figure III.14, nous remarquons que le temps de réponse augmente de manière proportionnelle avec le nombre de SUs.

III.7.5 Impact de TOPSIS sur la valeur des critères

Les différentes valeurs du tableau III.3 représentent respectivement la valeur moyenne de 10 simulations pour les quatre critères : débit, puissance, taux d'erreur et interférence et cela pour chaque application et dans les deux scénarios : RC classique (lancée par chaque SU) et RC avec TOPSIS (lancée par le CSU).

Tableau III.3 : Moyenne des valeurs des quatre critères pour les quatre applications.

	RC classique				RC avec TOPSIS			
	Débit (Kbit/s)	Interférence (mW)	Puissance (mW)	Taux d'erreur	Débit (Kbit/s)	Interférence (mW)	Puissance (mW)	Taux d'erreur
Audio haute qualité	410	0.00158	1.73	0.076	700	0.00040	0.40	0.048
Visioconférence	560	0.00120	1.32	0.124	900	0.00060	0.59	0.126
Email	350	0.00098	1.07	0.054	380	0.00025	0.23	0.034
Transaction	270	0.00198	1.73	0.016	460	0.00062	1.69	0.011

- **Impact sur le débit**

L'utilisation de TOPSIS permet de définir la configuration optimale pour la transmission de chaque type d'application.

La figure III.15 montre que le débit a été nettement augmenté pour les deux applications « Visioconférence » et « Audio haute qualité » par rapport aux autres applications puisque le débit est le critère le plus important pour ces deux applications.

Avec TOPSIS, nous constatons également que le débit a été augmenté pour toutes les applications par rapport à l'utilisation classique de RC. En effet, la RC classique choisie tout simplement le premier canal dont le débit dépasse le seuil indiqué sans pour autant être le débit optimal pour l'application.

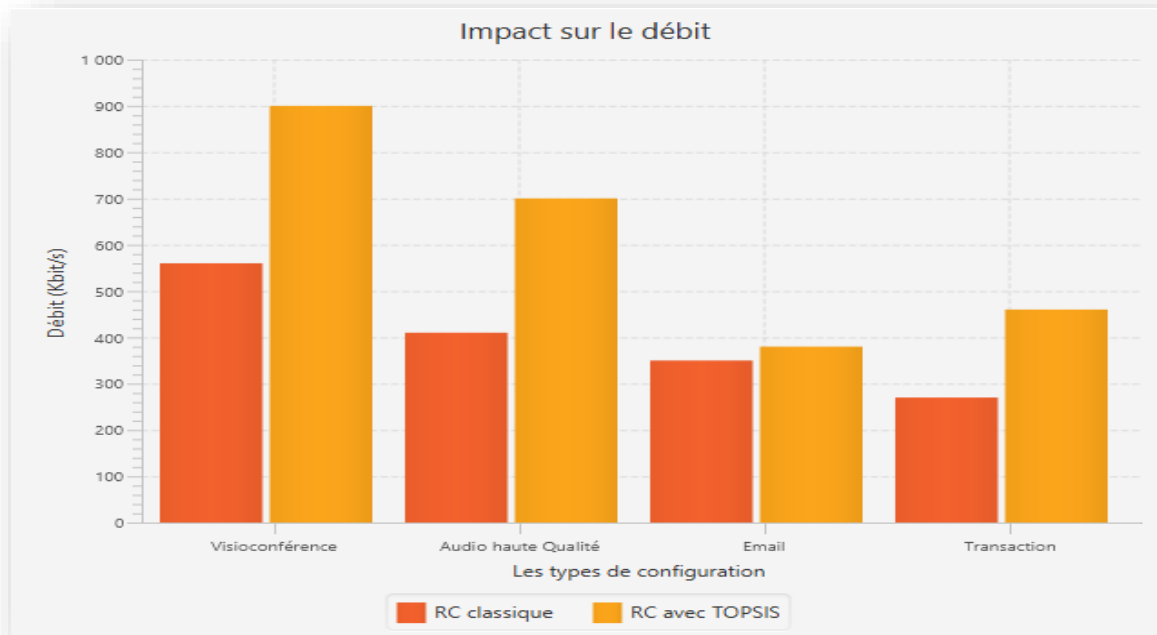


Figure III.15 : Le débit pour chaque application : RC classique Vs RC avec TOPSIS.

- **Impact sur la puissance**

La figure III.16 montre que la puissance d'émission a été réduite pour toutes les applications dans le cas RC avec TOPSIS par rapport à l'utilisation classique de RC. La puissance d'émission est le paramètre pertinent pour l'Email.

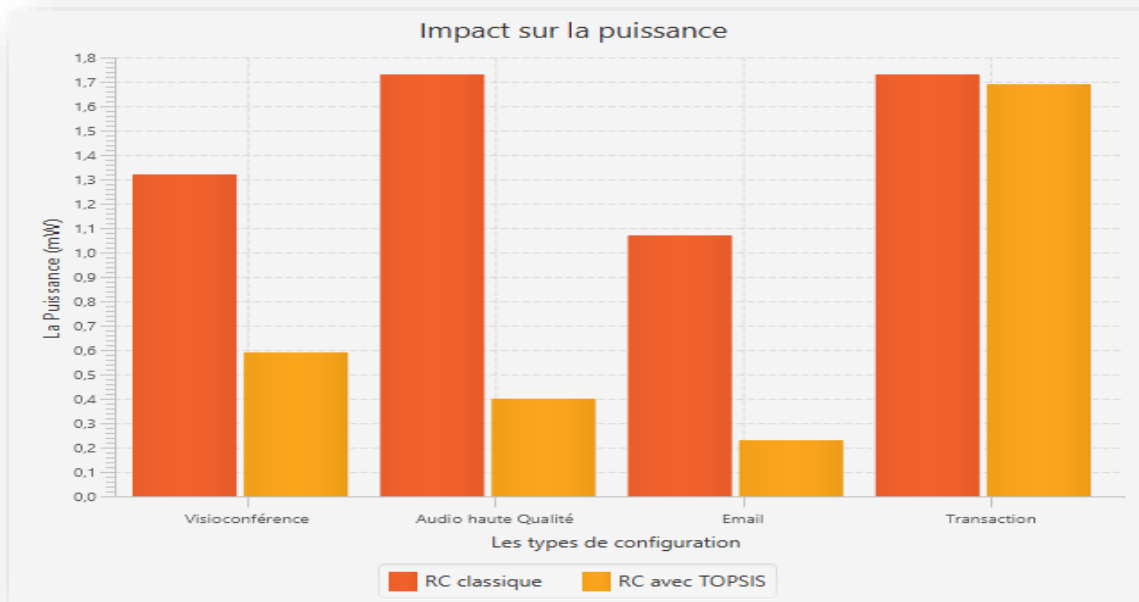


Figure III.16: La puissance pour chaque application : RC classique Vs RC avec TOPSIS.

Nous constatons que pour l'application « Transaction », la puissance n'a pas été optimisée à l'aide de TOPSIS car son poids est le plus faible parmi les autres poids et par conséquent n'avait pas beaucoup d'importance.

- **Impact sur l'interférence**

Dans la RC classique, le SU effectue des handovers spectraux pour satisfaire sa transmission mais ne minimise pas nécessairement les interférences. Dans le cas de la RC avec TOPSIS, le SU exécute la méthode TOPSIS pendant la détection en tenant compte des 4 critères, parmi lesquels, il y a les interférences.

La figure III.17 montre l'efficacité du RC avec TOPSIS par rapport au RC classique pour la minimisation des interférences.

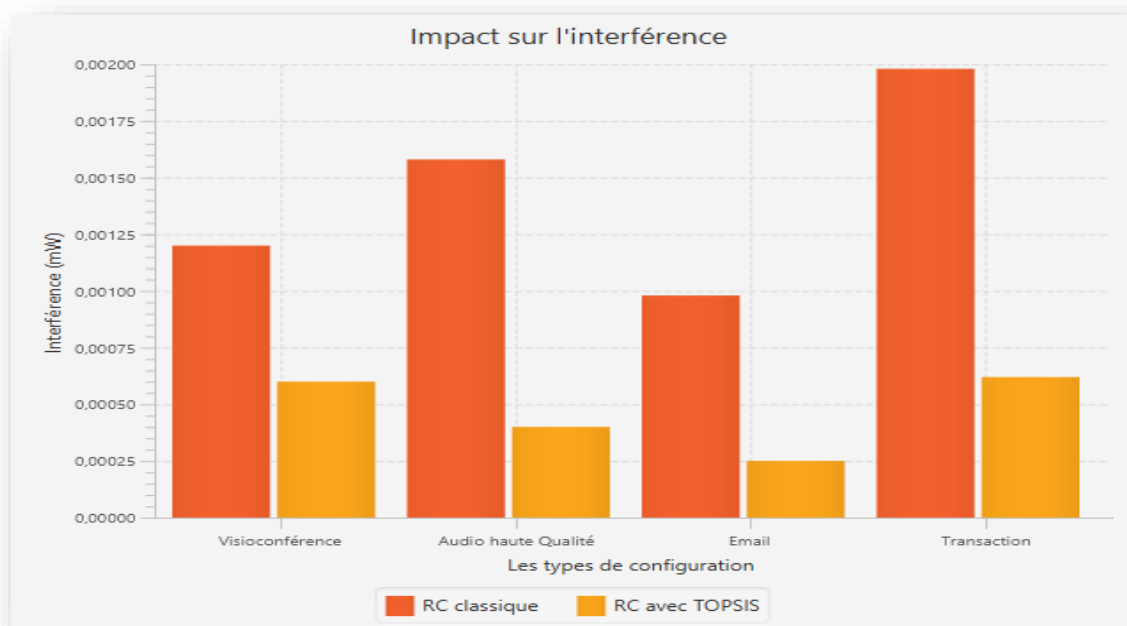


Figure III.17 : L'interférence pour chaque application : RC classique Vs RC avec TOPSIS.

- **Impact sur le taux d'erreur**

La figure III.18 montre clairement que les valeurs de taux d'erreur lors de l'utilisation de TOPSIS sont bien inférieures à celles générées dans le cas classique de la RC. Par conséquent, l'utilisation de TOPSIS s'est avérée réellement efficace en termes de sélection de canal optimal et donc de gestion optimisée de la QoS.

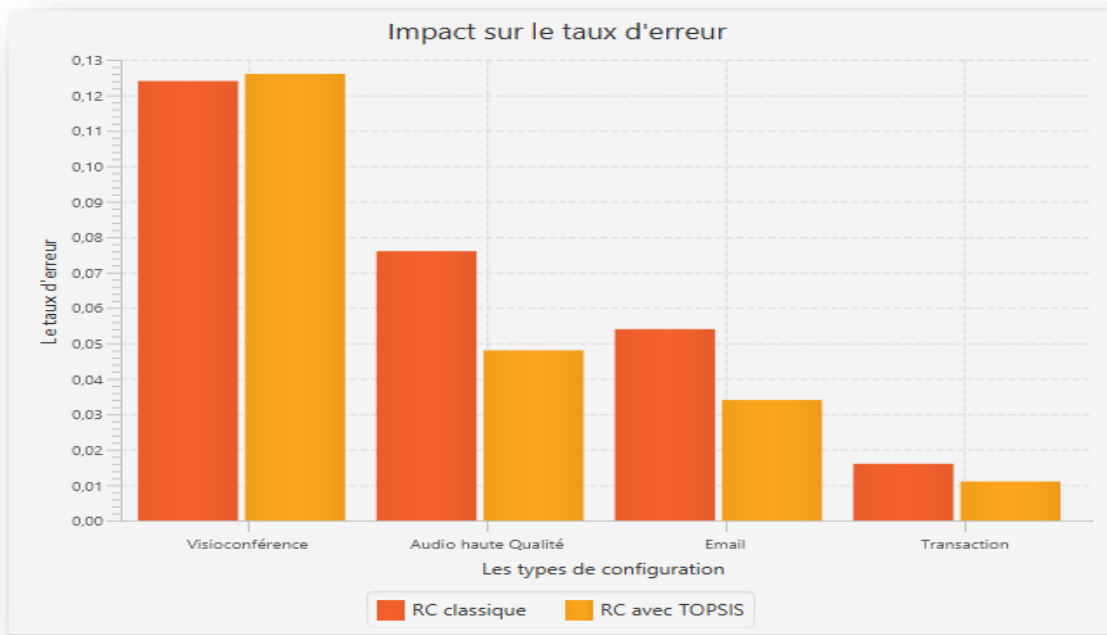


Figure III.18: Le taux d'erreur pour chaque application : RC classique Vs RC avec TOPSIS.

Nous constatons que pour l'application « Visioconférence », le taux d'erreur n'a pas été optimisé à l'aide de TOPSIS car son poids est le plus faible parmi les autres poids et par conséquent n'avait pas beaucoup d'importance.

III.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre notre contribution dans le cadre de ce PFE. Notre travail est basé sur l'implémentation de l'agent coalition (CSU) afin de gérer plusieurs SUs d'une manière efficace et optimiser les performances du réseau. Cela se fait à l'aide des SMAs en utilisant TOPSIS afin d'avoir un résultat optimal en fonction de la pondération attribuée à chaque critère.

Les résultats obtenus dans la partie étude comparative montrent l'intérêt de la coalition pour la minimisation de la consommation de la batterie et prouve l'efficacité de TOPSIS pour fournir un canal approprié selon le besoin du SU par rapport au comportement classique de la RC.

Conclusion générale

Conclusion générale

Nous avons travaillé dans ce projet de fin d'études sur les réseaux de radio cognitive se basant sur l'OFDM; une technologie visant à résoudre le problème de la congestion du spectre. L'objectif principal de la radio cognitive est d'offrir aux utilisateurs une meilleure QoS afin qu'ils puissent satisfaire leurs besoins applicatifs. Pour cela elle permet au SU d'utiliser les bandes de fréquences inutilisées de son propriétaire PU à un moment donné sans causer d'interférences.

Dans ce contexte, nous avons utilisé la méthode TOPSIS afin de permettre l'introduction du multicritère dans la gestion de la QoS pour l'utilisateur de la RC. L'objectif principal est d'obtenir le résultat optimal lors du choix de l'offre et ainsi satisfaire le besoin du SU en termes de QoS, selon le critère qu'il a spécifié.

Notre étude a été réalisée par rapport à quatre applications différentes. La visioconférence et l'audio haute qualité dépendent du débit, l'email dépend de la puissance et la transaction dépend du taux d'erreurs. Les performances de cette méthode par rapport aux quatre applications ont été comparées avec une gestion classique de la RC afin de prouver son efficacité.

Nous avons aussi proposé une architecture coopérative contenant un seul CSU et plusieurs SUs. Les résultats obtenus montrent l'efficacité de l'approche adoptée dans ce travail.

Pour les perspectives de cette étude, il serait intéressant d'étendre l'architecture présentée dans ce PFE à plusieurs coalitions. Plusieurs CSU afin de gérer un ensemble de SUs et plusieurs CPU afin de gérer un ensemble de PUs. Dans ce cas, nous pouvons parler de scalabilité dans ce contexte et mesurer l'efficacité de l'approche proposée avec un nombre élevé de PUs et de SUs.

Il serait aussi intéressant d'utiliser d'autres techniques dans ce domaine comme les métaheuristiques.

Références

Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Ibtissem Larbi, Badr Benmammam, « Négociation de spectre dans les réseaux de radio cognitive », Rapport de recherche, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2013. Disponible sur le site : <https://arxiv.org/abs/1407.2217>.
- [2] Benmammam, Badr. « Présentation de la radio cognitive », 25-03-2012. Disponible sur le site : <https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00680189/document>.
- [3] Mitola, Joseph, and Gerald Q. Maguire. « Cognitive radio: making software radios more personal » IEEE personal communications 6.4 (1999): 13-18.
- [4] Benbrahim, Abdel Gheffar, and Clive Gareth Jieman. « Analyse d'une chaîne de communication d'un réseau basé sur la radio cognitive ». PFE de Master en Télécommunication. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2013.
- [5] Badr Benmammam. Etat de l'art sur les techniques d'Accès Dynamique au Spectre dans les Réseaux de Radio Cognitive. Doctorat. Algérie. 2018. ffcel-01721711.
- [6] Amraoui, Asma. « Vers une architecture Multi-agents pour la Radio Cognitive opportuniste ». Thèse de doctorat en Informatique. Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2015.
- [7] Badr Benmammam. Allocation de ressources dans un réseau de radio cognitive en utilisant JADE. [Rapport de recherche] Laboratoire de Télécommunications Tlemcen, UABT, Algérie. 2015. fhal01172168v2.
- [8] Amraoui, Asma, et al. « Négociations à base d'enchères dans les Réseaux Radio Cognitive. » Nouvelles Technologies de la répartition-Ingénierie des protocoles NOTERE/CFIP 2012. 2012.
- [9] Hamdani, Amine, and Zakarya Madi. « Application des méthodes exactes pour l'optimisation multicritère de la gestion de spectre dans les réseaux de radio cognitive », PFE de Master en Informatique. Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen. 2018.
- [10] Benmammam Badr, and Asma Amraoui. « Réseaux de radio cognitive: Allocation des ressources radio et accès dynamique au spectre ». arXivpreprint arXiv:1407.2705 (2014).
- [11] Hossain, Ekram, Dusit Niyato, and Zhu Han. « Dynamic spectrum access and management in cognitive radio networks ». Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [12] Benghabrit Nawel. « Allocation des ressources dans les réseaux radio cognitifs ». Thèse de Doctorat en Informatique. Université Oran 1. 2019.
- [13] Bendella, Med Saléh. « Gestion de spectre dans les réseaux de radio cognitive par la formation de coalitions ». PFE de Master en Informatique. Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2014.

- [14] Mansoor, N., Muzahidul Islam, A.K.M., Zareei, M. et al. Cognitive Radio Ad-Hoc Network Architectures: A Survey. *Wireless Pers Commun* 81, 1117–1142 (2015).
- [15] Jacques Ferber, les systèmes multi-agents, InterEditions, paris, 1995.
- [16] N. R. Jennings, M. Wooldridge, and K. Sycara. A roadmap of agent research and development. *Int Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 1998.
- [17] AGHILAS, Diaf et YENNI, Chermak. Application ds product lines aux système multi agents. 2014. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.
- [18] B. Chaib-draa, I. Jarras, and B. Moulin. *Systèmes multi-agents : Principes généraux et applications*. Hermès, 2001.
- [19] Jennings, Nick R. « Commitments and conventions: The foundation of coordination in multi-agent systems ». *The knowledge engineering review* 8.3 (1993): 223-250.
- [20] Toufik, Ramoul, and Ben Mohad Nabil. « Conception et réalisation d'un système de négociation automatisé appliqué aux ventes en enchères ». PFE de Master en Informatique. Université Mouloud Mammeri, 2014.
- [21] Les réseaux de mobiles 4G et 5G. Disponible sur : <http://blogs.univ-poitiers.fr/f-launay/tag/ofdm/> .Consulté le 23-06-2021.
- [22] Naziha Ali Saoucha. Paramétrage des algorithmes génétiques pour l'optimisation de la QoS dans les réseaux radios cognitifs. Rapport de Magistère, Université de M'Sila-Mohamed Boudiaf. 2013.
- [23] Hwang, C. L., & Yoon, K. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications, A State of the Art Survey*. 1998. Springer-Verlag, New York, NY.
- [24] Hwang, C. L., Lai, Y. J., & Liu, T. Y. (1993). A new approach for multiple objective decisions making. *Computers & operations research*, 20(8), 889-899.
- [25] Java (langage) : <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Java-langage.html> . Consulté le 05-06-2021.
- [26] Boissier, Olivier. « Systèmes multi-agents ». Thèse de doctorat en Informatique. Ecole nationale supérieure des mines de Saint-Étienne, 2010.
- [27] Définition du langage JavaFX. Disponible sur : <https://openjfx.io/>. Consulté le 06-06-2021.
- [28] Graphes avec JavaFX. Disponible sur : <https://java.developpez.com/faq/javafx?page=Graphes-statistiques>. Consulté le 06/06/2021.
- [29] Approximation Formulae for the Gaussian Error Integral, Q(x). Disponible sur : <https://cnx.org/contents/HyIkNQ7J@5/Approximation-Formulae-for-the-Gaussian-Error-Integral-Q-x> . Consulté le 09-06-2021.
- [30] Analytic Hierarchy Process AHP Tutorial. Disponible sur : <https://people.revoledu.com/kardi/tutorial/AHP/> . Consulté le 11/06/2021.

Résumé:

Fournir la qualité de service aux utilisateurs des réseaux de radio cognitive est un enjeu très important surtout pour ceux utilisant des applications gourmandes en termes de ressources. Dans ce projet de fin d'études, nous avons utilisé la méthode d'optimisation multicritère TOPSIS afin d'optimiser quelques critères de qualité de service dans un réseau de radio cognitive se basant sur l'OFDM. Pour ce faire, nous avons mis en place un agent coopératif qui coordonne les utilisateurs secondaires afin d'augmenter les performances du réseau. Les simulations effectuées dans cette étude ont été réalisées à l'aide de la plate-forme multi-agents JADE et les résultats obtenus sont très satisfaisants.

Mot clés: Qualité de service, Réseaux de radio cognitive, OFDM, TOPSIS, Systèmes multi-agents.

Abstract:

Providing quality of service to users of cognitive radio networks is a very important issue, especially for those using resource-intensive applications. In this final year project, we used the TOPSIS multi-criteria optimization method to optimize the QoS parameters in a cognitive radio network based on OFDM. For this purpose, we implemented a cooperative agent that coordinates secondary users in order to increase the network performance. The simulations carried out in this study were performed using the multi-agent platform JADE and the results obtained are very satisfactory.

Keywords: Quality of service, Cognitive radio network, OFDM, TOPSIS, Multi-agent systems.

ملخص:

يعد توفير جودة الخدمة لمستخدمي الشبكات الراديوية الإدراكية مسألة مهمة للغاية ، خاصة لأولئك الذين يستخدمون تطبيقات كثيفة الاستخدام للموارد. في مشروع التخرج هذا، استخدمنا طريقة تحسين TOPSIS متعددة المعايير لتحسين بعض معايير جودة الخدمة في شبكة راديو معرفية تعتمد على OFDM. للقيام بذلك، أنشأنا وكياً تعاونياً ينسق المستخدمين الثانويين من أجل زيادة أداء الشبكة. تم إجراء عمليات المحاكاة التي تم إجراؤها في هذه الدراسة باستخدام منصة JADE متعددة العوامل وكانت النتائج التي تم الحصول عليها مرضية للغاية.

الكلمات المفتاحية: جودة الخدمة ، شبكة راديو معرفية ، OFDM ، TOPSIS ، أنظمة متعددة الوكلاء.