



Gestion multi-agents du spectre pour des terminaux mobiles à radio cognitive

Emna Trigui

► To cite this version:

Emna Trigui. Gestion multi-agents du spectre pour des terminaux mobiles à radio cognitive. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université de Technologie de Troyes, 2013. Français. NNT : 2013TROY0026 . tel-02969085

HAL Id: tel-02969085

<https://theses.hal.science/tel-02969085>

Submitted on 16 Oct 2020

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

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

Thèse
de doctorat
de l'UTT

Emna TRIGUI

Gestion multi-agents du spectre pour des terminaux mobiles à radio cognitive

**Spécialité :
Réseaux, Connaissances et Organisations**

2013TROY0026

Année 2013

THESE

pour l'obtention du grade de

DOCTEUR de l'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE TROYES Spécialité : RESEAUX, CONNAISSANCES, ORGANISATIONS

présentée et soutenue par

Emna TRIGUI

le 3 décembre 2013

Gestion multi-agents du spectre pour des terminaux mobiles à radio cognitive

JURY

M. M. DEBBAH	PROFESSEUR SUPELEC	Président
M. T. CHAHED	PROFESSEUR TELECOM SUDPARIS	Rapporteur
M. M. ESSEGHIR	MAITRE DE CONFERENCES	Directeur de thèse
Mme F. KRIEF	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Rapporteur
M. J. LEGUAY	DOCTEUR	Examineur
Mme L. MERGHEM-BOULAHIA	MAITRE DE CONFERENCES - HDR	Directrice de thèse

REMERCIEMENTS

C'est avec un grand plaisir que je réserve cette page en signe de gratitude et de profonde reconnaissance à tous ceux qui m'ont aidé pour réaliser ce travail.

J'adresse mes plus vifs remerciements à mes directeurs de thèse Moez Esseghir et Leila Merghem Boulahia, pour la qualité de leur encadrement, pour m'avoir incité à mener à bien ce travail, pour leur aide continue, leurs remarques précieuses et conseils constructifs.

Je tiens à remercier profondément toute ma famille pour leur soutien, pour leurs conseils et leur aide tout au long de la préparation de ce travail. Je remercie particulièrement mes chers parents, grâce à eux, j'atteins aujourd'hui un objectif qui m'est très cher. Je remercie aussi mon mari pour son aide sans faille, pour son amour et ses encouragements. Je le remercie également d'avoir fait une lecture critique de ce manuscrit.

Mes remerciements s'adressent également à mes amies pour leur aide, leurs conseils et leur précieux soutien.

Je ne saurais omettre d'adresser mes sincères remerciements à tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon profond respect.

Je voudrais, également, exprimer mes sentiments de gratitude à tous les membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail tout en espérant qu'ils trouvent dans ce rapport la clarté et la motivation qu'ils attendent.

RÉSUMÉ

La radio cognitive est une technologie émergente en matière d'accès sans fil, visant à améliorer considérablement l'utilisation du spectre radio en permettant d'y accéder de manière opportuniste. La plupart des travaux de recherche sur la radio cognitive s'est réalisée sur la base d'un état spatio-temporel fixe sans tenir compte de l'effet de la mobilité de l'utilisateur. Cependant, la gestion de la mobilité est primordiale dans les réseaux actuels et futurs et il est nécessaire de garantir la continuité et la qualité de service lors du déplacement des terminaux.

Dans ce travail, nous nous intéressons au concept de mobilité dans les réseaux à radio cognitive de manière à garantir en même temps le partage efficace du spectre et la continuité de service lors du handover. Corréler les échanges pour le partage du spectre avec la mobilité des utilisateurs est une problématique majeure dans ce contexte. En plus, la sélection du canal cible, que l'utilisateur à radio cognitive pourra utiliser après le handover, est une tâche critique qui doit être effectuée rapidement et efficacement.

Afin de répondre aux objectifs définis ci-dessus, nous avons proposé un algorithme de gestion dynamique du spectre assurant l'exploitation des ressources spectrales et la prise en compte du handover pour un nœud mobile à radio cognitive. Notre solution met en œuvre une approche décentralisée basée sur les systèmes multi-agents. Nous avons, tout d'abord, intégré des agents au sein des utilisateurs secondaires (n'ayant pas de licence pour l'accès au spectre) et des utilisateurs primaires (disposant d'une licence) et nous avons défini leurs comportements au moment du handover. Nous avons proposé un mécanisme de négociation entre ces agents permettant aux utilisateurs secondaires de se voir allouer une bande de spectre avec un bon rapport prix par durée d'allocation. Nous avons, par ailleurs, proposé une deuxième solution qui se base sur l'enchère combinée avec de l'apprentissage. Nos algorithmes prennent en compte les préférences des utilisateurs, comme la fréquence spectrale, le prix et la durée ainsi que les contraintes de l'environnement spectral telles que les bandes disponibles.

Nous avons montré, par simulation, que notre proposition assure une exploitation importante des ressources spectrales tout en diminuant le nombre de handovers spectraux. De plus, nos algorithmes offrent un handover spectral transparent et sans interruption lors des déplacements des utilisateurs. Nous avons enfin prouvé que notre solution permet de satisfaire les besoins des utilisateurs et améliore leur utilité.

Mots clés: *Radio cognitive, Gestion des ressources radio, Intelligence artificielle répartie, Négociations, Ventes aux enchères, transfert intercellulaire.*

ABSTRACT

Cognitive radio is an emergent technology in wireless access networks that aims to considerably improve spectrum use by allowing opportunistic access. Most of the research activity on cognitive radio networks considered until now static terminals, neglecting the impact of user's mobility. Actually, mobility management is extremely necessary to ensure continuity of service and quality of service when moving from one network to another one.

In this work, we focus on mobility and spectrum management concepts in cognitive radio networks to ensure efficient spectrum sharing and seamless handover at the same time. Combining spectrum sharing task with user's mobility is a major challenge in this context. Moreover, the target channel selection during the handover is a critical task that must be fastly and efficiently realized.

To achieve the objectives outlined above, we propose a dynamic spectrum management algorithm for mobile cognitive radio nodes. Our solution is a decentralized approach based on multi-agent systems. We deploy agents on each primary (licensed) and secondary (unlicensed cognitive radio) users, respectively. Besides, we define agents' behaviors during the handover process. Furthermore, we propose a novel negotiation mechanism between agents to assign secondary users the appropriate spectrum band giving a good price for the use duration. We have also proposed a second solution using the learning based auctions. Our algorithms take into account users' requirements such as spectrum frequency, price and duration as well as environment's constraints such as available resources.

Simulation results show that our proposal improves the overall spectrum utilization and minimizes the number of spectrum handovers when users move from one network to another one. This proves that our algorithms provide efficient spectrum allocation and guarantee continuity of service and quality of service during user's mobility. On the other hand, our approach guarantees users' satisfaction and improves their utility.

Keywords: *Cognitive radio networks, Radio resource management, Distributed artificial intelligence, Negotiations, Auctions, Roaming*

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	I
RÉSUMÉ	II
ABSTRACT	III
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1. GESTION DU SPECTRE ET DE LA MOBILITE DANS LES RESEAUX A RADIO COGNITIVE.....	5
1.1 Introduction	6
1.2 Généralités sur la radio cognitive	6
1.2.1 Concepts et définitions	6
1.2.2 Réseau à radio cognitive	7
1.2.3 Cycle cognitif.....	8
1.2.4 Fonctions de base de la radio cognitive	9
1.3 Techniques de gestion dynamique du spectre	11
1.3.1 Techniques de détection	11
1.3.2 Gestion basée sur le contrôle d'accès au canal (MAC)	12
1.3.3 Gestion du spectre en utilisant la théorie des jeux.....	13
1.3.4 Gestion du spectre en utilisant les systèmes multi-agents	13
1.3.5 Techniques de gestion du handover spectral	14
1.4 Gestion de la mobilité.....	15
1.4.1 Gestion de la mobilité dans un réseau sans fil	15
1.4.2 Gestion de la mobilité dans un réseau à radio cognitive	18
1.5 Conclusion.....	20

2. UTILISATION DES SMA DANS LE CONTEXTE DE LA RADIO COGNITIVE ...	21
2.1 Introduction	22
2.2 Introduction aux systèmes multi-agents	22
2.2.1 Caractéristiques des systèmes multi-agents	23
2.2.2 Interaction entre agents dans les systèmes multi-agents.....	23
2.2.3 Mécanismes de négociation.....	27
2.2.4 Différents types d'enchères	29
2.3 Utilisation des SMA pour la gestion du spectre dans les réseaux à radio cognitive	30
2.3.1 Les approches basées sur la négociation	32
2.3.2 Les approches basées sur les enchères	33
2.3.3 Les approches basées sur l'apprentissage	34
2.3.4 Les approches basées sur la coopération	36
2.4 Conclusion.....	37
3. ETUDE DES LIMITES DES SOLUTIONS EXISTANTES ET IDENTIFICATION DES BESOINS	38
3.1 Introduction	39
3.2 Limites des solutions existantes	39
3.3 Description de la problématique.....	40
3.4 Scénario global.....	40
3.5 Exemple Illustratif.....	42
3.6 Conclusion.....	43
4. NESAM : GESTION DYNAMIQUE DU SPECTRE BASEE SUR LA NEGOCIATION MULTI-AGENTS	44
4.1 Introduction	45
4.2 AGH : Algorithme de gestion du handover.....	45
4.3 AGS : Algorithme de gestion du spectre pour un terminal mobile à RC	48
4.4 Algorithme de sélection du canal cible	50
4.5 Mécanisme de négociation	53
4.6 Diagramme de séquences de NESAM	55

4.7	Evaluation des performances de l'approche NESAM	56
4.7.1	Paramètres de simulation	56
4.7.2	Métriques	57
4.7.3	Résultats.....	60
4.7.4	Comparaison de <i>NESAM</i> avec l'approche coopérative	69
4.8	Conclusion.....	72
5.	LASMA : GESTION DYNAMIQUE DU SPECTRE EN UTILISANT L'ENCHERE MULTI-AGENTS ET L'APPRENTISSAGE.....	74
5.1	Introduction	75
5.2	Contexte et architecture	75
5.3	Description de l'algorithme général et du diagramme de séquences	77
5.4	Comportement détaillé du PU	78
5.5	Comportement détaillé du TCM.....	79
5.6	Exemple illustratif	80
5.7	Types d'allocation de spectre	81
5.7.1	Allocation uni-bande	81
5.7.2	Allocation multi-bandes.....	81
5.8	Prise en considération de la fréquence	82
5.9	Algorithme d'apprentissage.....	83
5.10	Evaluation des performances de l'approche LASMA	85
5.10.1	Paramètres de simulation	85
5.10.2	Métriques.....	85
5.10.3	Résultats de comparaison des deux types d'allocation.....	88
5.10.4	Résultats de comparaison avec l'enchère classique	90
5.11	Comparaison de NESAM avec LASMA.....	98
5.12	Conclusion.....	101
	CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	103
	LISTE DES PUBLICATIONS	108
	RÉFÉRENCES	110

ANNEXES	121
Annexe A: Algorithme de sélection utilisé par NESAM	121
Annexe B : Deuxième variante de l'algorithme de sélection (sur la base du prix)	123
Annexe C : Démonstrations	126
Annexe D : Algorithme de fonctionnement du PU (pour l'approche LASMA)	129
Annexe E : Algorithme de fonctionnement du TCM (pour l'approche LASMA)	130

TABLE DES FIGURES

Figure 1.1 Architecture d'un réseau à radio cognitive [11]	8
Figure 1.2 Cycle cognitif [7]	9
Figure 1.3 Fonctions de gestion du spectre	10
Figure 1.4 Gestion de la localisation	16
Figure 1.5 Gestion du handover	17
Figure 2.1 Classification des types d'interactions dans un SMA	24
Figure 2.2 Négociation via heuristique [93]	28
Figure 2.3 Approches multi-agents pour la gestion du spectre	32
Figure 3.1 Contexte global	41
Figure 3.2 Exemple de répartition du spectre	42
Figure 4.1 Scénario considéré	48
Figure 4.2 Organigramme global du comportement du TCM	50
Figure 4.3 Organigramme de l'algorithme de sélection	52
Figure 4.4 Mécanisme de négociation	53
Figure 4.5 Diagramme de séquences	55
Figure 4.6 Taux moyen de succès des négociations en fonction de α et β	61
Figure 4.7 Taux moyen de succès des négociations en fonction du nombre de TCMs	61
Figure 4.8 Taux moyen d'utilisation du spectre en fonction du temps	62
Figure 4.9 Taux moyen d'utilisation du spectre en fonction du nombre de TCMs	62
Figure 4.10 Taux moyen de blocage en fonction du nombre de TCM	63
Figure 4.11 Utilité moyenne des TCMs	64
Figure 4.12 Pourcentage des TCMs servis	64
Figure 4.13 Utilité moyenne des PUs	65
Figure 4.14 Pourcentage de PUs qui ont pu allouer leurs bandes	65
Figure 4.15 Nombre moyen de messages échangés avant l'accès au spectre	67
Figure 4.16 Surcoût global de la négociation	68
Figure 4.17 Surcoût des négociations réussies	68
Figure 4.18 Taux moyen de handover fréquentiel	69

Figure 4.19 Délai moyen de handover	70
Figure 4.20 Comparaison en termes d'utilisation du spectre	71
Figure 4.21 Comparaison en termes de taux moyen de blocage	71
Figure 4.22 Comparaison en termes d'utilité des TCMs	71
Figure 4.23 Comparaison en termes d'utilité des PUs	71
Figure 4.24 Comparaison en termes de durée d'accès	72
Figure 4.25 Comparaison en termes de messages échangés	72
Figure 5.1 Enchère FPSB	76
Figure 5.2 Architecture de <i>LASMA</i>	76
Figure 5.3 Diagramme de séquences de <i>LASMA</i>	77
Figure 5.4 Comportement détaillé du PU	78
Figure 5.5 Comportement détaillé d'un TCM.....	80
Figure 5.6 Exemple illustratif du fonctionnement de <i>LASMA</i>	81
Figure 5.7 Processus d'apprentissage	83
Figure 5.8 Exemple de tentatives	87
Figure 5.9 Comparaison entre les deux types d'allocation en termes d'utilisation du spectre	88
Figure 5.10 Comparaison entre les types d'allocation en termes du nombre de tentatives	89
Figure 5.11 Comparaison entre les types d'allocations en termes de délai.....	90
Figure 5.12 Utilisation moyenne du spectre au cours du temps	91
Figure 5.13 Utilisation moyenne du spectre en fonction du nombre de TCMs	91
Figure 5.14 Taux du handover fréquentiel	92
Figure 5.15 Taux de blocage	92
Figure 5.16 Utilité moyenne des TCMs	93
Figure 5.17 Utilité moyenne des PUs	93
Figure 5.18 Utilité moyenne des utilisateurs en fonction de ψ	94
Figure 5.19 Pourcentage de TCMs servis.....	95
Figure 5.20 Pourcentage des PUs qui ont pu allouer leurs bandes.....	95
Figure 5.21 Nombre moyen de messages échangés	96
Figure 5.22 Nombre moyen de messages échangés en fonction de ψ	96
Figure 5.23 Nombre moyen de tentatives en fonction du nombre de TCMs	96
Figure 5.24 Nombre moyen de tentatives avant l'accès au spectre en fonction de ψ	96
Figure 5.25 Délai moyen du handover	97
Figure 5.26 Délai moyen du handover VS durée moyenne d'utilisation	97
Figure 5.27 <i>NESAM</i> vs <i>LASMA</i> en termes d'utilité	99
Figure 5.28 <i>NESAM</i> vs <i>LASMA</i> en termes de pourcentage de TCMs servis.....	99
Figure 5.29 <i>NESAM</i> vs <i>LASMA</i> en termes de pourcentage de PUs allouant leurs bandes	99
Figure 5.30 <i>NESAM</i> vs <i>LASMA</i> en termes du taux de handover fréquentiel	100
Figure 5.31 <i>NESAM</i> vs <i>LASMA</i> en termes de délai moyen de handover	100
Figure 5.32 <i>NESAM</i> vs <i>LASMA</i> en termes de nombre de messages échangés	101

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1. Récapitulatif des enchères	30
Tableau 2.2. Similitude entre un agent et un nœud à radio cognitive	31
Tableau 4.1 Signification des acronymes	52
Tableau 4.2 Valeurs initiales adoptées dans notre exemple	54
Tableau 4.3 Les paramètres de simulation	57
Tableau 4.4 Exemple de résultats pour 150 TCMs	66
Tableau 5.1 Exemple illustratif du processus d'apprentissage	84
Tableau 5.2 Paramètres de simulation pour l'évaluation de l'approche <i>LASMA</i>	85

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Nous vivons une époque où l'évolution de la technologie suit un rythme effréné, les innovations se succèdent en visant toujours l'optimisation et l'exploitation maximale des ressources disponibles. Du téléphone cellulaire de première génération, à l'iPAD de troisième génération, nous passons d'une génération à une autre en profitant de débits plus élevés et de services de plus en plus évolués. Cette récente évolution des technologies sans fil engendre une forte demande en termes de spectre radio, entraînant ainsi un déficit dans les ressources spectrales telles qu'elles sont utilisées actuellement. En effet, plusieurs études récentes ont révélé l'utilisation sous-optimale des bandes radio en insistant sur le fait que certaines deviennent surchargées tandis que d'autres bandes restent largement sous-exploitées. Par ailleurs, la Commission Fédérale de Communication (FCC) [1] a mentionné que l'utilisation de la bande en dessous de 3 GHz varie entre 15% et 85%. Pour pallier ces problèmes, les chercheurs ont proposé un nouveau paradigme qui est la radio cognitive (RC) [2] afin de mieux exploiter le spectre existant en tirant profit des canaux libres et inutilisés de manière dynamique et opportuniste. Cette technologie permet donc d'augmenter le nombre d'utilisateurs et de mieux répartir les ressources disponibles.

Le concept de radio cognitive est en réalité une interaction entre la technologie sans fil et l'intelligence artificielle. En effet, la capacité de radio cognitive intégrée à un terminal lui offre la possibilité d'interagir avec son environnement radio afin de s'y adapter, de détecter les fréquences libres et de les exploiter. Le terminal aura suffisamment de capacités lui permettant de gérer efficacement l'ensemble des ressources radio. Néanmoins, la mise en œuvre de cette technologie nécessite des études approfondies sur la détection des ressources libres, le partage du spectre, la gestion de la mobilité spectrale, la gestion de la mobilité des utilisateurs, etc.

Les recherches actuelles sur la radio cognitive se concentrent principalement sur la détection des ressources libres et la répartition dynamique des fréquences entre les utilisateurs alors que la composante mobilité présente aussi un aspect d'un grand intérêt mais qui reste très peu étudié. Ainsi, notre travail se focalise sur la gestion dynamique du spectre entre terminaux mobiles à radio cognitive de façon à bien gérer le handover au sens classique ainsi que le handover spectral. Il est d'ailleurs important de différencier dès à présent ces deux notions. Le handover se produit généralement lors du déplacement d'un terminal d'un point à un autre et se traduit classiquement par le passage d'un réseau à un autre, d'une technologie à une autre, etc.

Dans le contexte de la radio cognitive, il peut s'accompagner d'un handover spectral, c'est-à-dire, le changement de la bande spectrale utilisée.

La mobilité des nœuds ajoute un niveau de complexité supplémentaire à la gestion du spectre dans le contexte de la radio cognitive puisqu'un accès aux ressources spectrales est habituellement réalisé sur la base d'un état spatio-temporel fixe. Par conséquent, nous traitons dans ce travail trois problématiques majeures : (1) Corréler l'accès et le partage du spectre avec les mouvements potentiels des terminaux à radio cognitive (2) Assurer une gestion efficace du handover spectral (3) Garantir la continuité de service lors des déplacements des utilisateurs tout en respectant leurs besoins et préférences.

Afin de résoudre les problématiques mentionnées ci-dessus, nous proposons dans cette thèse deux nouvelles solutions pour la gestion du spectre et de la mobilité dans les réseaux à radio cognitive. La première solution, appelée *NESAM* (*NEgotiation based approach for Spectrum Access and Mobility management*), se base sur un nouveau mécanisme de négociation multi-agents garantissant le choix optimal du canal cible. La deuxième proposition, appelée *LASMA* (*Learning based Auction approach for Spectrum Mobility and Assignment*), consiste, quant à elle, à implémenter un protocole d'enchères où l'utilisateur primaire (PU) est le commissaire priseur et les utilisateurs secondaires (SUs) sont les enchérisseurs. Cette solution définit également un module d'apprentissage au niveau des SUs.

Les principales contributions de la solution basée sur la négociation sont les suivantes :

- Nous avons proposé une gestion du handover, dans les réseaux mobiles à radio cognitive, basée sur la communication entre agents afin d'optimiser la répartition du spectre et accélérer le choix des canaux cibles les plus adéquats.
- Nous avons introduit un algorithme de décision de handover spectral qui permet d'éviter la transition d'un canal à un autre lors du changement de réseau et de garantir ainsi la qualité de service (QoS) nécessaire.
- Notre proposition assure également une sélection de la meilleure bande de spectre disponible dans le réseau cible.
- Nous avons proposé un nouveau mécanisme de négociation entre l'utilisateur primaire et le nœud mobile à radio cognitive afin que ce dernier se voie allouer la bande de spectre la plus adéquate à ses besoins avec un bon prix par durée d'utilisation.

Concernant la deuxième proposition *LASMA*, nos contributions sont les suivantes :

- Proposition d'un nouvel algorithme de gestion du spectre basé sur les enchères. Nous traitons la phase de décision du handover spectral ainsi que l'allocation des ressources et le partage entre utilisateurs.
- Intégration d'un algorithme d'apprentissage afin d'améliorer les performances de notre approche en renforçant l'opportunité d'accès au spectre radio et d'augmenter l'efficacité de l'enchérissement pour les SUs.

- Définition d'une méthode de conservation de fréquence lors du changement de réseau afin de réduire le nombre de handovers spectraux. Cette contribution permet d'améliorer les performances du handover et de maintenir la continuité de service.

D'une façon générale, nos deux propositions tiennent compte des préférences et des exigences des nœuds mobiles ainsi que des conditions de l'environnement. En plus, elles peuvent être facilement déployées au sein des PUs et des SUs dans les réseaux ad-hoc ou cellulaires sans fil actuels.

En outre, nous avons effectué des simulations sur un réseau ad-hoc pour valider les algorithmes proposés. Les résultats montrent que nos propositions assurent de très bonnes performances et qu'elles sont prometteuses en termes de gestion de spectre dans les réseaux à radio cognitive.

Organisation du rapport

Ce manuscrit est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous introduisons le contexte général de notre travail; nous présentons ainsi le concept de radio cognitive avec ses différentes caractéristiques et fonctionnalités. Puis, nous présentons un état de l'art sur les travaux existants étroitement liés à notre travail. Nous décrivons d'abord les principales techniques de gestion dynamique du spectre présentes dans la littérature. Ensuite, nous exposons les techniques de gestion de la mobilité dans les réseaux sans fil suivies d'une description des travaux les plus connus sur la gestion de la mobilité dans le contexte de la radio cognitive.

Dans le deuxième chapitre, nous nous focalisons sur les travaux récents qui apportaient des solutions à des problématiques de la radio cognitive en adoptant l'approche multi-agents. Nous commençons alors par présenter les systèmes multi-agents ainsi que leurs différentes caractéristiques et les algorithmes d'interaction entre agents. Ensuite, nous nous intéressons aux mécanismes de négociation et d'enchères desquels nous nous sommes inspirés pour aboutir à nos deux propositions. Puis, nous présentons l'utilisation de ses systèmes multi-agents pour la gestion dynamique du spectre dans les réseaux à radio cognitive.

Dans le troisième chapitre, nous étudions de manière approfondie les limites des solutions existantes dans la littérature en identifiant clairement les besoins motivant une nouvelle solution. Ensuite, nous détaillons la problématique de cette thèse ainsi que le scénario considéré, illustré par un exemple applicatif.

Le quatrième chapitre sera consacré à la présentation exhaustive de notre première proposition '*NESAM*' pour la gestion du spectre et de la mobilité dans les réseaux à radio cognitive basée sur la négociation multi-agents. Nous commençons par présenter l'algorithme qu'exécute un utilisateur secondaire pendant le handover. Ensuite, nous détaillons l'algorithme de sélection du canal approprié et le mécanisme de négociation proposé. A la fin de ce chapitre, nous analysons les résultats des simulations effectuées afin d'évaluer les performances des algorithmes proposés. Nous présentons ainsi les paramètres de simulation, les métriques considérées et les courbes obtenues.

Enfin, le dernier chapitre est consacré à la présentation de la deuxième proposition, *LASMA*, basée sur la vente aux enchères et l'apprentissage. Nous détaillons alors les algorithmes décrivant les comportements des SUs et des PUs. Nous étudions également deux types d'allocation du spectre puis, en se basant sur les résultats des simulations, nous choisissons le plus adapté des deux à notre proposition. Ensuite, nous évaluons les performances de *LASMA* en montrant l'effet de l'algorithme d'apprentissage sur le fonctionnement du système. Avant de conclure ce dernier chapitre, nous décrivons les résultats de la comparaison des deux approches proposées, à savoir *NESAM* et *LASMA*.

Une conclusion générale est présentée à la fin du document pour clôturer notre travail et pour en donner les perspectives.

CHAPITRE 1

1 Gestion du spectre et de la mobilité dans les réseaux à radio cognitive

Sommaire

1.1	Introduction	6
1.2	Généralités sur la radio cognitive	6
1.2.1	Concepts et définitions	6
1.2.2	Réseau à radio cognitive	7
1.2.3	Cycle cognitif.....	8
1.2.4	Fonctions de base de la radio cognitive	9
1.3	Techniques de gestion dynamique du spectre	11
1.3.1	Techniques de détection	11
1.3.2	Gestion basée sur le contrôle d'accès au canal (MAC)	12
1.3.3	Gestion du spectre en utilisant la théorie des jeux.....	13
1.3.4	Gestion du spectre en utilisant les systèmes multi-agents	13
1.3.5	Techniques de gestion du handover spectral	14
1.4	Gestion de la mobilité	15
1.4.1	Gestion de la mobilité dans un réseau sans fil	15
1.4.2	Gestion de la mobilité dans un réseau à radio cognitive	18
1.5	Conclusion.....	20

1.1 Introduction

Les réseaux sans fil actuels sont caractérisés par des politiques statiques de gestion du spectre. Cependant, la nécessité de mettre en place des solutions d'accès dynamique au spectre (DSA: *Dynamic Spectrum Access*) [3, 4, 5], afin de mieux exploiter les ressources spectrales disponibles, s'est nettement imposée suite à l'augmentation du besoin en bande passante. La radio cognitive est une technologie prometteuse en termes d'accès dynamique et opportuniste au spectre dont les fonctionnalités primordiales au bon fonctionnement sont la détection, l'accès et le partage du spectre ainsi que la mobilité spectrale. Nous commencerons ce premier chapitre par la présentation du concept de la radio cognitive ainsi que ses différentes composantes et fonctionnalités. Puis, nous introduisons brièvement les principales approches de détection de spectre. Ensuite, nous nous intéressons aux approches de partage du spectre, notamment la théorie de jeux, les protocoles de contrôle d'accès au canal et les systèmes multi-agents. Nous poursuivrons par une description des travaux existants relatifs au handover spectral. A la fin de ce chapitre, nous dresserons un état de l'art des mécanismes de gestion de la mobilité dans les réseaux sans fil et dans les réseaux à radio cognitive.

1.2 Généralités sur la radio cognitive

Le concept de radio cognitive a été introduit par Joseph Mitola III [6], lors d'un séminaire à l'institut royal de technologie en Suède (KTH) en 1998. Ses recherches s'étaient concentrées sur le langage de représentation de la radio (RKRL) et sur la manière d'augmenter la flexibilité au niveau des services sans fil. La radio cognitive représente une nouvelle approche dans le domaine des communications sans fil que Mitola décrit comme étant une radio qui emploie un modèle de raisonnement pour atteindre un niveau de compétence spécifié dans les domaines liés à la radio [7].

1.2.1 Concepts et définitions

La cognition regroupe toutes les activités mentales qui comprennent l'acquisition, le stockage, la transformation et l'utilisation des connaissances. En intelligence artificielle, la cognition explore divers processus mentaux tels que la perception, la mémoire, le langage, la résolution de problèmes, le raisonnement et la prise de décision [8] qui dépassent le cadre de la cognition naturelle, humaine ou animale. La cognition a été décrite, à partir des années 1950, comme un système de traitement de l'information créant et manipulant des représentations mentales du monde. Cette description a été fortement influencée par le développement rapide de l'informatique à la fin des années 1940 [9].

La radio cognitive est donc un système doté de capacités cognitives qui permettent à un terminal d'acquérir une connaissance sur son environnement, d'avoir une vision des ressources radio disponibles et enfin de lui donner la possibilité d'exploiter ces bandes inutilisées pour aboutir à une gestion plus efficace du spectre radio.

Plusieurs définitions ont été présentées par d'autres auteurs pour décrire la radio cognitive. Parmi elles, celle d'Akyildiz [3] qui considère la radio cognitive comme étant la technologie clé qui permettra aux réseaux de nouvelle génération d'utiliser et de partager le spectre de manière opportuniste. Selon Haykin [4], la radio cognitive représente un système de communication sans fil intelligent qui est conscient de son environnement et qui utilise les

méthodologies “*understanding-by-building*” (*compréhension par construction*) afin d’étudier son environnement et de s’adapter aux différentes variations statistiques. Ainsi, deux principaux objectifs sont pris en compte dans cette définition : (1) la communication fortement fiable au besoin, et (2) l’utilisation efficace du spectre radio.

La Commission Fédérale des Communications (FCC) [10] définit la radio cognitive comme étant une radio qui peut changer les paramètres de son émetteur sur la base des interactions avec l’environnement dans lequel elle opère.

A partir de toutes ces définitions, nous pouvons dire que la radio cognitive est un système intelligent capable de prendre conscience de son environnement à l’aide d’antennes spécifiques et de tirer profit des informations perçues afin d’optimiser l’utilisation des bandes de fréquences. En d’autres termes, la radio cognitive est capable de détecter les parties libres du spectre et de les utiliser en évitant les interférences entre les utilisateurs.

1.2.2 Réseau à radio cognitive

Un réseau à radio cognitive (Cognitive Radio Network ou CRN) [11] est un réseau sans fil prometteur en matière d’utilisation du spectre radio dans lequel certains nœuds du réseau sont des terminaux intelligents équipés de la technologie radio cognitive, ce qui les rend capables d’accéder au spectre de manière opportuniste pour exploiter les parties inutilisées. Les CRNs forment une nouvelle famille d’utilisateurs qui tentent d’exploiter les bandes de fréquences sous-utilisées. Ainsi, nous pouvons distinguer deux principaux types d’acteurs dans un CRN : des utilisateurs secondaires et des utilisateurs primaires.

- **Utilisateur Secondaire** (Secondary User ou **SU**) : c’est l’utilisateur à radio cognitive qui ne possède pas de licence et souhaite utiliser les parties libres du spectre.
- **Utilisateur Primaire** (Primary User ou **PU**) : c’est l’utilisateur qui possède une licence pour opérer dans une bande de fréquences bien spécifique. Il est donc prioritaire pour l’utilisation de cette bande de spectre.

Les SUs peuvent accéder aux bandes de spectre inoccupées durant l’absence des PUs et libèrent le canal dès qu’un PU veut y accéder mais peuvent également continuer à utiliser ces bandes sous réserve d’obtention de l’accord du PU.

Akyildiz dans [11] présente une architecture d’un réseau à radio cognitive composée de deux principaux groupes. Le premier groupe est appelé *Réseau primaire* regroupant les PUs. Le deuxième groupe est un *Réseau secondaire* contenant les SUs, appelé aussi réseau à accès dynamique au spectre. Un réseau à radio cognitive peut contenir aussi un « *broker* » qui se charge de distribuer les ressources spectrales entre les différents réseaux secondaires. Cette architecture est illustrée par la figure 1.1.

Dans ce réseau, on peut également trouver des stations de base (BS) secondaires et des stations de base primaires si le réseau est avec infrastructure. Les BS secondaires (primaires respectivement) assurent le contrôle des activités des SUs (des PUs respectivement).

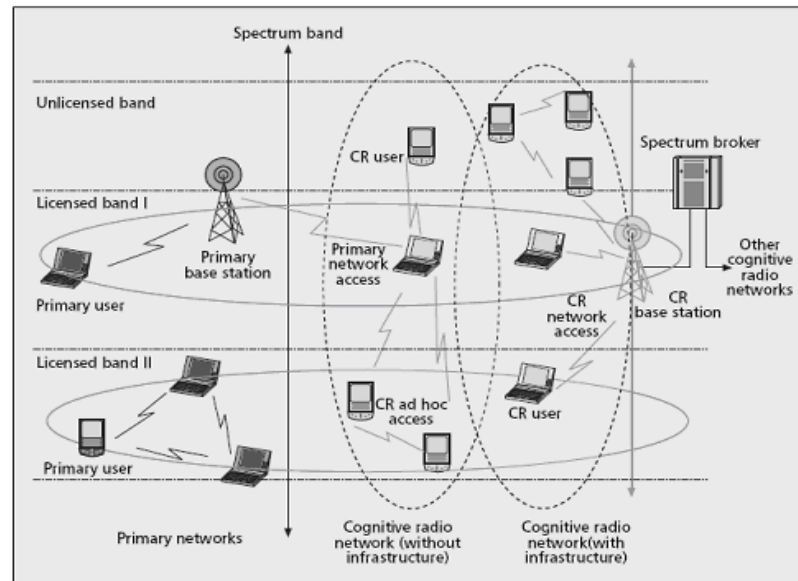


Figure 1.1 Architecture d'un réseau à radio cognitive [11]

Nous détaillons, dans ce qui suit, les différentes caractéristiques d'une radio cognitive et nous expliquons son architecture fonctionnelle.

1.2.3 Cycle cognitif

Afin de pouvoir bien accomplir son rôle, la radio cognitive doit être dotée de certaines capacités fonctionnelles que Mitola décrit dans, ce qu'il a appelé, le cycle cognitif [7]. La figure 1.2 décrit en détail ce cycle 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 :

- **Observation** : Extraire plusieurs informations à partir de l'environnement comme la fréquence radio, le type de données transmises (audio, vidéo, etc.), la position, etc.
- **Orientation** : Evaluer la situation et déterminer si elle est familière et réagir immédiatement, si nécessaire.
- **Planification** : Identifier les actions alternatives à prendre.
- **Décision** : Décider entre les actions candidates, en choisissant la meilleure d'entre elles.
- **Action** : Agir sur l'environnement en effectuant, par exemple, des modifications au niveau de la fréquence radio.
- **Apprentissage automatique** : S'informer à partir de l'expérience acquise à travers l'observation de l'environnement.

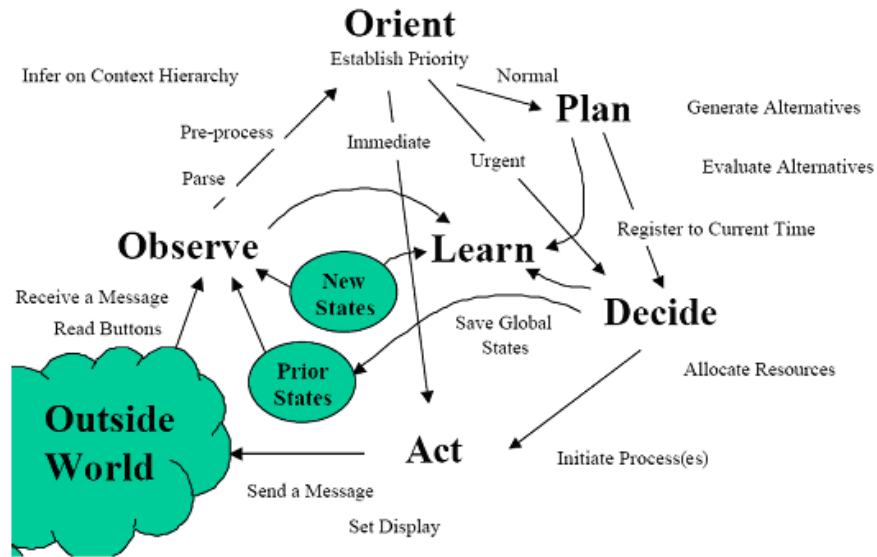


Figure 1.2 Cycle cognitif [7]

Toutes ces capacités fonctionnelles peuvent être résumées en deux principales caractéristiques que doit avoir une radio cognitive :

- **La capacité cognitive «Cognitive capability»** : représentant la capacité de la radio d'extraire de l'information à partir de son environnement.
- **La capacité de reconfiguration «Reconfigurability»** : représentant la possibilité de reconfigurer ses paramètres sans avoir à modifier les composantes matérielles.

1.2.4 Fonctions de base de la radio cognitive

L'objectif principal de la radio cognitive consiste à gérer le spectre de manière opportuniste de manière à optimiser l'exploitation des ressources radio disponibles. Akyildiz [11] définit quatre principales fonctionnalités dans le processus de gestion de spectre qui sont la **détection** du spectre « *Spectrum Sensing* », la **décision** « *Spectrum Decision* », le **partage** du spectre « *Spectrum Sharing* » et enfin la **mobilité** spectrale « *Spectrum Handoff* ».

La détection du spectre

Cette fonctionnalité permet à la radio d'extraire des informations à partir de son environnement, d'avoir une connaissance générale sur le spectre et de détecter ainsi les parties libres du spectre que la radio cognitive permet d'exploiter.

La décision du spectre

A partir des informations extraites lors de la phase détection de spectre, le système à radio cognitive a la possibilité de choisir le canal le plus approprié au besoin de l'utilisateur parmi la liste des bandes de spectres libres détectées. Cette décision doit tenir compte de plusieurs critères comme la QoS demandée par l'application, le besoin de l'utilisateur en bande passante, etc. Il s'agit, dans cette phase, de caractériser les canaux à travers plusieurs paramètres puis de choisir le canal adéquat en tenant compte des caractéristiques des canaux disponibles.

Le partage du spectre

L'existence de plusieurs utilisateurs dans la même bande de spectre nécessite des mécanismes et des protocoles d'allocation pour éviter les collisions et les conflits. Un terminal équipé par la technologie radio cognitive peut se confronter au cas où le spectre est occupé par des SUs, comme lui, ou bien des PUs ayant la licence pour l'utilisation de la bande de spectre. Dans les deux cas, le système à radio cognitive a besoin de mécanismes bien spécifiques pour gérer le partage avec les autres utilisateurs et éviter les interférences.

La mobilité spectrale

La mobilité spectrale, appelée aussi *handover spectral*, permet aux terminaux à radio cognitive de changer de bande de spectre courante vers une nouvelle bande, si nécessaire. Plusieurs situations peuvent entraîner un handover spectral, parmi lesquelles nous pouvons citer les cas suivants :

- seulement des SUs sont en train d'utiliser le spectre et ils détectent, à un moment donné, l'arrivée du PU propriétaire de la bande;
- un PU et au moins un SU coexistent dans la même bande de spectre et à un instant donné, le PU aura besoin de récupérer le spectre qu'il avait déjà alloué au SU,
- la durée d'allocation de spectre, attribuée au SU, expire;
- la partie du spectre libre choisie ne satisfait plus les exigences de l'utilisateur en termes de QoS;
- l'utilisateur est mobile, ce qui peut rendre inaccessible la partie du spectre en cours d'utilisation lors de ses déplacements.

Pour le reste du document, les expressions 'partage du spectre' et 'allocation du spectre' seront utilisées de façon interchangeable. Les expressions 'mobilité spectrale' ou 'handover spectral' seront également utilisées de manière interchangeable.

La figure 1.3 présente les quatre fonctions de base pour la gestion du spectre dans le cycle de la radio cognitive ainsi que les différentes transitions entre elles. En effet, après la détection des bandes de spectre libres, un utilisateur à radio cognitive choisit le canal le plus approprié à ses besoins. Puis, il commence l'exploitation ou le partage du spectre avec les autres utilisateurs, s'ils existent. Par la suite, deux situations peuvent se présenter: (1) Le temps d'allocation expire rendant ainsi le changement de canal non nécessaire, mais conduisant néanmoins à une nouvelle détection du spectre pour un nouveau partage, (2) L'utilisateur à radio cognitive doit changer de canal et effectue de ce fait un handover spectral.

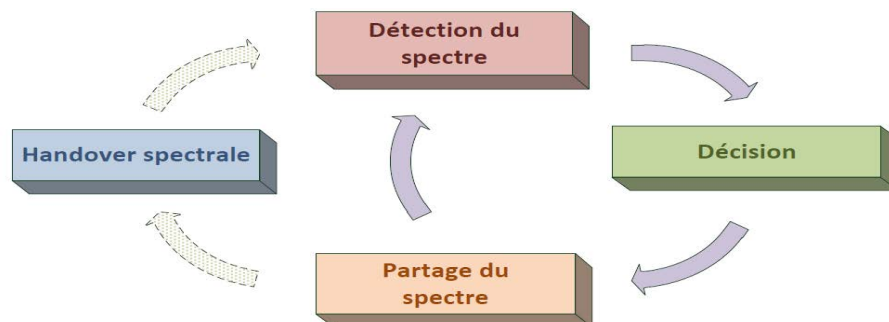


Figure 1.3 Fonctions de gestion du spectre

Différentes approches sont proposées dans la littérature pour produire des solutions efficaces pour chacune des fonctions de gestion de spectre décrites précédemment. La description des techniques existantes pour la gestion dynamique du spectre dans les réseaux à radio cognitive fera l'objet de la section suivante.

1.3 Techniques de gestion dynamique du spectre

La gestion dynamique du spectre dans le contexte de la radio cognitive [67] se fait sur quatre principales étapes, comme décrit dans la sous-section précédente (sous section 1.2.4), qui sont: la détection, la décision, le partage et la mobilité spectrale.

Dans cette section, nous commençons par présenter brièvement les travaux relatifs à la détection du spectre sortant du cadre de notre travail mais dont la présentation sommaire nous semble nécessaire pour la compréhension du reste du manuscrit. Puis, nous détaillons les principales techniques de partage comme la théorie de jeux, les protocoles de contrôle d'accès et les systèmes multi-agents. Enfin, nous présentons les principales techniques proposées dans la littérature pour assurer le handover spectral.

1.3.1 Techniques de détection

De nombreux travaux de recherche ont largement étudié la problématique de détection du spectre [12]. Généralement, les algorithmes proposés cherchent à identifier la présence d'un signal émis par un PU pour confirmer sa présence et ceci à travers une observation locale du voisinage du SU. Parmi les méthodes existantes, on peut citer la détection d'énergie [13-17] où la quantité d'énergie reçue peut déterminer la présence ou non d'un PU. Cette méthode ne peut être efficace que dans le cas où le rapport signal sur bruit (SNR : Signal to Noise Ratio) est élevé. D'autres travaux de recherche se sont basés sur l'hypothèse suivante : les canaux libres correspondent à une combinaison du signal transmis par le PU, du AWGN (Additive White Gaussian Noise) et du gain d'amplitude du canal [18, 19]. Une troisième catégorie d'études utilise la technique de détection du filtre adapté [20, 21] avec laquelle les signaux des PUs sont connus à l'avance par les SUs et le filtre adapté génère une valeur élevée de gain, ce qui maximise le SNR reçu. La difficulté avec cette méthode réside dans la nécessité d'avoir une connaissance préalable des signaux propres aux PUs.

Une étude comparative entre les techniques proposées a été élaborée par [22]. Les analyses ont montré que la détection du filtre adapté donne des résultats meilleurs dans les trois canaux d'évanouissement (AWGN, Rayleigh et plat) par rapport à la détection d'énergie. Cependant, cette technique demande des connaissances antérieures comme le type de la modulation, la forme d'impulsion, le format du paquet, etc.

La mesure d'interférence est une autre méthode qui a été utilisée pour la détection du spectre. Traditionnellement, l'interférence peut être contrôlée par l'émetteur à travers la puissance émise et l'emplacement d'émetteurs individuels. Cependant, dans le contexte de la radio cognitive, l'interférence se produit réellement au niveau des récepteurs. Ainsi, la FCC [1] a proposé un nouveau modèle pour mesurer l'interférence qui se base sur la mesure d'une température d'interférence limite. Cette dernière correspond à la quantité de nouvelles interférences que le récepteur peut tolérer. Bien que ce modèle soit assez performant, la difficulté réside encore dans la détermination de la température d'interférence limite.

Une autre catégorie de solutions s'est basée sur la détection coopérative [23-25] dans laquelle les nœuds à radio cognitive collaborent, soit de manière distribuée en échangeant des informations entre eux pour détecter le spectre, soit de manière centralisée en considérant un nœud principal qui collecte les informations obtenues à travers les observations locales des SUs pour construire une connaissance générale sur l'environnement. La détection coopérative permet de réduire les problèmes d'interférence. Cependant, cette technique peut poser le problème d'inexactitude des informations de détection échangées. En effet, cette inexactitude est liée aux algorithmes de détection utilisés par les SUs.

1.3.2 Gestion basée sur le contrôle d'accès au canal (MAC)

Certains travaux de recherches considèrent que le problème d'accès au spectre est similaire au problème traditionnel de contrôle d'accès au canal (MAC: Medium Access Control) où plusieurs utilisateurs essaient d'accéder au même canal en même temps. Pour éviter les interférences, chaque utilisateur doit se coordonner avec ses voisins. Dans [26], par exemple, chaque SU se met en écoute et envoie un « beacon » sur le canal de contrôle à chaque fois qu'il détecte un canal libre. Les utilisateurs qui ont détecté le même canal libre communiquent entre eux pour partager le spectre.

Les protocoles MAC dans [27, 28] exploitent la fonction de détection pour construire une carte d'opportunité d'accès au spectre et aident aussi dans l'ordonnancement des ressources spectrales disponibles ainsi qu'à la distribution entre les utilisateurs appartenant à des systèmes hétérogènes. En outre, ces protocoles permettent aux utilisateurs de libérer les canaux sélectionnés quand la qualité de service devient inacceptable. Généralement, dans les approches utilisant des protocoles MAC, quand un SU est en train d'utiliser un canal bien spécifique, le transmetteur et le récepteur envoient tous les deux un signal, à travers le canal de contrôle associé, de façon à ce que les interférences puissent être évitées. Pour le contrôle du canal, plusieurs méthodes peuvent être adoptées : Dans [29], par exemple, les auteurs se sont basés sur la transformée de Fourier rapide (*FFT: Fast Fourier Transform*) pour la conception des radios, ce qui permet théoriquement aux SUs récepteurs de détecter les fréquences porteuses et la bande passante du signal sans envoyer d'informations de contrôle. Dans [30], les auteurs ont utilisé un plan global pour échanger les informations de contrôle entre les SUs. Cependant, ce contrôle global peut engendrer un nombre important d'échanges d'informations, ce qui peut causer des surcharges au niveau des SUs.

Il est vrai que les protocoles MAC présentent une solution au problème d'accès dynamique au spectre, en permettant aux SUs d'accéder et de transmettre sur différents canaux distincts. Cependant, la plupart de ces protocoles souffre du problème du canal de contrôle commun [31]. En effet, la majorité des protocoles MAC proposés suppose l'existence d'un canal commun pour l'échange d'informations de contrôle. Cependant, cette hypothèse est contradictoire avec la nature opportuniste des réseaux à radio cognitive et peut mener à un goulot d'étranglement dans le cas d'une charge élevée de trafic [32]. Afin de résoudre ce problème, certaines recherches ont proposé d'avoir des canaux de contrôle multiples [33-36] au lieu d'un seul canal de contrôle commun. Dans ces travaux, les auteurs essaient de répondre à plusieurs défis comme : (1) l'échange d'informations entre les SUs en minimisant les

collisions, (2) le maintien des informations sur les canaux de contrôle disponibles et (3) la sélection de la fréquence optimale pour un nouveau canal de contrôle commun [32].

1.3.3 Gestion du spectre en utilisant la théorie des jeux

La théorie de jeux [37] présente une technique très fréquemment adoptée dans la gestion du spectre (détection et partage essentiellement). La théorie des jeux fournit des outils mathématiques pour améliorer et analyser les interactions des terminaux à radio cognitive. De ce fait, on peut distinguer deux grands courants :

- Agents coopératifs ayant un but commun où les joueurs choisissent une stratégie qui assurerait un gain équitable à tous les participants [38-40].
- Agents égoïstes ayant des buts individuels où chaque joueur choisit la stratégie qui maximise son gain personnel sans tenir compte des autres joueurs, et c'est l'approche la plus adoptée [41, 44].

Dans [38-40], le scénario de détection et d'accès au spectre est modélisé par un jeu coopératif. Les SUs coopèrent pour détecter les bandes de spectre libres et forment ainsi des coalitions pour faciliter leur coopération et leur accès au spectre. Le gain de chaque utilisateur, dans ce jeu, est calculé en fonction du travail fourni au sein de la coalition à laquelle il appartient en termes d'informations fournies à propos des activités des PUs. Ces informations peuvent être obtenues grâce à la détection locale du spectre.

La théorie des jeux est également largement utilisée pour le partage de spectre [41, 42, 43, 160]. Ces solutions peuvent être classées principalement en trois catégories :

- Partage du spectre basé sur les jeux non coopératifs et l'équilibre de Nash où les utilisateurs sont généralement égoïstes et ne veulent que maximiser leur utilisation.
- Partage basé sur les jeux coopératifs où les utilisateurs se basent sur des conventions et des accords sur la distribution du spectre entre eux.
- Partage à travers les jeux stochastiques où les utilisateurs adaptent leur stratégie selon les changements de l'environnement et les stratégies des autres utilisateurs.

Dans [44], un nouvel algorithme d'accès multiple au spectre dans les réseaux à RC a été proposé en utilisant la théorie des jeux. Le scénario d'étude a été modélisé comme un jeu non coopératif où les joueurs ne connaissent pas le nombre total de terminaux participants. L'algorithme proposé permet d'arriver à un équilibre de Nash qui maximise le débit de transmission.

1.3.4 Gestion du spectre en utilisant les systèmes multi-agents

Les solutions basées sur les systèmes multi-agents (SMA) s'inspirent de l'intelligence artificielle distribuée et mettent en œuvre deux comportements des agents : (1) un comportement coopératif où les agents sont non égoïstes et visent l'intérêt collectif et (2) un comportement compétitif où chacun des agents vise son intérêt individuel. Parmi les stratégies coopératives, nous pouvons citer les approches à base de tableau noir ('blackboard') et les

réseaux contractuels ('Contract Net Protocol'). Les ventes aux enchères, les heuristiques et les négociations sont des exemples de techniques compétitives.

Les SMA sont de plus en plus utilisés dans des solutions d'accès dynamique au spectre dans un réseau à radio cognitive afin d'assurer une gestion plus efficace de la ressource radio. Les solutions basées sur les SMA [97] sont généralement proposées pour traiter les problématiques liées à la détection et au partage du spectre.

Etant donné que nous adoptons l'approche multi-agents pour la résolution de notre problématique d'allocation et de mobilité spectrale dans les réseaux à RC, le chapitre suivant sera consacré à la description détaillée des solutions utilisant les techniques multi-agents dans le contexte de la radio cognitive, précédé d'une présentation de cet outil. Par ailleurs, dans la sous section suivante, nous nous intéressons aux techniques de gestion de handover les plus utilisées dans la littérature.

1.3.5 Techniques de gestion du handover spectral

La gestion de la mobilité spectrale présente un axe de recherche récente attractif. Certains articles comme [45, 46, 47, 148] se contentent de souligner certains défis et opportunités pour les futurs travaux de recherche sur la mobilité spectrale. D'autres travaux adoptent l'algorithme de handover spectral le plus simple qui oblige les utilisateurs secondaires de libérer la bande de fréquences utilisée suite à l'arrivée d'un PU et passer ensuite à un autre canal disponible. Ceci peut engendrer un nombre important de handovers spectraux et dégrader les performances des SUs voire provoquer l'interruption de service.

Pour aller au-delà de ces problèmes, les auteurs dans [48] supposent que les SUs peuvent continuer à transmettre, même si le PU apparaît dans la bande, à condition que l'interférence avec le PU ne dépasse pas un certain seuil. Ils proposent ainsi un algorithme de décision, basé sur la pondération additive simple (SAW : Simple Additive Weights), afin de sélectionner le canal cible en évitant l'interruption de service. De même, les auteurs de [49] s'intéressent au handover spectral en proposant que les SUs utilisent la bande de fréquences aussi longtemps que le degré d'interférence causée par le PU ne dépasse pas une certaine limite. Cette proposition est basée sur la logique floue, permettant ainsi de fournir une solution de décision de handover dans un contexte caractérisé par des informations incertaines, incomplètes et hétérogènes.

Généralement, les travaux proposés, jusqu'à aujourd'hui, pour la gestion du handover spectral sont classés principalement en deux catégories : (1) approches proactives et (2) approches réactives.

A travers les techniques de handover réactives [50, 51], les SUs effectuent le changement spectral après la détection d'un PU. Le nouveau canal destinataire est déterminé grâce à un algorithme de sélection instantané. Dans le cas proactif [52-56], les SUs prévoient l'état de disponibilité du canal et effectuent le changement de bande spectrale avant que le PU n'occupe le canal. Cette prédiction est basée sur des statistiques de l'utilisation passée du canal. Le nouveau canal que le nœud RC utilisera est déterminé à partir des statistiques ou de l'historique du trafic de la bande spectrale avant l'établissement de la connexion en question.

Comme exemple de modèle prédictif pour l'accès dynamique au spectre grâce à un handover proactif, l'approche proposée dans [52] est basée sur l'historique des canaux. Un

autre algorithme de prédiction de spectre est proposé dans [54] utilisant une approche coopérative dans le but de réduire le temps de recherche d'un nouveau canal libre. Cette approche coopérative utilise trois principaux paramètres qui sont : (1) le temps de transmission moyen estimé, (2) la prédiction de la probabilité d'apparition du PU et (3) la moyenne de disponibilité du canal. Dans [56], les auteurs se sont basés sur les statistiques de trafic, obtenues suite à des observations de longue durée, pour prévoir le canal vers lequel l'utilisateur secondaire se déplacera.

En comparaison avec les techniques de gestion de handover spectral réactives, les approches proactives semblent être capables de réduire le délai de handover puisque le canal destinataire est déjà présélectionné et il n'y a pas besoin d'un temps supplémentaire pour la détection du spectre. Cependant, les approches proactives peuvent rencontrer de grands défis dans le cas où le canal pré-choisi, pendant la phase de prédiction, n'est plus disponible au moment de l'exécution du handover spectral.

Dans notre travail, l'utilisateur secondaire effectue un handover spectral sous réserve de l'autorisation du PU. En d'autres termes, le SU commute vers un nouveau canal lorsqu'il change de réseau de couverture (mobilité de l'utilisateur) ou lorsque la durée attribuée par le PU pour l'accès au spectre expire. Notre proposition sera ainsi proactive dans le sens où le SU sélectionne le canal cible au préalable, dès qu'il s'approche du nouveau réseau et avant l'exécution du handover.

1.4 Gestion de la mobilité

La gestion de la mobilité des utilisateurs est une problématique majeure dans les réseaux sans fil mobiles. En effet, la mobilité des terminaux peut entraîner l'interruption du service et la dégradation de la qualité de service. De ce fait, plusieurs mécanismes de handover dans les réseaux cellulaires ont été proposés dans la littérature afin de garantir aux nœuds du réseau sans fil mobile un fonctionnement continu sans interruption. Cependant, au niveau des réseaux à radio cognitive, les recherches traitant la problématique de gestion de mobilité ne font que débiter.

Dans cette section, nous présentons en premier lieu les mécanismes existants pour la gestion de la mobilité dans les réseaux sans fil actuels. Dans un deuxième temps, nous introduisons un état de l'art sur la gestion de la mobilité dans les réseaux à radio cognitive.

1.4.1 Gestion de la mobilité dans un réseau sans fil

La gestion de la mobilité représente l'ensemble des processus qui permettent aux utilisateurs mobiles de se déplacer facilement sans perdre de données et sans interruption de service. Elle contient deux composantes : La gestion de la localisation et la gestion du handover [57] :

La gestion de la localisation

C'est un processus qui permet de localiser et suivre le nœud mobile afin de vérifier la disponibilité des services demandés. Les principales étapes de localisation sont:

- L'enregistrement de position '*location registration*' où le nœud mobile informe régulièrement le réseau du nouvel élément d'accès auquel il est attaché. Ceci permettra au réseau d'authentifier l'utilisateur et de réviser son profil.
- La livraison d'appel '*call delivery*' où le réseau s'informe sur le profil et la position actuelle de l'hôte mobile pour délivrer les appels vers la nouvelle position du mobile.

La figure 1.4 détaille les différentes composantes de la gestion de la localisation. Les recherches dans ce domaine s'intéressent à la sécurité, à la conception de l'architecture de base de données pour les utilisateurs mobiles, à la conception de procédures de messagerie et de transmission de messages de signalisation entre les différents éléments du réseau, etc.

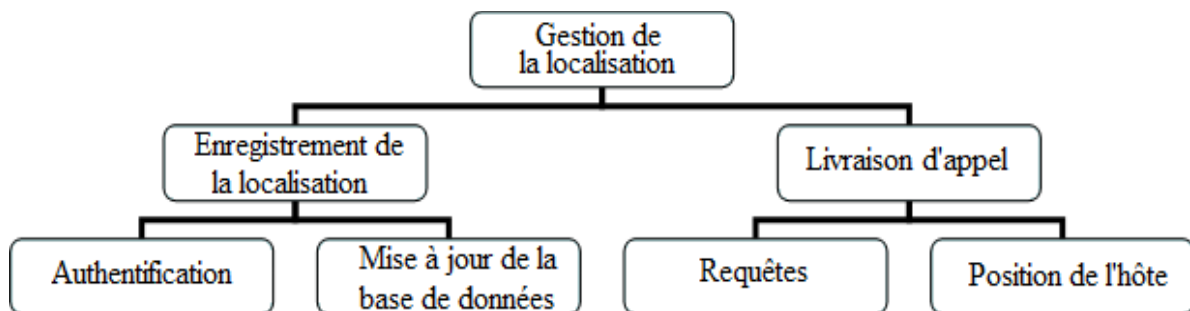


Figure 1.4 Gestion de la localisation

La gestion du handover

Pour une communication dans un réseau cellulaire (GSM, UMTS, etc.), le *handover* est un mécanisme fondamental intégrant un ensemble d'opérations permettant de maintenir la continuité de service d'un nœud mobile lors de son déplacement d'une zone à une autre. Le handover permet l'itinérance entre cellules ou opérateurs et tient compte de la direction du mouvement. La gestion du handover permet donc de maintenir la connectivité du terminal afin d'assurer la non interruption de l'application en cours.

Le processus de handover s'effectue en trois phases [57, 58] illustrées par la figure 1.5.

- **La phase d'initiation** : Le nœud mobile déclenche le handover pour obtenir une meilleure qualité de service, par exemple, ou afin de conserver l'accès au réseau. Ainsi, il observe les réseaux accessibles afin de décider l'exécution du handover.
- **La phase de décision** : Les résultats d'observations obtenus lors de la phase d'initiation sont comparés avec des valeurs prédéfinies sur la base desquelles la décision de handover sera prise.
- **La phase d'exécution** : Le nœud mobile commence le handover et la puissance de chaque canal de communication est mise à jour. Le contrôle de flux de données (la livraison des données à partir de l'ancienne vers la nouvelle connexion) est maintenu grâce à un service de réception garantie.

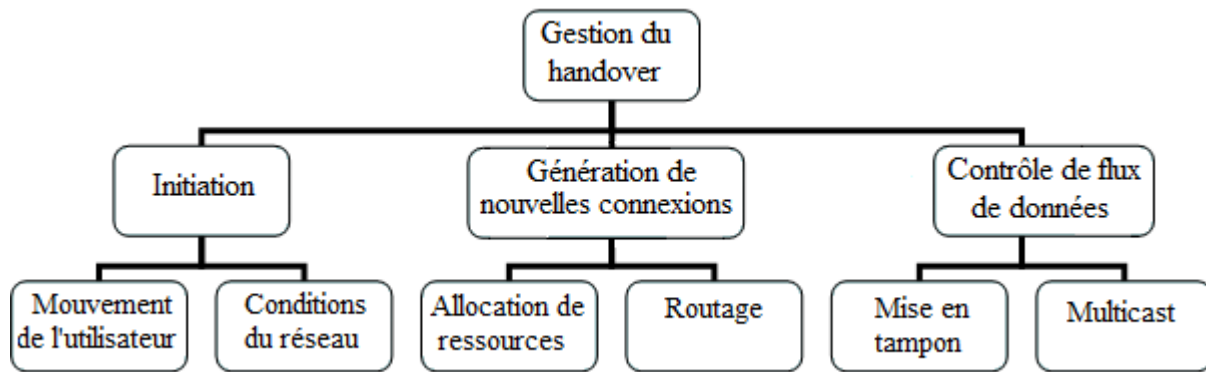


Figure 1.5 Gestion du handover

Par ailleurs, il est important de différencier le handover horizontal du handover vertical [158]. En effet, il s'agit d'un handover horizontal quand un nœud mobile se déplace entre deux cellules utilisant la même technologie (par exemple d'une cellule GSM vers une autre), appelé aussi un handover intra système. Cependant, le handover vertical, appelé également handover inter-système, est établi entre deux technologies différentes (exemple déplacement d'une cellule GSM vers une cellule 3G).

Les mécanismes de handover

Pour pouvoir gérer les handovers dans les réseaux sans fil, deux aspects importants doivent être étudiés qui sont : (1) la décision de handover et (2) la sélection appropriée du réseau d'accueil vers lequel le mobile va se déplacer. La décision de handover dépend en particulier de la QoS exigée par l'utilisateur [60].

Les techniques de décision de handover traditionnelles utilisent essentiellement le facteur de puissance du signal reçu (RSS : Received Signal Strength) qui diminue quand l'utilisateur s'éloigne du point d'accès auquel il est attaché. Ainsi, le mobile doit changer de réseau dès que le signal s'affaiblit pour garantir la continuité de service. D'autres facteurs sont également pris en compte lors de la décision de handover car le RSS tout seul ne peut pas décrire toutes les caractéristiques du réseau. En effet, à partir d'une étude comparative entre les différentes stratégies de handover vertical dans [59], il s'est avéré que les politiques de décision du handover traditionnelles (basées sur la valeur de RSS) ne sont pas suffisantes pour prendre une décision d'anticipation de handover dans les réseaux hétérogènes car elles ne prennent pas en compte le contexte actuel et les préférences de l'utilisateur.

L'auteur dans [60] classe les algorithmes de décision de handover dans les réseaux hétérogènes en deux catégories : approches fondées sur le RSS et approches fondées sur *une fonction de décision*. La décision de handover dépend aussi du type de handover, qu'il soit horizontal ou vertical. Les métriques les plus utilisées pour évaluer les performances du handover sont essentiellement *la probabilité de blocage du handover*, *le taux de perte* et *le délai du handover* [61, 62].

Les solutions de gestion de la mobilité diffèrent, bien évidemment, selon le type du réseau, qu'il s'agit d'un réseau hétérogène [60], un réseau ad hoc [156] ou un réseau cellulaire [157]. En plus, la gestion de la mobilité est fortement liée à la conservation de la qualité de service qui dépend, en outre que le type de réseau, du type de flux transmis. Garantir une

qualité de service pour un streaming vidéo est beaucoup plus difficile que pour un transfert de données simple [158]. En effet, lorsque les utilisateurs sont mobiles, leur débit s'affaiblit en s'éloignant de la station de base, ce qui peut être acceptable pour les utilisateurs qui ont besoin de données mais pas pour ceux qui requièrent du streaming nécessitant un débit constant.

Bien qu'intéressantes, les solutions de mobilité dans les réseaux sans fil, cellulaires et hétérogènes ne peuvent pas être appliquées telles quelles aux réseaux à radio cognitive (CRN) puisqu'ils s'y ajoutent le problème de gestion du spectre et la nécessité du handover spectral. Ainsi, nous présentons, dans la section suivante, les techniques récemment proposées pour la gestion de la mobilité dans les réseaux à radio cognitive.

1.4.2 Gestion de la mobilité dans un réseau à radio cognitive

L'aspect mobilité est très important dans les réseaux à radio cognitive et sa prise en compte nécessite (1) d'adapter les mécanismes d'anticipation de handover au contexte de la radio cognitive ou bien (2) de proposer des solutions spécifiques à ce nouveau type de réseaux. Les travaux qui s'intéressent au problème de mobilité dans le contexte de la radio cognitive ne sont pas très avancés bien que ce problème ait été posé dès l'apparition de la radio cognitive. En effet, la plupart des travaux de recherche sur la radio cognitive se sont concentrés sur le cas des réseaux fixes sans tenir compte de la mobilité et du handover.

Toutefois, quelques travaux [58, 63, 64, 65] ont eu recours à la radio cognitive pour améliorer la gestion de la mobilité dans les réseaux cellulaires ou hétérogènes traditionnels. Par exemple, dans [64], est présentée une approche réactive qui permet de changer les paramètres de la station de base pour l'adapter aux exigences des nouveaux services dans les réseaux sans fil modernes et aux défis futurs dans les systèmes cellulaires. Ce changement est effectué à l'aide d'agents qui gèrent les cellules via des stratégies de négociation, de raisonnement, de prédiction, etc., dans le but de minimiser le délai et les interférences. Cette solution se base sur les caractéristiques de la RC (détection, changement de paramètres, etc.), mais elle est seulement adaptée aux réseaux cellulaires traditionnels avec un système de gestion centralisé au niveau des éléments d'accès habituels.

CR-MANET [58] propose de combiner les réseaux cellulaires avec les réseaux ad-hoc composés de terminaux à radio cognitive [66] afin d'améliorer le développement des systèmes de communications mobiles. Les auteurs donnent ainsi quelques recommandations pour les recherches à venir sur différents niveaux: (1) *Au niveau de la gestion de la localisation*, il est nécessaire d'assurer une gestion dynamique des zones de localisation dans un réseau sans infrastructure. (2) *Au niveau de la mobilité et de la qualité de service*, il est essentiel d'avoir un contrôle d'admission (CAC) lors d'un handover. Le délai et le taux de perte de paquets doivent être aussi contrôlés et garantis tout au long du processus de handover. (3) *Au niveau de la gestion du handover spectral*, il est important d'anticiper l'occurrence du handover spectral et de minimiser le nombre de changement de fréquences de façon à réduire le délai et la perte de paquets.

D'une façon générale, les études qui s'intéressent au problème de mobilité dans les réseaux à radio cognitive ne sont pas nombreuses et la plupart d'entre elles se limite à examiner les défis et les opportunités pour la conception d'un algorithme de mobilité sans donner une solution efficace au problème [66-68].

Dans [67], les auteurs proposent une nouvelle architecture qui traite principalement la sélection du spectre et le handover au niveau de la couche réseau. Ils proposent également l'implication de différentes couches pour le contrôle et la connectivité. Cependant, cette architecture ne prend pas en considération les délais importants qui se produisent pendant le handover spectral ni la nécessité d'assurer la continuité de service. En outre, cette approche est présentée conceptuellement sans aucune validation.

Par ailleurs, dans [68], les auteurs discutent de l'impact de la mobilité à différents niveaux de la pile protocolaire. A travers une étude de cas centrée sur le routage dans les réseaux à radio cognitive Ultra Wide Band (UWB), les auteurs ont prouvé que toute solution pour le réseau à RC peut effectivement conduire à de mauvais résultats si la mobilité des terminaux n'est pas prise en compte lors de l'étape de conception. En outre, cette étude confirme que les solutions spécifiques aux réseaux mobiles à radio cognitive sont encore rares dans la littérature et que la plupart d'entre elles opèrent sur la couche 3 (réseau) [69] et la couche 4 (transport) [70].

Certaines autres études ont essayé de résoudre des problématiques relatives à la mobilité des terminaux à radio cognitive tels que le contrôle de congestion [71] et l'ordonnancement du spectre [72]. Dans [71], l'objectif du système de contrôle de congestion proposé était d'assurer aux utilisateurs à RC la possibilité de garder leurs canaux en cours aussi longtemps que possible. Les auteurs ajoutent ainsi un agent d'attribution de canal (CAA : Channel Assigning Agent) au niveau du protocole MIP (Mobile Internet Protocol) afin d'assurer le contrôle de congestion. Toutefois, dans leur analyse, les auteurs se sont concentrés uniquement sur la contribution de l'agent CAA au contrôle de congestion plutôt que sur les performances du handover.

Dans [72], un algorithme d'ordonnancement et de planification de la répartition du spectre entre les terminaux mobiles à radio cognitive a été proposé. Les auteurs proposent une plateforme générale d'ordonnancement pour résoudre le problème *d'ordonnancement du canal de débit maximal* MTCS (Maximum Throughput Channel Scheduling) basé sur l'information de mobilité. Cette solution essaie de trouver, pour chaque utilisateur, un ordonnancement d'attribution de canaux de façon à ce que le débit maximal prévu puisse être atteint. De même, dans cette étude, les auteurs prennent en compte la mobilité des utilisateurs, sans résoudre le problème de handover.

Un autre travail de recherche sur le handover inter-systèmes dans les réseaux à radio cognitive [73] a abouti à une approche centralisée dans laquelle les terminaux effectuent leurs éventuels handovers et changent de système selon les conditions du canal à proximité. Dans cette approche, les auteurs introduisent un nœud de contrôle central qui permet de diriger le nœud vers le système de communication sans fil ayant l'indicateur de puissance du signal reçu (RSSI : Received Signal Strength Indicator) le plus élevé. Ces indicateurs RSSI sont régulièrement calculés par un nœud moniteur. Cette approche souffre de deux principales limitations : (1) la dépendance des nœuds RC envers le nœud de contrôle et (2) le risque d'effectuer un grand nombre de handovers, ce qui peut provoquer la dégradation des performances du système.

Les auteurs de [155] proposent une nouvelle approche qui utilise la technologie radio cognitive pour améliorer les performances des applications temps réels relative à un terminal mobile à radio cognitive. A travers cette proposition, ils considèrent qu'à travers de la géo

localisation, la radio peut anticiper la différence de couverture et connaître le signal nécessaire à la station de base pour changer les caractéristiques des signaux lorsque l'utilisateur s'approche de la couverture déficiente.

Récemment, le projet européen QoSmos [74], dont l'objectif principal est de fournir une plateforme pour les systèmes à radio cognitive, s'est intéressé au traitement des problèmes de qualité de service et de mobilité dans les systèmes à radio cognitive. Ce projet s'intéresse à l'accès opportuniste du spectre combiné avec la gestion de la qualité de service et de la mobilité. Cependant, ce projet ne traite pas la sécurité qui est fortement liée à la qualité de service. En effet, les utilisateurs mobiles sont souvent reliés à des services utilisant la technologie d'accès sans fil, ce qui rend la livraison de service vulnérable aux attaques de sécurité. Pour cela, il est nécessaire de garantir la sécurité pour les communications des utilisateurs mobile, en même temps que la conservation de la qualité de service [152].

Par ailleurs, Lee et al. proposent, dans [75], une nouvelle architecture réseau qui permet d'assurer la gestion de la mobilité des utilisateurs, la gestion de handover spectral et l'allocation de ressources intercellulaires. Dans l'algorithme de gestion de mobilité de l'utilisateur proposé, le mobile sélectionne un mécanisme de handover approprié de manière à minimiser le temps de latence du à la commutation au niveau de la frontière cellulaire tout en tenant compte de la disponibilité des fréquences hétérogènes. Cependant cette proposition est destinée aux réseaux cellulaires seulement.

La gestion de la mobilité dans les réseaux à radio cognitive présente encore un axe de recherche ouvert faisant appel à des contributions plus réalistes et moins dédiées pouvant être aisément appliquées aux réseaux actuels et futurs.

1.5 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons introduit le contexte général de cette thèse en présentant d'abord des généralités sur la radio cognitive puis les solutions de gestion dynamique du spectre récemment proposées. Nous avons ensuite présenté un état de l'art sur la gestion de la mobilité et l'avancement des travaux portant sur cette problématique dans les réseaux à radio cognitive.

Corréler la gestion dynamique du spectre avec la gestion de la mobilité des terminaux constitue une problématique majeure dans les réseaux à radio cognitive. Pour remédier à ce problème, nous nous sommes basés sur les systèmes multi-agents pour obtenir une solution de gestion d'allocation et de handover spectral dans les réseaux mobiles à radio cognitive.

Afin que le lecteur comprenne davantage nos choix, nous consacrons le chapitre suivant à la présentation des systèmes multi-agents, leurs caractéristiques ainsi que quelques exemples d'utilisation dans le contexte de la radio cognitive.

CHAPITRE 2

2 Utilisation des SMA dans le contexte de la radio cognitive

Sommaire

2.1	Introduction	22
2.2	Introduction aux systèmes multi-agents	22
2.2.1	Caractéristiques des systèmes multi-agents	23
2.2.2	Interaction entre agents dans les systèmes multi-agents.....	23
2.2.3	Mécanismes de négociation	27
2.2.4	Différents types d'enchères	29
2.3	Utilisation des SMA pour la gestion du spectre dans les réseaux à radio cognitive .	30
2.3.1	Les approches basées sur la négociation	32
2.3.2	Les approches basées sur les enchères	33
2.3.3	Les approches basées sur l'apprentissage	34
2.3.4	Les approches basées sur la coopération	36
2.4	Conclusion	37

2.1 Introduction

L'approche multi-agents présente une solution qui convient parfaitement aux spécifications des systèmes à radio cognitive, ainsi on assiste à un nombre de plus en plus important des travaux de recherche adoptant les systèmes multi-agents (SMA) pour la gestion du spectre dans ce type de réseaux. Les SMA permettent aux agents intégrés au sein des terminaux de gérer leurs propres buts de façon dynamique et décentralisée. De plus, ils peuvent percevoir leur environnement et communiquer les uns avec les autres, ce qui est primordial pour un terminal à radio cognitive. En outre, les SMA créent un système intelligent et plus efficace. L'idée principale de l'utilisation des SMA dans le contexte des CRNs est de gérer de manière équitable et décentralisée des ressources radio partagées entre les utilisateurs, afin d'améliorer l'exploitation générale des ressources spectrales.

Avant de présenter notre solution, nous consacrons ce chapitre à la présentation des caractéristiques des systèmes multi-agents et d'un état de l'art sur les travaux existants dans la littérature utilisant les techniques multi-agents pour la résolution des problématiques liées à la radio cognitive.

2.2 Introduction aux systèmes multi-agents

Les systèmes multi-agents représentent un des axes de l'intelligence artificielle distribuée (IAD). L'IAD consiste à passer du comportement individuel aux comportements collectifs des acteurs pour combler les limites de l'Intelligence Artificielle (IA) classique à résoudre des problèmes complexes. Ce passage de l'IA à l'IAD nécessite la distribution de l'intelligence sur plusieurs entités. Cette distribution inclut la distribution du contrôle et des connaissances.

L'IAD recouvre trois axes de recherche fondamentaux qui sont : la résolution distribuée des problèmes (RDP), l'intelligence artificielle parallèle (IAP) et les systèmes multi-agents (SMA) [77]. La RDP vise à diviser un problème particulier sur un ensemble d'entités distribuées coopérant ensemble. La RDP aide à partager la connaissance du problème à résoudre et en obtenir la solution. L'IAP concerne davantage le développement de langages et d'algorithmes parallèles pour l'IAD. Quant aux SMA, ils consistent à faire coopérer un ensemble d'agents intelligents et de coordonner leurs buts et leurs plans d'actions pour atteindre un objectif commun ou résoudre un problème particulier dépassant les capacités individuelles des agents.

Le domaine des SMA [78] est relativement récent dont les premiers travaux remontent aux années 1980 mais qui n'a commencé à réellement se développer que vers la moitié des années 1990. Les SMA permettent de représenter le comportement d'une communauté d'agents intelligents vivant en société et évoluant dans un environnement commun.

Définissons d'abord un agent ; Selon Ferber [79], un agent est *“une entité physique ou virtuelle capable d'agir dans un environnement, qui peut communiquer directement avec les autres agents, possède des ressources propres, est capable de percevoir son environnement, ayant une représentation partielle de son environnement et un comportement qui satisfait ses objectifs”*. L'agent défini par Demazeau [80] représente *“une entité intelligente, agissant rationnellement et intentionnellement, en fonction de ses buts propres et de l'état actuel de sa connaissance”*. Quant à Wooldridge et Jennings [82], ils considèrent l'agent comme étant

“a computer system that is situated in some environment and that is capable of autonomous action in this environment in order to meet its design objective”

De ces trois définitions, on peut pointer trois principales caractéristiques : (1) un agent a des connaissances, (2) il est autonome et (3) il peut agir sur son environnement.

Un système multi-agents [84] est donc un ensemble d'agents qui interagissent pour atteindre un but dépassant leurs capacités individuelles. Ainsi, les agents peuvent communiquer, coopérer, former des coalitions, planifier et coordonner leurs actions. Ils peuvent également négocier et apprendre de nouveaux comportements et actions de manière tout à fait autonome. Le choix des actions à entreprendre dépend des intérêts de l'agent.

2.2.1 Caractéristiques des systèmes multi-agents

Il existe plusieurs caractéristiques propres aux SMA, qui les distinguent des autres systèmes informatiques. Nous en fournissons une liste issue de la littérature, proposée dans [84]. Un SMA possède, en effet, les caractéristiques principales suivantes :

- **Distribution** : le système est modulaire, l'élément de base étant l'agent.
- **Autonomie** : un agent est en activité permanente et prend ses propres décisions en fonction de ses objectifs et de ses connaissances.
- **Décentralisation** : les agents sont indépendants, il n'y a pas de décisions centrales valables pour tout le système.
- **Echange de connaissances** : les agents sont capables de communiquer entre eux, selon des langages plus ou moins élaborés.
- **Interaction** : les agents ont une influence locale sur le comportement des autres agents, généralement sur un pied d'égalité (pas d'ordres, seulement des requêtes).
- **Organisation** : les interactions créent des relations entre les agents et le réseau de ces relations forme une organisation qui peut évoluer au cours du temps.
- **Intelligibilité** : les SMA proposent une manière naturelle de modéliser d'autres systèmes ou de mettre en œuvre des applications, ce qui les rend simples à appréhender pour un utilisateur extérieur.

2.2.2 Interaction entre agents dans les systèmes multi-agents

L'interaction est un des aspects clés des systèmes multi-agents reflétant la sociabilité des agents et offrant un moyen pour assurer la coopération et la négociation entre agents. Sans interaction ou communication, l'agent n'est qu'un individu isolé, sourd et muet, renfermé sur sa boucle perception-délibération-action [79]. Bien que l'interaction et la communication soient souvent confondues dans la littérature, la communication représente la transmission d'informations entre agents, alors que l'interaction comprend l'action sur le monde ainsi que la communication entre les agents du système [81]. Il existe deux modes de communication dans la littérature : (1) *la communication indirecte* qui se fait par transmission de signaux ou d'indicateurs via l'environnement comme par exemple le dépôt de phéromones, et (2) *la communication directe* qui correspond aux échanges de messages entre les agents.

D'après la définition de la FIPA¹, un *protocole d'interaction* est un modèle commun de communication. Ainsi, la spécification et l'implémentation du protocole doivent être indépendantes du domaine d'application et de l'architecture interne de l'agent. Dans le paragraphe suivant, nous allons présenter une classification des différents types d'interactions.

Nous proposons de classer les interactions entre agents en trois principales catégories qui sont: *la coordination*, *la compétition* et *la coopération* sachant que nous nous sommes inspirées des classifications proposées dans [78] et [85]. La figure 2.1 présente notre classification ainsi que le type de communication et les techniques multi-agents relatifs à chaque classe d'interaction.

- La première classe d'interaction est la *coordination* entre les agents qui sont non antagonistes, partagent un même environnement et s'organisent pour atteindre un but collectif commun. Dans ce type d'interaction, un agent coordinateur est défini pour harmoniser les actions des agents. La coordination est généralement utilisée dans la résolution distribuée de problèmes et nécessite de nombreuses communications.
- Le deuxième type d'interaction est la *compétition* ou *l'antagonisme*, où les agents sont en conflit ou ayant des buts différents. Ils sont généralement compétitifs. Trois types de conflits peuvent se poser: conflit d'accès à des ressources, solutions différentes à un même problème, ou bien conflit d'intérêt et de buts.
- Le troisième type d'interaction est la *coopération* où les agents sont *collaboratifs* ayant un but unique commun ou des buts complémentaires.

La coordination est considérée, selon certains chercheurs, comme faisant partie de la même catégorie que la coopération. Pour cette raison, dans certaines classifications des techniques coopératives comme *la formation de coalitions* sont considérées comme techniques de coordination et vice versa. Dans ce qui suit, nous détaillons chacune de ces classes ainsi que les différentes techniques et approches proposées dans la littérature pour assurer chacune de ces interactions.

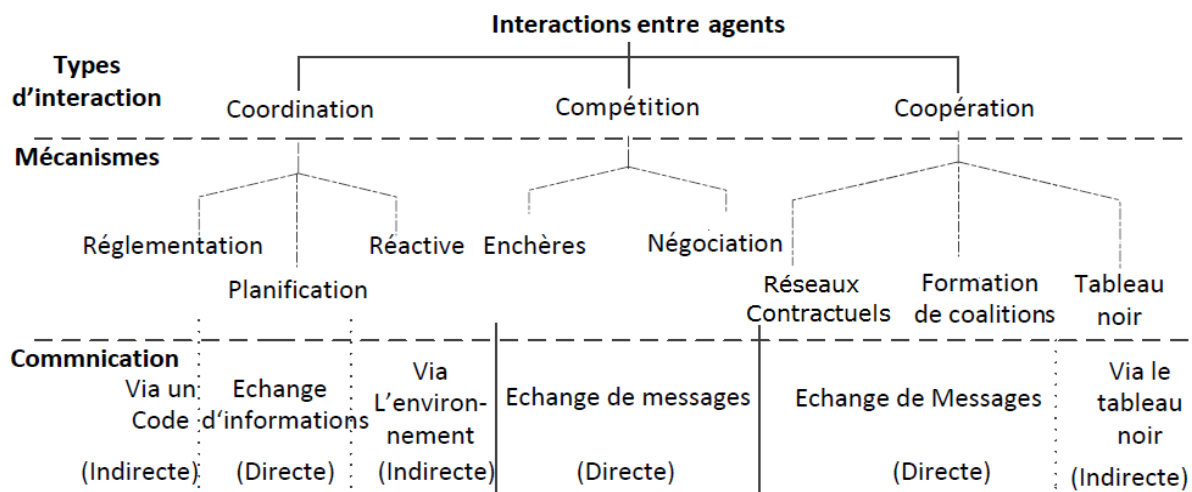


Figure 2.1 Classification des types d'interactions dans un SMA

¹FIPA : Foundation of Intelligent Physical Agent : www.fipa.org

La coordination

La coordination est un mécanisme permettant aux agents de préserver certaines relations comme le séquençement et la complémentarité. La coordination s'utilise entre agents coopérants dans le but d'éviter un comportement chaotique et de maintenir la cohérence de l'ensemble. Les mécanismes de coordination les plus populaires sont la réglementation, la planification et la coordination réactive.

La coordination par planification définit un ensemble de buts et de plans. Il s'agit donc d'une coordination par synchronisation d'actions, en spécifiant des actions et gérant leur parallélisme potentiel. Les agents élaborent un plan multi-agents qui représente les actions et les interactions futures. Un contrôle d'exécution est nécessaire pour éviter les situations de blocage. La coordination par planification peut être obtenue de manière centralisée, grâce à un agent planificateur qui distribue les plans aux autres agents exécuteurs. Elle peut aussi être distribuée où plusieurs planificateurs et exécuteurs s'échangent leurs plans partiels jusqu'à la satisfaction de leurs buts.

Parmi les approches de coordination par planification proposées dans la littérature, nous pouvons citer l'approche de Malone [86] et l'approche de Martial [87].

L'approche de Malone [86] consiste à identifier les buts puis à planifier et distribuer les tâches. Après une sélection des buts, il y aura une planification des plans de chaque but et une affectation des buts aux agents. La gestion des interdépendances (allocation de ressources, ordonnancement et synchronisation) est également nécessaire.

Martial [87] a distingué deux classes de problèmes en planification distribuée: (1) la planification dirigée par les tâches avec décomposition des tâches et répartition sur plusieurs agents et (2) la coordination de plans qui s'applique dans le cas de conflits entre les plans d'agents avant de les exécuter dans un environnement commun.

La coordination par réglementation se fait à travers un ensemble de règles bien définies comme par exemple l'usage de codes, de lois ou de conventions sociales. Parmi les approches proposées dans la littérature pour la coordination par réglementation, on trouve *l'approche de Jennings* [83] dans laquelle la coordination se fait par des engagements ou des conventions. Les engagements sont des promesses de réalisation de certaines actions. Un agent peut planifier les actions qu'il peut faire et les coordonner avec celles des autres. Les conventions, quant à elles, sont des lois sociales partagées par tous les agents qui permettent de faire le suivi des engagements dans des circonstances changeantes, en définissant les conditions pour lesquelles ils doivent être réévalués, et spécifier alors les actions à exécuter.

La coordination réactive est une coordination adaptée aux agents réactifs dont le fonctionnement est de type stimulus réponse. Ceci peut être obtenu à travers *une architecture de subsomption* ou bien via un marquage de l'environnement comme par exemple les phéromones déposées par des fourmis qui représentent un indicateur aux autres fourmis. *L'architecture de subsomption* de Rodney Brooks [88] a été proposée en 1983 pour construire une nouvelle génération de robots non cognitifs fondés sur des couches organisées en une hiérarchie de modules à comportement basique. La coordination dans ce cas est émergente et assez basique mais donne un comportement global assez optimal.

La coopération

Les agents coopératifs travaillent ensemble pour maximiser leurs gains et aboutir à un but commun. Généralement, un agent coopère avec d'autres agents lorsqu'il n'est pas capable d'accomplir seul ce but ou lorsque les autres agents sont plus efficaces. Les approches de coopération les plus connues sont le tableau noir [89], le Contract Net Protocol (CNP) [90] et la formation de coalitions [91].

Le tableau noir (Blackboard) est une forme d'interaction indirecte entre agents où chacun dépose et recueille des informations dans une partie de l'environnement prévue à cet effet. Cette partie commune est appelée le tableau noir ou "blackboard" [89]. Le problème à résoudre dans ce type d'approche est donc posé sur le tableau noir centralisé et chaque agent participant contribue avec ses propres connaissances jusqu'à ce qu'une solution suffisante soit trouvée. Ce modèle est composé de trois principales parties :

1. des sources de connaissance (KS) représentées par les agents fournissant leur expertise,
2. un tableau central contenant les informations,
3. une composante de contrôle qui permet de maintenir la cohérence entre les différentes sources de connaissances.

Toutes ces parties travaillent ensemble pour résoudre les problèmes signalés sur le tableau. Cette séparation entre la connaissance (les agents), la solution (le tableau) et la gestion des connaissances (le contrôle) donne au système une très grande modularité et un accès facile aux connaissances. Par ailleurs, la technique de Blackboard fournit un mécanisme de contrôle, qui essaie, à chaque étape, de résoudre le problème et choisir la meilleure source de connaissances. Cependant, bien que le contrôle fournit un gain d'efficacité, il alourdit le traitement et aboutit à un manque de souplesse et de flexibilité. En outre, le blackboard est une approche centralisée fortement dépendante du tableau central qui est sensible aux pannes.

Le Contract Network Protocol (CNP) [90], proposé en 1981 par Smith, fut l'une des premières solutions au problème d'allocation de tâches. Ce protocole facilite le contrôle distribué de l'exécution des tâches coopératives avec une communication efficace entre les nœuds. Cette technique s'appuie sur un ensemble d'agents logiciels qui forment un réseau appelé réseau contractuel ou '*contract network*'. Chaque nœud de ce réseau peut être un '*manager*' ou un '*contractant*' pour différentes tâches. Le manager est responsable de la surveillance de l'exécution d'une tâche et du traitement des résultats de cette exécution. Un contractant fait une proposition au manager pour réaliser la tâche. En cas d'acceptation, il est responsable de l'exécution effective de cette tâche.

Ce modèle d'appel d'offres a comme principe la coopération par contrat comme suit :

- Un agent "manager" décompose un problème en sous-problèmes, puis annonce chaque sous-problème à un ensemble d'agents "contractants potentiels",
- Les agents contractants évaluent l'annonce avec la possibilité d'échanger des informations avec l'agent "manager" lors de l'accomplissement de cette évaluation. Les agents contractants ayant les ressources et les capacités nécessaires font des offres,

- L'agent "manager" évalue les soumissions et accorde le contrat à l'agent contractant qui a fait la meilleure offre.

Le protocole CNP est donc une approche basée sur les appels d'offres utilisés dans les marchés publics où un agent peut être un décideur ou un exécutant. Ce protocole offre l'avantage d'avoir des informations et des échanges en temps réel. Il pourra ainsi être adapté aux situations où les ressources et le contrôle sont distribués. Il est aussi rapide, flexible et est également utilisé pour la décomposition des tâches. Toutefois, lorsque la tâche est complexe et ne peut être décomposée en sous-tâches, le protocole CNP ne peut pas être utilisé.

La formation de coalitions peut être intéressante dans le cas où de nombreuses tâches doivent être accomplies par plus qu'un agent car leur réalisation nécessite des ressources et des capacités qui sont au-delà de celles d'un agent seul. Dans une telle situation, les agents peuvent former des groupes pour résoudre le problème par coopération. Ces agents coopératifs travaillent ensemble sur une tâche donnée. Initialement, les agents sont indépendants et ne coopèrent pas. Ensuite, quand ils ne peuvent plus accomplir leurs tâches individuellement, les agents échangent des informations et essaient de former des coalitions, ce qui permet de leur donner une meilleure efficacité [91].

Généralement, à travers la formation de coalitions, les agents essaient de maximiser l'utilité de l'ensemble du système, et suite à la réalisation de la tâche assignée, les gains seront répartis de manière équitable ou en fonction de la contribution de chaque agent. En outre, la formation de coalitions rend possible la résolution de problèmes complexes sans décomposition des tâches. Cependant, ce protocole est relativement lent à cause des surcharges résultant de la construction des coalitions.

La compétition

Ce type d'interaction se fait entre agents antagonistes visant chacun son intérêt personnel. Comme exemples de techniques compétitives nous pouvons citer la négociation et les enchères. Dans cette sous-section, nous présentons brièvement ces deux techniques et nous consacrons les deux sections suivantes à la description détaillée de leurs mécanismes et caractéristiques étant donné qu'ils présenteront un support pour nos propositions.

La négociation est un processus par lequel une décision conjointe est faite par deux ou plusieurs parties qui commencent d'abord par présenter leurs exigences contradictoires et passent ensuite aux accords. Les mécanismes de négociation sont présentés dans la section suivante.

Les enchères représentent un type de vente d'un bien à partir d'un prix sur lequel il est possible d'enchérir. Généralement, celui qui propose l'offre la plus élevée remporte la vente. Il a plusieurs types d'enchère comme l'enchère anglaise, hollandaise, de Vickrey, etc. que nous détaillerons dans la section 3.4.

2.2.3 Mécanismes de négociation

La négociation est un processus qui permet aux agents de parvenir à un accord sur la prestation d'un service. Les agents se partagent des ressources limitées et font valoir leurs

différents points de vue afin de satisfaire au mieux leurs intérêts respectifs. La négociation peut être aussi utilisée pour la résolution des conflits entre les agents. Elle englobe quatre composantes principales : (1) un objet de négociation, (2) un protocole, (3) des stratégies privées à chacun des agents, et (4) une règle qui précise quand l'accord est atteint ou à défaut quand le temps alloué est expiré. On peut distinguer trois types de négociation :

- *Négociation un-à-un* où un agent négocie avec un autre agent à propos d'un sujet donné comme par exemple, négocier le prix d'achat d'un produit avec le fournisseur;
- *Négociation un-à-plusieurs* où un seul agent négocie avec plusieurs autres agents, ce qui revient à une enchère si un agent veut vendre un objet;
- *Négociation plusieurs-à-plusieurs* où plusieurs agents négocient avec plusieurs autres agents en même temps;

On trouve également la négociation un peu plus avancée utilisant l'argumentation [92] et les heuristiques [93] que nous détaillerons dans les paragraphes suivants.

Négociation par des heuristiques

Ce type d'approche est basé sur la prise de décision heuristique pendant la négociation. Les heuristiques présentent des approximations des techniques de la théorie des jeux sans médiateur central. Cette méthode vise à améliorer l'efficacité de la négociation du fait que les agents doivent fournir des réactions plus utiles aux propositions qu'ils reçoivent et ne se contentent pas d'une simple acceptation ou rejet. Ces réactions peuvent prendre la forme d'une *critique* ou d'une *contre-proposition*.

Une critique est un commentaire sur la partie de la proposition que l'agent accepte ou refuse. Une contre-proposition est une suggestion alternative engendrée en réponse à une proposition (appelée aussi proposition modifiée). Les contre-propositions diffèrent des critiques parce qu'elles sont plus détaillées. À partir de telles réactions, l'agent doit être capable d'engendrer une proposition qui soit probablement plus apte à mener à un accord. La figure 2.2 [93] montre un exemple de négociation avec heuristique entre deux agents qui dialoguent entre eux en modifiant, chacun à son tour, les propositions dans le sens qui lui convient le mieux jusqu'à aboutir, à la fin, à une acceptation mutuelle ou un refus. Dans le cas de refus, l'agent peut modifier sa proposition pour qu'elle devienne mutuellement acceptable. La difficulté dans ce type de négociation réside dans le choix de l'heuristique la plus efficace.

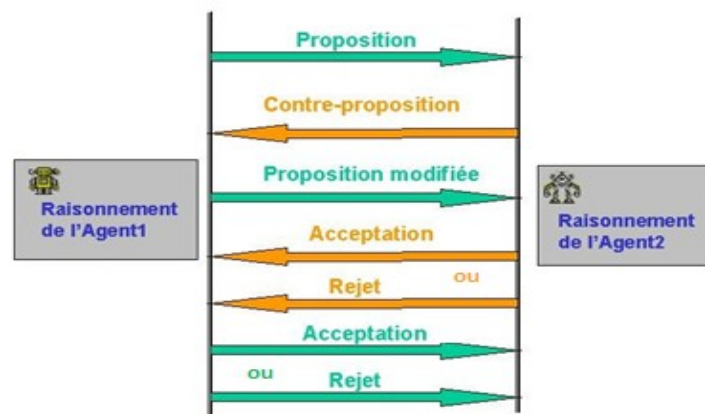


Figure 2.2 Négociation via heuristique [93]

L'argumentation

Les arguments sont utilisés pour convaincre un agent d'accepter la proposition faite. La différence par rapport à la négociation heuristique est que les propositions, les critiques et les contre-propositions sont justifiées par une information supplémentaire sous forme d'arguments. Ainsi, un agent peut essayer de persuader un autre agent de répondre favorablement à sa proposition en donnant des arguments qui créent de nouvelles occasions d'atteinte d'accords ou modifient les critères d'évaluation [92]. D'une façon générale, l'argumentation est un mécanisme très complexe à établir et mettre en place. Par ailleurs, ce mécanisme nécessite une connaissance de l'historique et des arguments des agents.

2.2.4 Différents types d'enchères

L'enchère [94] est un processus de vente entre un agent jouant le rôle de commissaire-priseur et une collection d'agents enchérisseurs afin de vendre un produit au plus offrant. Le but d'une enchère est de maximiser le profit du vendeur et de minimiser les coûts d'un acheteur. Une enchère est définie généralement par quatre paramètres :

- *Les biens* qui peuvent avoir une valeur privée, publique ou corrélée. Dans une enchère avec valeur privée, la valeur de l'objet dépend seulement des préférences privées de l'agent. Dans une enchère avec valeur commune ou publique, la valeur de l'objet dépend complètement de l'évaluation des autres, alors que dans une enchère avec valeur corrélée, la valeur de l'objet dépend des évaluations internes et externes.
- *La détermination du gagnant* qui précise si le prix de vente correspond au premier ou au deuxième prix le plus élevé proposé par les enchérisseurs.
- *Les offres* qui peuvent être cachées 'sealed bid' ou publiques 'Open Cry'.
- *L'enchérissement* qui peut-être en un seul coup, comme il peut être ascendant ou descendant.

Les ventes aux enchères les plus connues dans la littérature sont : l'enchère anglaise, l'enchère au 1^{er} prix, l'enchère de Vickrey et l'enchère hollandaise [149].

L'enchère anglaise est la plus connue des enchères, dans laquelle la détermination du gagnant est au 1^{er} prix, les offres sont publiques et l'enchérissement est ascendant. Chaque participant annonce publiquement son offre et le participant avec la plus grande soumission gagne l'objet au prix de son offre.

L'enchère hollandaise est une enchère descendante avec des offres publiques. Elle débute par un prix haut choisi par l'initiateur qui descend graduellement le prix jusqu'à ce que l'un des enchérisseurs crie 'le mien'.

L'enchère 1^{er} prix ou FPSB (First Price Seaded Bid) est une enchère en un seul tour et au 1^{er} prix. Les enchérisseurs soumettent une offre secrète du type 'enveloppe cachée'. Le bien est attribué à l'agent qui fait l'offre la plus élevée au prix qu'il a proposé.

L'enchère Vickrey est une enchère à mise secrète de type deuxième prix. Le bien est alloué à l'agent qui fait l'offre la plus élevée, mais le gagnant paye le deuxième prix élevé.

L'enchère double est une forme d'enchère hybride où les participants sont des acheteurs et des vendeurs qui négocient un même produit. L'enchère peut démarrer par l'envoi d'une offre ou d'une proposition. Les vendeurs envoient des offres qui démarrent avec le plus haut prix puis elles décroissent. Les acheteurs font des propositions et les prix évoluent dans le sens inverse des offres. Les offres et les propositions sont publiques et la négociation s'achève si un acheteur accepte une offre proposée par un vendeur ou si un vendeur accepte une proposition d'un acheteur.

Nous présentons dans le tableau 2.1 un récapitulatif entre ces différentes enchères.

Tableau 2.1. Récapitulatif des enchères

Type	Offre	Détermination du gagnant	Enchérissement
Anglaise	Publique	1 ^{er} prix	Ascendant
Hollandaise	Publique	Prix de l'offre retenue	Descendant
FPSB	Cachée	1 ^{er} prix	Un seul tour
Vickrey	Cachée	2 ^{ème} prix	Un seul tour
Double	Publique	Acceptation mutuelle	Offres ascendantes Propositions descendantes

Il est important de noter qu'on peut trouver, dans la littérature, plusieurs algorithmes qui proposent des variantes de ces enchères de base.

D'une manière générale, dans tous les types d'enchères traditionnelles, le commissaire-priseur souhaite maximiser le prix auquel le bien est affecté, tandis que les enchérisseurs désirent minimiser le prix. Les enchères peuvent être une solution efficace pour résoudre les conflits entre les agents, néanmoins, son problème majeur reste la fraude.

Dans la suite du chapitre, nous présentons un état de l'art exhaustif sur les travaux utilisant les systèmes multi-agents pour la résolution de la gestion dynamique du spectre dans les réseaux à radio cognitive. Nous nous intéressons un peu plus aux travaux basées sur la négociation et les enchères.

2.3 Utilisation des SMA pour la gestion du spectre dans les réseaux à radio cognitive

Les systèmes multi-agents présentent un des concepts les plus utilisés dans le domaine des télécommunications [95], permettant ainsi de passer de logiciels fournissant des fonctionnalités à des logiciels offrant des services 'intelligents' grâce à l'IA et aux techniques de communication sophistiquées. D'une part, les SMA contribuent au développement d'une

ingénierie des connaissances permettant de ramener le traitement de l'information à un raisonnement sur des connaissances. D'autre part, ils contribuent au développement des techniques de génie logiciel adaptées à la fourniture de services. L'application des SMA dans les réseaux de télécommunications porte essentiellement sur le commerce électronique, le contrôle de services et l'exploitation du réseau. A partir de l'année 2003, les SMA s'utilisent également dans les réseaux mobiles de 3^{ème} génération [96].

Récemment, les systèmes multi-agents ont été largement utilisés dans le cadre de l'accès dynamique au spectre et la radio cognitive [97, 102, 103, 128]. Cet intérêt envers les approches agents dans une telle problématique s'explique par le besoin d'intelligence, de traitement distribué et de moyens d'interaction. En plus, les protocoles de négociation et de coopération issus du domaine des SMA peuvent assurer plus de communication et de coordination entre les entités d'un réseau ce qui permettra de mieux profiter des parties inutilisées du spectre. La forte similitude entre un agent et un nœud à radio cognitive est aussi un facteur important qui peut expliquer le recours à cet outil dans les recherches abordant des problématiques liées à la radio cognitive. Cette comparaison, donnée dans le tableau 2.2, montre bien que les SMA sont très adaptés pour résoudre les défis de la RC.

Tableau 2.2. Similitude entre un agent et un nœud à radio cognitive

Terminal Radio Cognitive	Agent
- Un terminal RC interagit avec son environnement radio afin de s'y adapter, d'y détecter les fréquences libres et de les exploiter.	- Un agent est une entité qui peut agir, percevoir son environnement et est capable de communiquer directement avec les autres.
- Autonome	- Autonome
- Le terminal RC aura suffisamment de capacités et d'informations lui permettant de gérer efficacement les ressources radio dont il a besoin.	- Un agent a des compétences qui lui permettent d'atteindre, généralement, ses buts.

Pendant la dernière décennie, une large panoplie de techniques d'accès au spectre a été proposée pour gérer le spectre radio de façon dynamique et opportuniste en utilisant les SMA [155]. Ces contributions ont eu recours à des mécanismes compétitifs comme les enchères et la négociation ou à des mécanismes coopératifs comme les réseaux contractuels. Nous proposons de classer les travaux utilisant les SMA pour la résolution des problèmes liés à la RC en quatre principales catégories: les approches de négociation, les approches basées sur les enchères, les approches basées sur l'apprentissage et les approches coopératives, comme illustré sur la figure 2.3. Nous détaillons, dans ce qui suit, ces différentes approches.

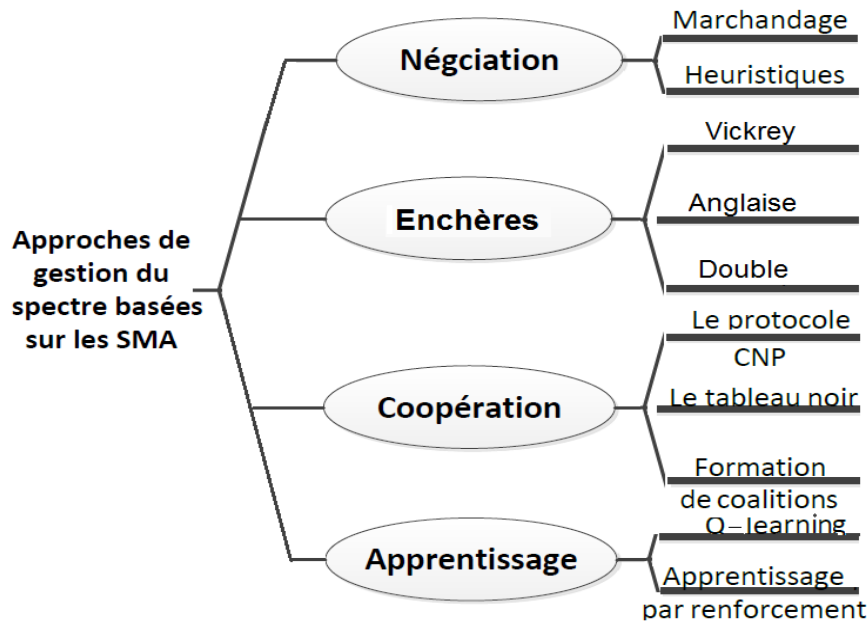


Figure 2.3 Approches multi-agents pour la gestion du spectre

2.3.1 Les approches basées sur la négociation

Les approches basées sur la négociation sont largement utilisées pour aborder la problématique d'accès dans le réseau à RC. Les agents embarqués sur les PUs et les SUs négocient afin de parvenir à un accord qui réponde le mieux à leurs besoins. Ces solutions peuvent être classées en deux catégories selon le protocole de négociation adopté: le marchandage et les heuristiques.

Le marchandage ou "bargaining" est un type de négociation basé sur le concept de vente et d'achat qui est utilisé aussi bien pour la détection [104] que pour le partage du spectre [105]. Dans [104], les SUs sont regroupés en paires selon leurs positions par rapport au PU, pour la détection coopérative au lieu d'une détection individuelle. Dans chaque paire, les utilisateurs à radio cognitive peuvent négocier sur la répartition de la détection dans le temps. Ainsi, les utilisateurs économisent le temps de détection pour la transmission de données. Cette approche permet de produire des informations avec plus de précision au niveau de l'algorithme de détection et de minimiser le délai de détection. Cependant, la distance entre les SUs et le PU est le seul facteur pour la construction de ces groupes alors qu'il y a d'autres facteurs qui peuvent intervenir dans cette décision comme l'interférence.

Une autre approche basée sur un modèle de négociation est proposée dans [106] dans laquelle l'agent est utilisé comme étant un troisième élément dans le processus de négociation qui est différent des utilisateurs primaires et secondaires. Les auteurs montrent que la stratégie d'agent la plus rentable est obtenue lorsque la demande de spectre est incertaine. Les auteurs analysent seulement la situation de distribution uniforme. Cependant, pour les autres distributions, des analyses plus avancées sont requises.

Les heuristiques interviennent dans la résolution des problèmes complexes liés à l'allocation et au partage du spectre. Par exemple, dans [107], le problème de répartition des

canaux entre les nœuds à radio cognitive est traité en utilisant des techniques de la théorie des graphes pour trouver une répartition optimale et valide lorsque le nombre de canaux est limité. Comme le problème est *NP* complet, les auteurs ont proposé une nouvelle heuristique distribuée qui s'appuie sur un canal de contrôle commun et local et ont prouvé que cette heuristique présente de meilleures performances par rapport à celles qui existent dans la littérature. Généralement, les techniques à base d'heuristiques sont rarement utilisées dans les réseaux à radio cognitive parce qu'elles sont assez complexes à définir.

2.3.2 Les approches basées sur les enchères

La vente aux enchères est un mécanisme largement utilisé dans le but d'optimiser le partage du spectre [108, 110]. Dans ce type d'approches, les utilisateurs à radio cognitive proposent leurs offres à un commissaire-priseur. Ce dernier s'occupe de l'allocation du spectre selon les offres reçues (prix, temps d'attente, quantité de spectre demandée, etc.) et le type d'enchère utilisée (Vikrey, anglaise, etc.).

Par exemple, dans [113], le PU joue le rôle de commissaire-priseur et les SUs représentent les enchérisseurs. Chaque SU présente son offre en précisant la quantité de spectre souhaitée et le PU alloue le spectre en priorité au SU qui ne dégrade pas sa qualité de service. Dans [116], chaque SU déclare le temps qu'il peut attendre pour accéder au spectre demandé au lieu de soumettre une offre en termes de prix. Ainsi, le SU proposant le temps d'attente le plus élevé emporte l'enchère.

Dans [126], les auteurs proposent une politique de gestion du spectre basée sur l'enchère de Vickrey où les nœuds mobiles à radio cognitive sont en concurrence pour l'utilisation des bandes de spectre disponibles. Les SUs (enchérisseurs) soumettent des offres sans connaître celles des autres, et celui qui propose l'offre la plus intéressante (la plus élevée) gagne l'enchère et paie le deuxième prix. Par ailleurs, l'avantage de la proposition de [127], qui utilise l'enchère anglaise, est le fait de permettre aux utilisateurs d'exprimer leur degré d'urgence, leurs besoins, leurs préférences et leur pouvoir d'achat, sauf que l'enchère de Vikrey semble être plus appropriée car elle s'exécute en un temps plus court. Dans [153], il a été montré que le temps d'exécution moyen des enchères à plusieurs tours (Anglaise) est très grand par rapport à celles qui se font à un seul tour (Vikrey).

Plusieurs approches utilisant l'enchère double sont proposées pour résoudre le problème d'accès au spectre entre les PUs et les SUs. Dans [114], par exemple, les acheteurs (SUs) présentent leurs offres et les vendeurs potentiels (PUs) soumettent, en même temps, leurs prix. A la différence des approches traditionnelles de partage du spectre, dans [114] les SUs sont autorisés à prendre des décisions simultanément et peuvent formuler leurs offres en se basant sur leurs propres intérêts. Dans [120], les SUs sont en compétition entre eux et avec les PUs également. Le gain du PU est proportionnel à la quantité de bande partagée avec les SUs.

D'autres enchères doubles sont proposées dans [118, 121, 122, 123] où le but dans [122] est d'exploiter la réutilisation spatiale pour améliorer l'utilisation du spectre alors que l'objectif dans [123] est d'alléger dynamiquement la charge du trafic des utilisateurs mobiles. Les auteurs de [123], proposent un mécanisme d'enchère double où les opérateurs mobiles essaient d'alléger au maximum le trafic et les points d'accès essaient de minimiser leurs coûts de déchargement.

Bien que nous assistions à un grand nombre d'études de gestion du spectre utilisant les enchères, il existe encore quelques limites et défis. En effet, la plupart des recherches existantes ont eu recours à des approches analytiques et des solutions de la théorie des jeux. Cependant, nous avons besoin d'implémentations réalistes qui peuvent être facilement déployées dans les réseaux actuels et futurs et qui contribuent à la mise en place de la technologie radio cognitive.

Par exemple, l'objectif de [113], où le PU attribue la bande au SU qui n'endommage pas sa QoS, et de [116], où l'enchérissement se fait sur la base du temps d'attente accepté, est d'atteindre l'équilibre de Nash (NE). De même, les auteurs de [109] et [111] formulent le problème de partage entre un PU et plusieurs SUs comme étant un jeu dynamique où les SUs n'ont pas d'informations sur les stratégies adoptées par les autres et où l'équilibre de Nash est la solution pour le jeu. Dans [115], les auteurs assimilent le problème à un jeu d'enchères non coopératif et étudient la structure de l'équilibre de Nash obtenu en résolvant un problème d'optimisation non continu à deux dimensions. Le SU met à jour sa stratégie en se basant sur des informations locales afin de converger vers l'équilibre de Nash. Cette étude peut théoriquement servir comme politique de contrôle pour les SUs afin d'exploiter les ressources du spectre sous-utilisées.

En outre, de nombreuses études basées sur les enchères se sont intéressées à la gestion du spectre au niveau de la couche MAC et ont proposé une tarification par slot de temps. Par exemple, les auteurs de [117] proposent un protocole MAC pour les réseaux à RC basé sur l'utilisation d'enchères combinatoires alors que [118] et [126] présentent des solutions au niveau de la couche physique en se basant sur des analyses analytiques et théoriques. Dans [124], les auteurs étudient la mise en mémoire tampon ('buffering') et l'occupation des canaux, mais ils n'ont pas étudié la tarification des bandes. Dans [119], un mécanisme de tarification et de facturation, basé sur les enchères, est proposé comme solution au problème d'allocation du spectre sur un système CDMA (Code Division Multiple Access).

L'algorithme basé sur les enchères proposé dans [125] considère les deux paramètres fréquence et temps durant le processus d'allocation des bandes de télévision 'TV White Space' (TVWS). Cet algorithme ne peut être appliqué que dans une architecture CRN centralisée, où l'exploitation des TVWS disponibles et l'administration des transactions économiques est géré par un 'broker'. Dans [112], les auteurs utilisent également un régulateur qui permet d'allouer les droits de License sur les canaux.

2.3.3 Les approches basées sur l'apprentissage

Les techniques d'apprentissage ont été récemment utilisées pour résoudre différents problèmes liés à la gestion du spectre dans les réseaux à radio cognitive. Comme exemples, nous pouvons citer [129-131] pour la détection du spectre, [132, 133] pour le partage du spectre et [134] pour le contrôle et l'accès au spectre. Nous pouvons distinguer deux types d'algorithmes d'apprentissage généralement utilisés dans ce contexte: *apprentissage par renforcement* (RL : *Reinforcement Learning*) et le *Q-Learning*.

L'apprentissage par renforcement (RL) permet aux agents d'apprendre à partir de leurs états passés (les actions de leurs voisins par exemple) afin de mieux agir et mieux planifier leurs prochaines décisions. Dans [129], par exemple, chaque SU détecte le spectre dans son entourage, ajuste ses paramètres selon ce qu'il a appris et agit immédiatement dès l'arrivée

d'un PU. Plusieurs pénalités sont infligées aux agents SUs qui essaient d'interférer sur d'autres SUs ou sur des PUs. Cette approche prouve que le fait de permettre aux utilisateurs secondaires l'apprentissage par interaction peut améliorer l'utilisation globale du spectre. Deux types d'approches d'apprentissage par renforcement sont discutés dans [136], à savoir l'apprentissage par renforcement simple SARL (*Single Agent Reinforcement Learning*) et celui par renforcement multi-agents MARL (*Multi-Agent Reinforcement Learning*).

L'apprentissage SARL est appliqué dans un environnement avec un seul agent, comme par exemple la station de base dans un réseau centralisé alors que l'apprentissage MARL est appliqué dans un environnement composé de plusieurs agents, tels que les SUs dans un réseau à radio cognitive dynamique. La différence entre les deux algorithmes d'apprentissage est le message PME (*Payoff Message Exchange*) qui présente une fonctionnalité supplémentaire dans MARL et qui est en fait le moyen de communication pour le moteur d'apprentissage intégré dans chaque agent. L'algorithme SARL n'implémente pas PME puisqu'il s'agit d'une approche à un seul agent.

En général, l'apprentissage par renforcement fournit un réseau de haute performance en termes de sélection dynamique des canaux, cependant, il est généralement difficile à mettre en œuvre. Pour cette raison, une nouvelle forme d'apprentissage par renforcement est apparue sous le nom de '*Q-Learning*' permettant de faciliter le processus d'apprentissage.

Le Q-Learning est de plus en plus utilisé dans la gestion dynamique du spectre car il permet aux agents d'apprendre plus facilement comment réagir efficacement étant donné qu'il n'y a pas besoin d'un modèle de l'environnement. Par exemple, dans [134], chacun des SUs détecte le spectre puis choisit un canal inutilisé pour transmettre des données. Si deux ou plusieurs utilisateurs secondaires choisissent le même canal de transmission de données, une collision se produit. Cet algorithme est similaire au protocole Aloha [137] qui ne tient pas compte des collisions. Toutefois, les SUs peuvent apprendre à éviter les collisions en fonction de leur expérience.

Dans la proposition de [135], chaque SU partage périodiquement les informations qu'il détient sur le trafic avec ses voisins. En se basant sur les informations échangées, chaque SU met à jour ses paramètres de transmission de façon à éviter les interférences. Cependant, cette approche ne permet pas de toujours fournir une information précise lorsque les SUs ont une faible connaissance sur l'état du spectre dans leur voisinage.

Le Q-Learning a été également utilisé pour aboutir à une solution pour le handover spectral [138]. Les auteurs avaient proposé un algorithme d'apprentissage qui permet de décider de l'ordre de détection du canal lorsque l'utilisateur à radio cognitive doit effectuer un handover spectral.

Certaines approches ont eu recours à l'apprentissage (RL ou Q-Learning) dans des propositions coopératives comme [131] et d'autres dans des propositions utilisant les enchères comme [139-141]. Dans [139], par exemple, l'algorithme d'appel d'offres proposé est basé sur le Q-Learning pour permettre aux utilisateurs secondaires d'apprendre à partir de leurs concurrents et ainsi proposer automatiquement de meilleures offres pour l'allocation de bandes de spectre disponibles. Récemment, un algorithme d'enchère double basé sur l'apprentissage par renforcement a été proposé dans [140], visant à améliorer les performances de l'accès dynamique au spectre dans les réseaux à radio cognitive. Les utilisateurs primaires et

secondaires peuvent estimer l'influence de leur accès sur leurs récompenses en se basant sur des informations de l'historique de l'accès au spectre. Ainsi, ils peuvent adapter leurs stratégies afin d'augmenter leurs opportunités d'accès. L'apprentissage par renforcement combiné avec les enchères est aussi adopté dans [141] pour assurer la gestion du spectre dans un contexte multi opérateurs. Les fournisseurs de services sont en concurrence en temps réel par le biais d'une enchère. Afin d'automatiser le processus d'appel d'offres, les auteurs ont mis en place un processus d'apprentissage multi-agents par renforcement.

Les méthodes d'apprentissage montrent une efficacité intéressante dans la résolution des problèmes de la radio cognitive. Elles sont de plus en plus utilisées dans la littérature et constituent toujours un axe intéressant qui vise à fournir plus d'améliorations aux performances des systèmes à radio cognitive. Cependant, ces algorithmes sont toujours confrontés à certaines limitations comme le coût élevé de l'apprentissage et l'incertitude des résultats obtenus.

2.3.4 Les approches basées sur la coopération

Certains travaux de recherches adoptent la coopération multi-agents pour une gestion efficace du spectre. Nous pouvons citer comme exemple les travaux de recherche de [142] où les auteurs utilisent le protocole 'Contract Net Protocol' (CNP) pour la coopération entre les nœuds du réseau. D'autres ont eu recours à la formation de coalitions [143, 144, 145], toujours dans le but d'améliorer l'accès et le partage des ressources spectrales et peu d'entre eux, comme [146], ont utilisé la technique de tableau noir.

Le protocole CNP utilisé dans [143] se base sur le principe des appels d'offres ou CFP (*Call For Proposal*). L'agent PU est considéré comme étant le 'manager' et les SUs sont considérés comme étant les contractants. Chaque SU envoie un CFP aux PUs qui veulent partager leurs bandes de spectre. De leur côté, les PUs répondent chacun par une proposition. Le SU les caractérise à l'aide d'une fonction bien déterminée et une fois le délai de réception des propositions expire, le SU envoie un message d'acceptation au PU qui a donné la meilleure offre et envoie des rejets aux autres. Cette approche coopérative permet aux terminaux à radio cognitive de travailler en collaboration avec les PUs voisins afin d'utiliser efficacement et dynamiquement le spectre disponible.

La formation de coalitions est également utilisée pour le partage des bandes de fréquences libres. Dans [143], la bande est supposée occupée seulement par des utilisateurs secondaires équipés d'agents capables d'interagir avec leurs voisins afin de former plusieurs coalitions dans les bandes sans licence. Ces types de coalitions peuvent fournir un accès au spectre moins conflictuel étant donnée que les agents en collaboration se mettent d'accord sur le partage du spectre.

Dans [145], un nœud à radio cognitive ayant besoin d'accéder au spectre envoie une demande de formation de groupe (coalition) aux nœuds voisins pour l'utilisation d'un ensemble bien défini de canaux. Les nœuds intéressés répondent à la requête et forment ainsi le groupe. Une fois le groupe est formé, les utilisateurs repartagent le spectre entre eux en visant une meilleure utilisation du spectre. Ce groupe est dissocié dès l'apparition d'un utilisateur primaire ou lorsqu'aucun des utilisateurs du groupe ne désire plus accéder à la portion du spectre partagée (ils n'ont plus besoin du spectre).

Une autre proposition pour la gestion du spectre basée sur des agents coopératifs a été proposée dans [144]. Dans cette approche, des agents intelligents sont intégrés aux terminaux à radio cognitive et coordonnent leurs activités pour exploiter les ressources réseau et éviter ainsi les interférences avec les PUs. Les agents essaient de rassembler des informations sur l'état du terminal et de l'environnement radio. Puis, ils agissent en fonction des contraintes d'application de l'utilisateur. Un nœud à radio cognitive souhaitant transmettre des données s'appuie sur les informations de ses voisins pour déterminer l'état d'occupation du spectre.

Pour résumer, la plupart des contributions basées sur les SMA dans le contexte de la radio cognitive utilisent la technique des enchères. Les méthodes d'apprentissage ont été récemment utilisées et elles sont en cours d'évolution. Toutefois, les approches coopératives ne sont pas largement appliquées et représentent un sujet de recherche ouvert dans le domaine de la radio cognitive.

Il découle de ce qui précède que l'utilisation des systèmes multi-agents est prometteuse dans le contexte de la radio cognitive. La majeure partie des travaux existants s'est intéressée aux problématiques liées à la détection et au partage du spectre, alors que la mobilité spectrale ainsi que la mobilité des utilisateurs présentent deux grands défis qu'il faut prendre en compte pour mettre en œuvre la technologie de radio cognitive.

Pour ces raisons, dans ce travail, nous nous basons sur les systèmes multi-agents pour la gestion de la mobilité spectrale et pour assurer le partage dynamique du spectre en tenant compte de la mobilité des utilisateurs.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté le concept de systèmes multi-agents et leurs applications dans les réseaux à radio cognitive. Nous avons classé les recherches basées sur les systèmes multi-agents au sein des réseaux à radio cognitive en quatre catégories: les approches basées sur la négociation, sur les enchères, sur l'apprentissage et les approches coopératives. Pour chaque catégorie, nous avons défini les concepts fondamentaux et avons fourni des exemples de travaux existants dans la littérature.

Dans notre approche, nous proposons d'utiliser les systèmes multi-agents car ils offrent un environnement décentralisé, interactif et intelligent. Nous proposons ainsi deux solutions : (1) la première utilise un mécanisme de négociation spécifique, que nous définissons et (2) la deuxième se base sur les enchères multi-agents et l'apprentissage. Les deux solutions permettent, d'une part, d'avoir un compromis entre les exigences des utilisateurs et les ressources disponibles et d'autre part, de générer un accord entre les PUs et les SUs pour un partage efficace du spectre garantissant une utilité importante pour les utilisateurs. En outre, nos propositions assurent la sélection de la bande de spectre la plus adéquate lors du handover spectral et tiennent compte de la mobilité des utilisateurs.

Dans le chapitre suivant, nous détaillons notre problématique ainsi que le scénario considéré avec un exemple illustratif. Dans le chapitre V, nous présentons notre première proposition ainsi que le mécanisme de négociation adopté. Ensuite, nous décrivons, dans le chapitre VI, notre deuxième proposition inspirée des enchères en détaillant le mécanisme d'apprentissage utilisé.

CHAPITRE 3

3 Etude des limites des solutions existantes et identification des besoins

Sommaire

3.1	Introduction.....	39
3.2	Limites des solutions existantes	39
3.3	Description de la problématique.....	40
3.4	Scénario global	40
3.5	Exemple Illustratif.....	42
3.6	Conclusion.....	43

3.1 Introduction

Les réseaux à radio cognitive émergent comme un nouveau concept d'accès et de partage de ressources spectrales dans les réseaux sans fil. Le but de cette nouvelle technologie est d'exploiter les bandes passantes résiduelles sur les fréquences sous-utilisées du spectre. Dans le premier et deuxième chapitre de ce manuscrit, nous avons présenté les approches les plus connues pour la gestion du spectre dans un réseau à radio cognitive et nous avons détaillé les problématiques traitées et les techniques utilisées.

Dans ce chapitre, nous rappellerons, dans un premier temps, les limites des solutions existantes, puis nous décrirons le problème principal qui motive nos propositions, NESAM (*NEgotiation based approach for Spectrum Access and Mobility management*) et LASMA (*Learning based Auction approach for Spectrum Mobility and Assignment*) et nous exposerons le scénario que nous avons considéré. Avant de conclure le chapitre, nous présenterons un exemple illustratif pour mieux expliquer la problématique posée et la solution envisagée.

3.2 Limites des solutions existantes

Depuis une dizaine d'années, les chercheurs ont donné beaucoup d'intérêt à l'étude de la radio cognitive. Par conséquent, différentes techniques ont été proposées dans la littérature afin d'assurer une gestion efficace du spectre. Chacune de ces études se focalise sur un enjeu particulier de la radio cognitive, comme la détection du spectre, les modes d'accès au spectre, et la stratégie d'utilisation du spectre : simple ou multicanaux, etc. Néanmoins, restent des thématiques primordiales au fonctionnement réel de cette technologie qui n'ont pas encore suscité suffisamment d'intérêt, comme par exemple, la gestion de la mobilité des terminaux à radio cognitive.

Rappelons que les principaux travaux de gestion de spectre proposés dans la littérature s'intéressent à la détection et au partage du spectre en utilisant principalement la théorie de jeux, les protocoles des couches physique et MAC, et les enchères multi-agents afin d'assurer un accès efficace au spectre. Ces approches ont montré de bonnes performances en termes de détection et de partage du spectre, cependant elles ne sont pas suffisantes pour aboutir à une solution complète qui assure une gestion globale du spectre dans les réseaux sans fil et mobiles actuels. D'une part, parce qu'une phase très importante du fonctionnement de la radio cognitive, à savoir le handover spectral, n'est pas encore suffisamment étudiée. D'autre part, parce que la mobilité des nœuds, qui est une composante primordiale dans les réseaux de nos jours, n'a pas encore de solutions concrètes dans les CRNs.

Ainsi, il est nécessaire d'intégrer un mécanisme de handover spectral dans les protocoles de gestion de spectre actuels [103]. De plus, la mobilité des nœuds, qui est un enjeu important, doit être sérieusement prise en considération dans les protocoles de gestion dynamique du spectre. En effet, les approches actuelles se contentent de la synchronisation des événements par rapport à une horloge de référence pour assurer la coordination de l'accès au spectre [103]. Cependant, la mobilité des nœuds peut causer la déviation par rapport à l'horloge de référence ce qui peut provoquer une dégradation remarquable des performances du système. En outre, la mobilité des terminaux à radio cognitive peut entraîner des changements énormes au niveau des ressources spectrales disponibles, empêchant ainsi les protocoles d'accès au

spectre d'opérer correctement et rendant par conséquent l'allocation des ressources et la coordination d'accès moins efficaces.

Ces limitations au niveau des protocoles existants montrent le besoin d'un mécanisme de handover spectral performant et d'une gestion efficace de la mobilité des nœuds tout en assurant un partage efficace du spectre. Actuellement, peu de solutions traitent ces deux aspects en même temps et les recherches dans ce contexte ne font que débiter. De plus, à notre connaissance, il n'existe pas jusqu'à présent une solution complète pour un système à radio cognitive qui permette de gérer aussi bien le partage du spectre que la mobilité des terminaux.

Le but de cette thèse est donc de contribuer à pallier ces limitations en proposant une solution qui traite le handover spectral en assurant un partage efficace du spectre et qui, en même temps, supporte la mobilité des nœuds à radio cognitive. Nous présentons dans ce chapitre une illustration de notre proposition à travers un exemple de gestion dynamique du spectre corrélée avec la gestion de la mobilité dans un réseau à radio cognitive.

3.3 Description de la problématique

Bien que les problématiques liées à la radio cognitive soient diverses, les recherches actuelles dans le domaine de radio cognitive s'intéressent principalement à la détection des ressources libres et à la répartition dynamique de ces fréquences entre les nœuds du réseau.

L'étude de la gestion dynamique du spectre entre terminaux *mobiles* à radio cognitive présente un aspect important de la problématique que nous posons. Notre objectif est également d'obtenir une répartition dynamique et distribuée des fréquences tout en tenant compte de la mobilité des nœuds et des préférences des utilisateurs.

Cette problématique présente plusieurs défis. D'une part, il faut tenir compte des mouvements des utilisateurs et de leurs préférences. Il faut également leur garantir la continuité de service et la QoS exigée par les applications lors de leurs déplacements. D'autre part, le contexte de la radio cognitive ajoute un défi supplémentaire lors de la gestion de la mobilité qui consiste à gérer les éventuels handovers spectraux. Dans ce cas, les contraintes de l'environnement et des ressources spectrales doivent être tenues en compte pour fournir une solution efficace et optimale.

3.4 Scénario global

Afin de mettre en exergue les différentes problématiques rencontrées avec un nœud mobile à RC, nous considérons le scénario donné dans la figure 3.1.

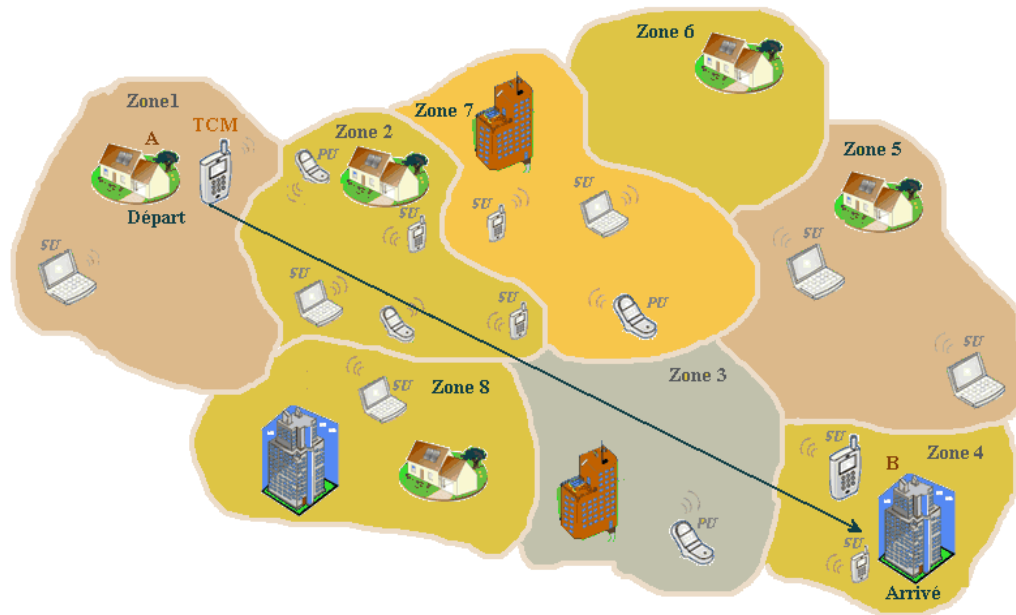


Figure 3.1 Contexte global

Un Terminal à radio Cognitive Mobile (TCM), se déplace d'un point A vers un point B en passant par un ensemble de zones, l'espace étant supposé réparti en zones ayant chacune ses propres caractéristiques (ressources spectrales, nombre d'utilisateurs, etc.). Le TCM utilise initialement une partie du spectre qui lui est déjà allouée dans la zone de départ. Cette allocation est réalisée après une phase de détection et de décision suivant les besoins en ressources (fréquence et bande passante) de l'utilisateur. Dans la nouvelle zone, le TCM préfère conserver cette bande afin de garantir la continuité de service. Dans le cas de son indisponibilité, il peut accéder à une nouvelle qui est soit libre soit en partage avec d'autres utilisateurs, tout en satisfaisant ses exigences.

Les approches d'accès dynamique au spectre proposées dans la littérature ne peuvent pas présenter une solution efficace à ce scénario étant donné que les nœuds du réseau sont mobiles ce qui engendre plusieurs changements au niveau de la disponibilité des ressources spectrales. D'autre part, les solutions de gestion de la mobilité qui existent sont dédiées aux réseaux cellulaires, et leur application dans les CRN, telles qu'elles sont implémentées, n'est pas possible car le contexte de radio cognitive ajoute plus de contraintes au système, comme la nécessité de gérer l'accès au spectre et le handover spectral.

Afin de mieux répondre aux besoins d'un nœud à radio cognitive, nous avons étudié les difficultés qu'il peut rencontrer lors de son déplacement d'une zone vers une autre. Les cas de figure qui peuvent exister sont les suivants :

- La partie du spectre utilisée par le TCM ne garantit plus la QoS requise pour le bon déroulement de son application dans la nouvelle zone.
- La partie du spectre, actuellement utilisée par l'utilisateur, est totalement occupée par d'autres utilisateurs (PUs ou SUs) dans la zone destinataire.
- La partie du spectre, actuellement utilisée par l'utilisateur, est partiellement occupée et un partage est possible. Dans cette hypothèse, On peut distinguer trois cas :

- La bande de spectre est occupée par un PU seulement.
- La bande de spectre est occupée par des SUs seulement (un ou plusieurs).
- Un PU et un ensemble de SUs occupent cette partie du spectre.
- La bande de spectre, actuellement utilisée par le TCM, est disponible dans la nouvelle zone mais il existe d'autres bandes de spectre qui peuvent lui garantir une meilleure QoS dans cette nouvelle zone.

Le scénario, présenté sur la figure 3.1 est un scénario très fréquent dans les réseaux actuels. En effet, les terminaux sont généralement mobiles et auront besoin de choisir la meilleure bande qui réponde à leurs besoins, lorsqu'ils seront équipés de la radio cognitive.

Nous proposons, dans ce travail d'aller au-delà des approches classiques dédiées à une tâche particulière, comme la gestion du spectre ou la gestion de la mobilité et présenter une approche qui corrèle les deux tâches en allouant aux terminaux à radio cognitive la bande de spectre la plus adéquate à leurs besoins et en leur garantissant la continuité de service lors de leurs déplacements.

Nous présenterons dans la section suivante, un exemple illustratif qui détaille un comportement possible pour un TCM dans le cadre du scénario que nous venons de décrire.

3.5 Exemple Illustratif

Nous présentons dans cette section, une vision de la répartition du spectre souhaitée suite au déplacement du TCM d'une zone à une autre sachant que chaque passage peut refléter un des cas de figure détaillés précédemment.

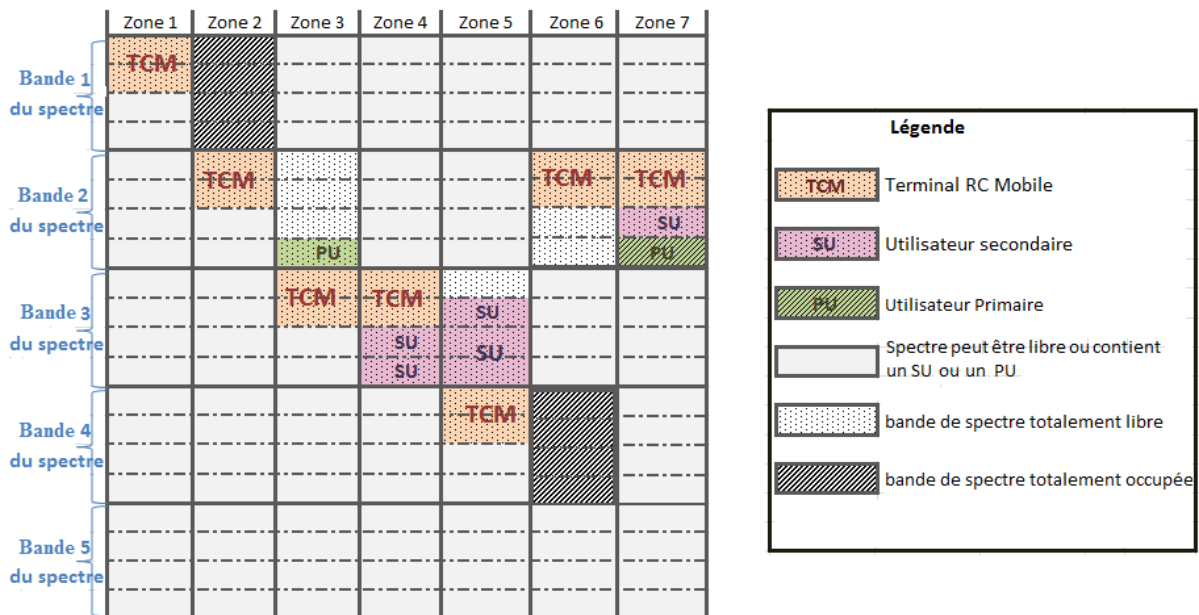


Figure 3.2 Exemple de répartition du spectre

Au départ, le TCM, supposé en train d'utiliser la bande 1 du spectre, se trouve dans la zone 1. Au moment du handover de la zone 1 vers la zone 2, le TCM découvre que la bande 1 du spectre est indisponible (cf. figure 3.2) car elle est totalement occupée par d'autres PUs ou

SUs. Dans ce cas de figure, le TCM doit obligatoirement changer de bande de fréquences. Le choix de la bande doit être effectué selon un algorithme de sélection bien déterminé, qui doit tenir compte des besoins de l'utilisateur et des conditions de la nouvelle zone. Nous supposons que la bande sélectionnée, dans ce cas, est la bande 2 du spectre.

De la zone 2 vers la zone 3, le TCM rencontre un PU qui est en train d'utiliser partiellement la bande 2 de la zone 3. Dans ce cas, le TCM doit demander l'autorisation du PU pour le partage de la bande. Dans l'exemple présenté dans la figure 3.2, le PU est supposé exigeant et refuse donc le partage de spectre. Par conséquent, le TCM doit effectuer un handover spectral et passer à une nouvelle bande de spectre disponible. Après l'exécution de l'algorithme de sélection, le TCM choisit dans cet exemple, la bande 3 qui est totalement libre.

Lors du handover de la zone 3 vers la zone 4, le TCM détecte la présence d'un ensemble de SUs occupant la bande 3 et peut éventuellement coopérer avec eux pour un éventuel partage. Si la bande de spectre libre est suffisante pour le TCM et son inclusion ne dégrade pas la QoS des autres SUs, il peut partager le spectre avec eux immédiatement.

Selon l'exemple de la figure 3.2, le TCM continue à utiliser la bande 3 en effectuant un partage avec les SUs existants dans la zone 4. Dans la zone 5, la bande 3 est partiellement occupée par des SUs seulement mais un partage équitable entre tous les SUs incluant le nouveau TCM, n'est plus possible. Le TCM doit ainsi effectuer un changement spectral et la bande de spectre choisie est 4 puisque libre. Celle-ci devient totalement occupée dans la zone 6 ce qui engendre le handover spectral de la bande 4 vers 2. Le TCM continue à opérer dans cette même bande dans la zone 7 puisque le PU accepte de partager sa portion de spectre.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons identifié les problèmes liés à la mobilité du terminal dans un réseau mobile à radio cognitive tout en décrivant le scénario dans lequel nous nous sommes positionnés. Nous avons illustré la description du scénario choisi et de la problématique étudiée par un exemple donnant le comportement éventuel d'un utilisateur à radio cognitive lors de son passage d'une zone vers une autre selon les contraintes qu'il peut rencontrer dans chaque nouvel environnement.

Le chapitre suivant sera consacré à la description de la première solution que nous proposons pour la gestion du spectre et la gestion de la mobilité dans un réseau à radio cognitive. Le but de cette proposition est principalement d'optimiser l'exploitation et la répartition du spectre et de garantir en même temps la continuité de service lors du déplacement des terminaux mobiles à radio cognitive.

CHAPITRE 4

4 NESAM : Gestion dynamique du spectre basée sur la négociation multi-agents

Sommaire

4.1	Introduction	45
4.2	AGH : Algorithme de gestion du handover	45
4.3	AGS : Algorithme de gestion du spectre pour un terminal mobile à RC.....	48
4.4	Algorithme de sélection du canal cible	50
4.5	Mécanisme de négociation	53
4.6	Diagramme de séquences de NESAM.....	55
4.7	Evaluation des performances de l'approche NESAM	56
4.7.1	Paramètres de simulation.....	56
4.7.2	Métriques	57
4.7.3	Résultats.....	60
4.7.4	Comparaison de <i>NESAM</i> avec l'approche coopérative	69
4.8	Conclusion.....	72

4.1 Introduction

La gestion de la mobilité et l'accès dynamique au spectre représentent deux enjeux majeurs dans les réseaux à radio cognitive. Après avoir présenté les problèmes liés à l'absence de corrélation entre la gestion du spectre et la mobilité des terminaux, ce chapitre est dédié à la description de la solution que nous proposons pour y remédier. Ainsi, nous utilisons les négociations pour le partage dynamique du spectre et pour la gestion de la mobilité des terminaux à radio cognitive lors du handover.

Dans la première partie de ce chapitre, nous présenterons l'algorithme général pour la gestion de la mobilité spectrale et de l'allocation de spectre dans un réseau mobile à radio cognitive. Puis, nous exposerons l'algorithme de décision pour la sélection de la bande la plus adéquate aux besoins du TCM, ainsi que l'algorithme de négociation associé. Nous expliquerons notre proposition par un exemple illustratif et le diagramme de séquences correspondant. Enfin, nous décrirons les résultats de l'évaluation des performances, par simulation, de notre approche *NESAM (NEgotiation based approach for Spectrum Access and Mobility management)*.

4.2 AGH : Algorithme de gestion du handover

Afin de réaliser nos objectifs, nous avons choisi d'utiliser les systèmes multi-agents qui semblent être l'une des approches qui conviennent parfaitement aux spécifications de la radio cognitive. D'une part, les SMA offrent un environnement distribué et interactif qui permet aux utilisateurs de percevoir leur environnement et de communiquer entre eux. Ils nous permettront ainsi de pouvoir gérer un ensemble d'utilisateurs dans un environnement commun et de résoudre les conflits qui peuvent se présenter entre ces utilisateurs. D'autre part, la technique multi-agents garantit l'autonomie des terminaux étant donné que l'agent intégré au sein du terminal est doté de capacités de raisonnement et peut gérer ses propres buts et besoins de façon tout à fait autonome. Toutes les caractéristiques citées ci-dessus sont nécessaires pour converger vers un réseau à radio cognitive efficace et pertinent.

Ainsi, dans notre proposition, nous définissons deux types d'agents : agent PU et agent TCM (Terminal à Radio Cognitive). Nous déployons respectivement des agents PU et des agents TCM au sein des utilisateurs primaires et secondaires du réseau à RC. Par ailleurs, nous nous sommes basés sur la *négociation* multi-agents pour répondre aux exigences des utilisateurs secondaires et primaires et pour permettre aux TCMs de se voir allouer la meilleure bande disponible selon leurs préférences, avec un bon prix pour la durée d'utilisation requise et tout en garantissant la satisfaction des PUs. Nous définissons ainsi un mécanisme de négociation spécifique entre un agent primaire et un agent TCM qui permet d'assurer un partage efficace du spectre.

La mobilité du terminal à radio cognitive lui impose un comportement différent au moment de changement de zones sur la base des cas de figures détaillés dans la section 3.3. Le TCM doit donc disposer des mécanismes nécessaires pour assurer la continuité de service ainsi qu'une gestion efficace du spectre. Pour ces raisons, nous proposons un algorithme, qui sera exécuté par le TCM lors de la phase du handover (AGH : Algorithme de Gestion du Handover).

Chaque terminal à radio cognitive est géré par un agent qui lui permet de percevoir son environnement. Cet agent lui permet également de communiquer avec les utilisateurs et lui donne, par la suite, la possibilité de négocier ou de coopérer avec eux en cas de besoin.

Dans notre proposition, le TCM déclenche l'exécution de l'algorithme dès qu'il se rapproche d'une nouvelle zone pour prévoir un éventuel handover. En effet, le TCM change de zone si sa puissance du signal reçu (RSS) devient faible et inférieure à une certaine limite (L_{RSS}). Le TCM essaie ainsi de s'informer sur son nouvel environnement, et suivant l'état du spectre dans la nouvelle zone, le TCM agit de la manière proposée dans l'algorithme AGH décrit ci-dessous. Cet algorithme a été validé dans [98] et [101].

AGH : Algorithme de Gestion du Handover pour un terminal mobile à RC

```

spectre(TCM) // la partie du spectre dont le TCM a besoin
spectre(SUs) // la partie du spectre que les SUs occupent
QoS(TCM) // la qualité de service demandée par le TCM
spectrei(zone j) // la partie i du spectre qu'utilise actuellement le TCM dans la zone j
spectrei(zone j+1) // la partie du spectre que devrait occuper le TCM dans la nouvelle zone j+1

Si (spectrei(zone j+1) = totalement occupé) ou (spectrei(zone j+1) ne garantit plus la QoS(TCM))
Alors
    spectrei(zone j+1) ← Choisir_nouveau_spectre() // changement de spectre
Sinon
    Si (spectrei(zone j+1) est totalement libre)
    Alors
        spectrei(zone j+1) ← spectrei(zone j) // continuer à utiliser le même spectre
    Sinon
        Si (PU ∈ spectrei(zone j+1)) // s'il existe un PU dans le spectre
        Alors
            Si négociation (PU, TCM) = acceptation
            Alors
                partage (PU, TCM)
            Sinon
                spectrei(zone j+1) ← Choisir_nouveau_spectre()
            Fin Si
        Sinon // s'il existe un ou plusieurs SUs partageant déjà cette partie du spectre
        Si spectre(TCM) < (spectrei(zone j+1) – spectre (SUs))
        Alors
            partage (TCM, SUs)
        Sinon
            spectrei(zone j+1) ← Choisir_nouveau_spectre()
        Fin Si
    Fin Si
Fin Si
Fin Si
Fin Si

```

Dans le cas où la partie du spectre, utilisée par le TCM dans la zone initiale avant le handover, est totalement libre (le cas le plus simple), alors le TCM continue à utiliser la même bande de fréquences dans la nouvelle zone (pas de handover spectral). Il peut profiter ainsi du service en cours sans interruption ni dégradation de qualité de service.

Par contre, si la partie courante du spectre est totalement occupée dans la nouvelle zone ou si elle ne garantit plus la QoS demandée, alors le TCM doit effectuer un handover spectral. Par ailleurs, si elle est partiellement occupée (d'autres utilisateurs coexistent dans cette bande), le TCM agit selon le type d'utilisateur (SU ou PU) occupant actuellement cette partie de spectre souhaitée dans la nouvelle zone :

1. S'il s'agit d'un PU alors le TCM doit demander son accord pour le partage de sa portion de spectre en déclenchant une éventuelle négociation. Si la négociation échoue, c'est-à-dire que le PU refuse de partager sa bande de fréquences, le TCM sera obligé de changer de bande.
2. Dans le cas où le spectre est partiellement occupé par des SUs seulement, une coopération éventuelle entre le TCM et les autres SUs peut alors avoir lieu. Ainsi, les SUs, qui occupent la bande, vérifient la possibilité de partager le spectre avec le nouveau TCM. Dans le cas où la quantité de bande demandée est disponible et l'inclusion du TCM ne perturbe pas le fonctionnement des autres SUs, ces derniers partagent la bande en question avec le TCM. Sinon, un handover spectral s'impose.

Grâce à notre algorithme, le TCM évitera de changer de spectre tant que la portion qu'il utilise est toujours disponible et lui garantit la QoS demandée, ce qui permet *d'empêcher les délais supplémentaires engendrés par le processus de handover spectral*, et constitue donc une importante contribution par rapport à l'existant.

Etant donnée la diversité des cas pour la résolution du problème de handover spectral lors du déplacement des TCMs, nous nous limitons, dans le reste de ce travail, au cas où chaque partie du spectre est attribuée à un PU. Par conséquent, pour pouvoir accéder dynamiquement à une bande inutilisée, un SU doit obligatoirement avoir l'accord du PU possédant la licence sur cette bande, pour un partage éventuel de la partie disponible du spectre. Nous supposons également que si une bande de fréquences n'est pas attribuée à aucun PU dans une zone particulière, ceci implique qu'elle n'est pas accessible dans cette zone par manque de couverture réseau.

Dans ce contexte et par analogie avec les cas précédemment étudiés, le cas où la bande est totalement occupée signifie qu'elle est totalement utilisée par le PU licencié. Par ailleurs, si la bande ne garantit pas la qualité de service demandée, ceci veut dire que le PU licencié n'a pas suffisamment de bande passante libre pour satisfaire les besoins du TCM en termes de ressources spectrales ou bien la bande concernée est chargée ce qui ne permettra pas au TCM de conserver la qualité de service requise par les services dont il a besoin. Nous exposerons, dans la section suivante, le scénario précis relatif au contexte que nous venons de décrire puis nous présenterons la solution de gestion de spectre correspondante.

4.3 AGS : Algorithme de gestion du spectre pour un terminal mobile à RC

Pour mettre en œuvre notre proposition, nous considérons le scénario illustré par la figure 4.1 dans lequel les TCMs se déplacent d'une zone i vers une zone j , en passant par un ensemble de zones intermédiaires.

Les zones représentent des réseaux ad hoc, déployés avec un ensemble de PUs sachant que chaque partie du spectre est attribuée à un PU. Chaque zone a ses propres caractéristiques telles que les bandes de fréquences existantes, le nombre de PUs présents dans le réseau et les ressources spectrales disponibles. Les PUs de chaque zone sont supposés fixes et sont aléatoirement déployés.

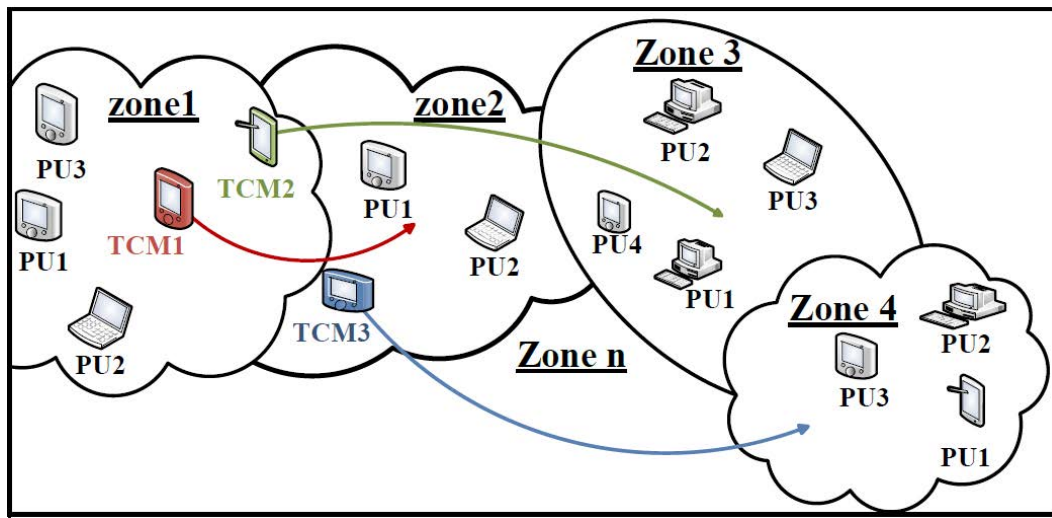


Figure 4.1 Scénario considéré

Il est important de rappeler que le problème à résoudre consiste à permettre aux TCMs de se déplacer d'une zone à une autre de façon transparente sans provoquer l'interruption du service et en respectant les exigences des nœuds et les conditions du réseau cible.

A chaque fois qu'un TCM se rapproche d'une nouvelle zone de couverture², son agent commence à communiquer avec les PUs de cette zone pour mieux connaître le nouvel environnement. Selon les informations enregistrées sur le nouveau réseau, l'agent TCM met à jour sa base de connaissances avec, entre autres, les conditions du spectre, les ressources disponibles de chaque PU et les contraintes d'allocation des bandes comme le prix et la durée d'utilisation. Par la suite, le TCM choisit la bande appropriée à ses besoins et négocie avec le PU ayant la licence sur cette bande pour la partager avec lui.

L'objectif de la négociation est de réduire le prix proposé par le PU pour l'allocation de la bande sélectionnée ou bien de prolonger la durée d'utilisation attribuée. L'agent PU peut accepter ou refuser de partager sa bande de spectre. Chaque agent cherche à maximiser ses gains: le TCM essaie d'avoir la bande la plus adéquate avec le coût le plus faible et la durée la plus longue, tout en conservant, dans la mesure du possible, la bande de fréquences qu'il utilise actuellement. D'un autre côté, le PU veut également profiter de ses bandes de fréquences non utilisées en les affectant à des TCMs à des prix intéressants.

² Le TCM peut détecter l'arrivée à une nouvelle zone lorsque la puissance du signal reçu RSS devient faible par rapport au RSS limite (L_{RSS}) qui permet d'avoir la connectivité et la QoS nécessaires.

L'algorithme AGS (Algorithme de Gestion du Spectre) décrit le comportement du TCM pour la gestion du spectre lors du changement de zone. Pour mieux comprendre cet algorithme, la figure 4.2 présente l'organigramme global du comportement du TCM.

AGS: Algorithme de Gestion du Spectre pour un terminal mobile à RC

Fin-Durée=faux //La durée attribuée n'a pas pris fin

Ch-Zone= faux // le TCM ne va pas changer de zone

Si (le TCM s'approche d'une nouvelle zone) // $RSS_{reçu} < RSS_{limite}$

Alors

Ch-Zone=vrai

Fin si

Tant que (Ch-Zone=vrai **Ou** Fin-Durée=vrai)

Faire

//Le TCM collecte des informations sur les PUs ayant suffisamment de bandes libres

A : PU_List $\leftarrow$ **Collection_PUs_Info()**

Si (PU_List est vide)

Alors

//Le TCM attend un temps (Δt) et redemande l'accès au spectre

Attendre (Δt)

Aller à A

Sinon

//Le TCM choisit le PU proposant la meilleure bande

Sélection_PU()

Partage du spectre avec le PU sélectionné

Si (la durée allouée expire)

Alors

Fin-Durée = vrai

Fin si

Fin si

Fin tant que

Le TCM commence par collecter des informations relatives aux PUs existants dans le nouveau réseau en utilisant la fonction **Collection_PUs_Info()**. Il diffuse ainsi un message de demande de bande noté '**DEMANDE_BANDE**' qui contient la quantité de bande spectrale souhaitée. Chaque PU recevant le message de diffusion vérifie s'il dispose suffisamment de bandes libres par rapport au besoin du TCM. Seules les PUs pouvant satisfaire le besoin du TCM en termes de bande passante répondent par un message '**RESPONSE_BANDE**'. Dans ce message, les PUs concernés transmettent leurs propres informations telles que la bande de fréquences qu'ils utilisent, le prix et la durée pour lesquels ils veulent allouer leurs bandes libres. Le TCM attend un temps Γ pour la réception des éventuelles réponses des PUs. S'il reçoit au moins une réponse, alors il exécute la procédure **Sélection_PU()** pour choisir le PU proposant la bande de fréquences la plus adéquate à ses besoins. Nous détaillerons l'algorithme de sélection dans la section suivante (section 4.4). Cependant, si au bout de ce temps Γ le TCM

ne reçoit aucune réponse, il attend un temps additionnel Δt puis relance la fonction de collecte d'informations dans son voisinage. Δt est supposé plus grand que le temps Γ (dans notre cas Δt est égal au temps maximal que peut attribuer un PU à un SU donnée) afin d'avoir des éventuelles libérations de bandes entre temps.

Une fois un accord est établi entre le TCM et le PU sélectionné pour le partage du spectre, le TCM utilise la bande de spectre allouée pendant la durée attribuée, et dès que cette durée expire, le TCM relance la fonction *Collection_PUs_Info()*.

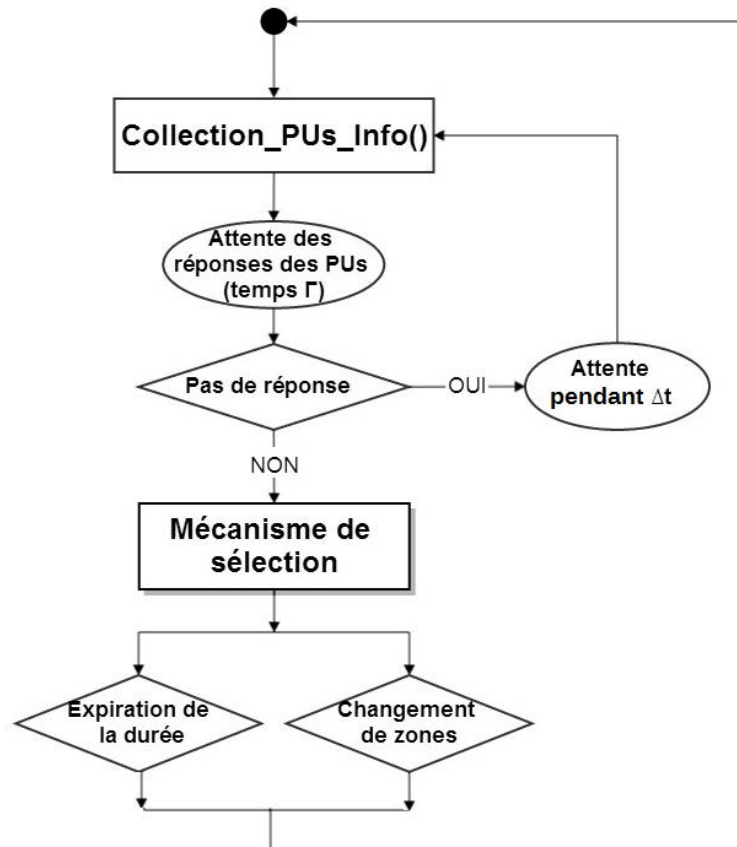


Figure 4.2 Organigramme global du comportement du TCM

Dans ce qui suit, nous détaillerons l'algorithme de sélection avec le mécanisme de négociation associé.

4.4 Algorithme de sélection du canal cible

L'algorithme de sélection permet au TCM de choisir le PU qui offre la bande la plus adéquate à ses demandes pour un éventuel partage. Le TCM tentera alors de conserver sa bande de fréquences actuelle afin de minimiser le nombre de handovers spectraux tout en ayant un accès avec un prix acceptable par rapport à la durée attribuée. Ainsi, le TCM privilégie en priorité le PU offrant la même fréquence qu'il est en train d'utiliser actuellement. Ce PU est noté PU_{sf} désignant '*PU with Same Frequency*', qui peut être disponible et en mesure de fournir toute la bande passante requise par le TCM. Le PU_{sf} peut être également occupé ou indisponible dans les deux cas suivants : (1) il est en train d'utiliser la totalité de sa bande

passante, ou (2) la partie du spectre libre dont il dispose n'est pas suffisante pour couvrir les besoins du TCM.

Par ailleurs, si le PU_{sf} est disponible, le TCM le présélectionne en priorité. Sinon, il choisit le PU proposant le prix par seconde initial ($PPS_{initial}$) le plus faible. Le $PPS_{initial}$ proposé par un PU est donné par l'équation (4.1).

$$PPS_{initial} = \frac{P_{initial}}{D_{initial}} \quad (4.1)$$

Où $P_{initial}$ et $D_{initial}$ représentent respectivement le prix et la durée initialement proposés par le PU, $P_{initial}$ et $D_{initial}$ sont aléatoires et différents d'un PU à un autre tels que :

$$\begin{cases} P_{initial} \in [PI_{min}(PU), PI_{max}(PU)] \\ D_{initial} \in [DI_{min}(PU), DI_{max}(PU)] \end{cases}$$

PI_{min} et PI_{max} représentent les valeurs minimales et maximales des prix qui peuvent être proposées par un PU et DI_{min} et DI_{max} représentent, quant à elles, les valeurs minimales et maximales de durées d'utilisation qui peuvent être accordées par un PU pour l'utilisation de sa bande de spectre. Dans ce travail, nous supposons que ces bornes sont fixes et les mêmes pour tous les PUs.

Par ailleurs, dans les deux cas, que ce soit lorsque le TCM présélectionne le PU_{sf} ou le PU offrant le $PPS_{initial}$ le plus faible, le TCM ne peut pas se limiter à l'indicateur de fréquence ni à l'indicateur de prix par seconde pour choisir la bande souhaitée puisqu'il peut rencontrer des situations inconfortables comme un prix très élevé ou bien un prix intéressant mais une très courte durée. Pour éviter ces inconvénients, chaque TCM a son propre prix par seconde maximal, noté PPS_{max} qui représente le prix par seconde limite qu'un TCM peut accepter. Il est dérivé du prix maximal qu'il peut payer pour l'accès au spectre (P_{max}) et de la durée d'utilisation souhaitée notée D_{fav} . Le PPS_{max} est donné par l'équation (4.2).

$$PPS_{max} = \frac{P_{max}}{D_{fav}} \quad (4.2)$$

$$\text{Où } \begin{cases} P_{max} \in [P_{min}(SU), P_{max}(SU)] \\ D_{fav} \in [D_{min}(SU), D_{max}(SU)] \end{cases}$$

Notons que D_{fav} n'est ni un maximum ni un minimum de durée d'allocation mais représente simplement une durée favorite sachant que le TCM peut accepter une durée d'utilisation plus grande ou plus petite que D_{fav} . En effet, D_{fav} sert à définir le PPS_{max} de chaque TCM et intervient dans le calcul du nouveau prix que le TCM propose en cas de négociation (cf. figure 4.4). En outre, D_{fav} peut dépendre de l'application utilisée. D_{min} et D_{max} définissent les bornes de l'intervalle auquel appartient D_{fav} alors que P_{max} représente le prix maximal qu'accepte de payer un TCM. P_{max} est une valeur aléatoire de l'intervalle $[P_{min}(SU), P_{max}(SU)]$ et elle diffère d'un TCM à un autre.

Par ailleurs, si le prix par seconde initialement proposé par le PU dépasse le PPS_{max} du TCM alors ce dernier déclenche une négociation avec le PU présélectionné afin de réduire le prix proposé ou d'allonger la durée d'allocation, de telle sorte que le prix par seconde (PPS) à payer soit diminué.

En cas de succès de la négociation, un accord est établi entre le TCM et le PU pour le partage du spectre. Dans le cas contraire, le TCM élimine ce PU présélectionné de la liste de PUs et cherche un autre susceptible de partager avec lui sa bande. Dans ce cas, le TCM préchoisit le PU suivant qui propose le prix par seconde le plus faible parmi le reste des PUs.

Afin de mieux clarifier le fonctionnement de l'algorithme de sélection (présenté en Annexe A), nous présenterons son organigramme dans la figure 4.3 et détaillerons l'algorithme de négociation correspondant dans la section 4.5.

Pour faciliter la lecture de la suite du chapitre, le tableau 4.1 décrit les différents acronymes que nous adoptons.

Tableau 4.1 Signification des acronymes

Acronyme	Définition
PPS	Prix par seconde
$PPS_{initial}$	Prix Par seconde initialement proposé par le PU
PPS_{max}	Prix par seconde maximal que peut payer le TCM pour l'allocation d'une bande
P_{max}	Prix maximal que peut payer le TCM
D_{fav}	Durée d'utilisation souhaitée par le TCM
$D_{initial}$	Durée initialement proposée par le PU
$P_{initial}$	Prix initialement proposé par le PU
PU_{sf}	PU attribuant la même fréquence qu'utilise actuellement le TCM

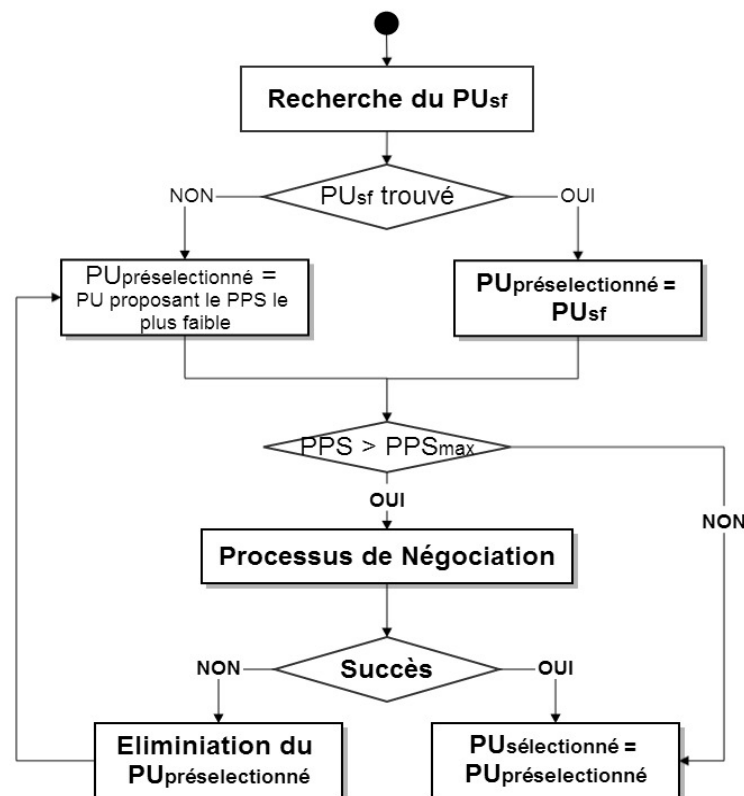


Figure 4.3 Organigramme de l'algorithme de sélection

4.5 Mécanisme de négociation

Lorsqu'une négociation se déclenche, le TCM essaie de diminuer le prix ou bien d'augmenter la durée d'utilisation proposée par le PU. La figure 4.4 décrit en détail le processus de négociation correspondant.

Dans le reste du document, P_{New} et D_{New} définissent, respectivement, le nouveau prix et la nouvelle durée qui peuvent être proposés par le TCM lors de la négociation.

La réponse du PU dépend de sa flexibilité quant à la réduction du prix ou l'augmentation de la durée d'allocation initialement proposés. Cette souplesse au niveau de la négociation est modélisée par deux paramètres α et β compris entre 0 et 1 :

- α est le seuil qu'utilise le PU lors de la négociation du prix. Le PU n'accepte un nouveau prix que s'il est supérieur ou égal à α multiplié par son prix initial.
- β est le seuil utilisé par le PU lors de la négociation de la durée. Le PU n'accepte d'augmenter sa durée que si elle ne dépasse pas $(1+\beta)$ multiplié par sa durée initialement proposée.

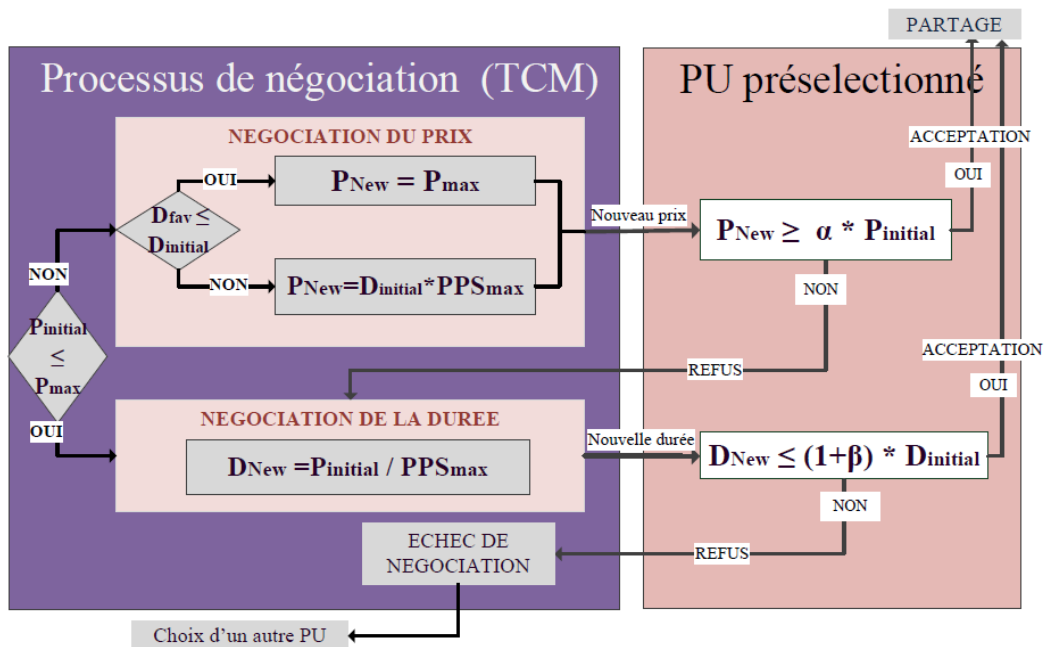


Figure 4.4 Mécanisme de négociation

Le processus de négociation est activé lorsque le PPS initialement proposé par le PU préselectionné est plus élevé que le PPS_{max} du TCM. Ce dernier négocie alors le prix de la bande de fréquences à allouer ou sa durée d'utilisation. Deux cas de figure sont possibles :

- Le prix initialement proposé par le PU ($P_{initial}$) est supérieur à P_{max} du TCM, auquel cas ce dernier commence par une ***négociation du prix***.
- Le prix initialement proposé par le PU ($P_{initial}$) est intéressant ($P_{initial} \leq P_{max}$) mais le $PPS_{initial}$ du PU reste élevé à cause de la courte durée proposée, auquel cas le TCM ***négocie directement la durée***.

Détaillons, dans ce qui suit, les deux cas de négociation.

Négociation du prix

Lorsque le TCM négocie le prix, il propose au PU présélectionné un nouveau prix P_{New} donné par l'équation (4.3).

$$P_{New} = \begin{cases} D_{initial} * PPS_{max}(TCM) & \text{si } D_{fav} > D_{initial} \\ P_{max} & \text{si } D_{fav} \leq D_{initial} \end{cases} \quad (4.3)$$

Le but de P_{New} est de diminuer le prix annoncé par le PU de façon à réduire la valeur du PPS à payer. Selon la valeur de son PPS_{max} , le TCM propose un nouveau prix correspondant à ce qu'il peut payer pour la durée d'utilisation initialement proposée par le PU. Ce nouveau prix est évidemment inférieur à $P_{initial}$ et inférieur ou égal à P_{max} du TCM (annexe C.1).

La réponse du PU pour la proposition du nouveau prix dépend du seuil α . Si P_{New} est supérieure à α multiplié par $P_{initial}$, alors le PU accepte le nouveau prix proposé et la négociation est réussie. Dans le cas contraire, le PU refuse l'offre de prix et le TCM déclenche une négociation sur la durée comme il sera détaillé dans le paragraphe suivant.

Négociation de la durée

Lorsque le TCM négocie la durée d'utilisation du spectre, il propose au PU une nouvelle durée D_{New} donnée par l'équation (4.4).

$$D_{New} = \frac{P_{initial}}{PPS_{max}(TCM)} \quad (4.4)$$

La nouvelle durée D_{New} est toujours supérieure à $D_{initial}$ (annexe C.2). La réponse du PU dépend de son seuil β ; si D_{New} est inférieure à $(1+\beta) * D_{initial}$, alors le PU accepte la proposition du TCM. Il y a échec de la négociation dans le cas contraire.

Après la négociation, le TCM se trouve face à l'un de ces deux cas :

- Le succès de la négociation: Un accord est établi entre le TCM et le PU présélectionné. Ainsi, le PU accepte de partager sa bande de spectre avec le nouveau prix ou la nouvelle durée proposée.
- Echec de la négociation: Le PU présélectionné rejette la nouvelle durée proposée par le TCM. En conséquence, ce dernier présélectionne le PU suivant qui offre le PPS le plus faible dans la liste de PUs et essaie, de nouveau, de parvenir à un accord avec ce PU.

Afin de clarifier le mécanisme de négociation proposé, nous considérons l'exemple illustratif suivant dont les paramètres du PU et du TCM sont dressés dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 Valeurs initiales adoptées dans notre exemple

Paramètres du PU	Valeurs	Paramètres du TCM	Valeurs
$P_{initial}$	12 unités monétaires (um)	P_{max}	9 um
$D_{initial}$	450 unités de temps (ut)	D_{fav}	600 ut
α	0.7	PPS_{max}	0.015
β	0.8		

Le PU propose au TCM un prix initial $P_{initial} = 12$ um (unités monétaires) et une durée d'utilisation initiale $D_{initial} = 450$ ut (unité de temps). Nous supposons que le PPS_{max} du TCM est égal à 0.015 avec un prix maximal $P_{max} = 9$ um et une durée utilisation souhaitée $D_{fav} = 600$ ut. Comme le $PPS = 12 / 450$ est plus élevé que le PPS_{max} et $P_{initial} > P_{max}$, alors le TCM déclenche la négociation du prix et propose au PU un nouveau prix P_{new} égal à 6.75 um calculé par l'équation (4.3). Nous supposons que le seuil α utilisé par le PU pour la négociation du prix est égal à 0.7. Par conséquent, le PU refuse le nouveau prix proposé par le TCM comme il est inférieur à $\alpha * P_{initial}$ ($6.75 < 8.4 = 0.7 * 12$). Ainsi, le TCM procède à une négociation de la durée et propose une nouvelle durée $D_{New} = 800$ ut calculée en utilisant l'équation (4.4). Comme D_{New} est inférieure à $(1 + \beta) * D_{initial}$ ($800 < (1+0.8) * 450$), le PU accepte la proposition du TCM et un accord de partage est établi avec un prix égal à 12 um et une durée d'utilisation égale à 800 ut. Le TCM a donc réussi à obtenir une durée d'utilisation plus élevée pour le prix initialement proposé par le PU.

Dans la section suivante, nous expliquerons davantage les échanges de messages possibles entre un PU et un TCM à travers un diagramme de séquences.

4.6 Diagramme de séquences de NESAM

La figure 4.5 décrit le diagramme de séquences entre un TCM et un PU.

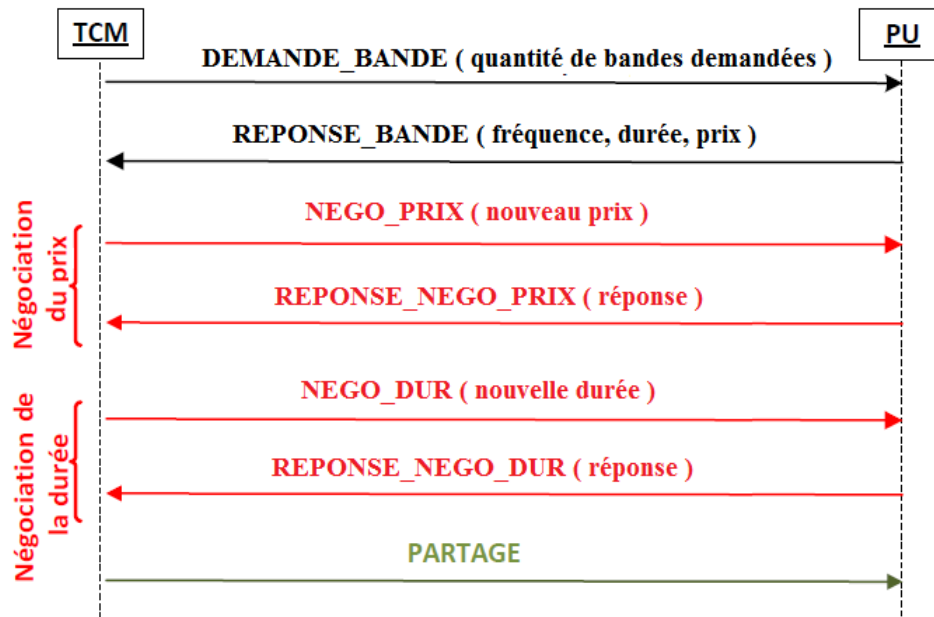


Figure 4.5 Diagramme de séquences

Le TCM diffuse un message **DEMANDE_BANDE** et attend la réponse des PUs. Un PU prêt à partager sa bande de spectre lui répond par un message **REPONSE_BANDE** contenant toutes les informations sur l'utilisation de son spectre. Si le PU présente la bande la plus adéquate aux besoins du TCM et qu'en plus le prix par seconde qu'il propose ne dépasse pas le PPS_{max} du TCM alors ce dernier envoie à ce PU un message **PARTAGE** pour déclencher le partage du spectre avec le prix et la durée qui sont spécifiés par le PU.

Dans le cas où le prix par seconde proposé par le PU pour l'allocation du spectre dépasse PPS_{max} du TCM, alors ce dernier déclenche une négociation avec ce PU. Dans ce cas, quatre types de messages additionnels peuvent être échangés qui sont, respectivement :

- **NEGO_PRIX** et **REPONSE_NEGO_PRIX** pour la négociation du prix,
- **NEGO_DUR** et **REPONSE_NEGO_DUR** pour la négociation de la durée.

Si la négociation aboutit à un accord, alors le TCM envoie le message **PARTAGE** au PU. Dans le cas contraire, il recommence la négociation avec un autre PU.

Nous avons présenté dans ce qui précède l'approche *NESAM* pour la gestion du spectre dans un réseau mobile à radio cognitive. Nous avons présenté notre algorithme pour le handover spectral et avons introduit le processus de négociation que nous avons adopté pour la sélection de la bande de spectre la plus adéquate aux besoins des TCMs. Le but de la négociation effectuée est de réduire le prix initialement proposé par le PU ou d'augmenter la durée d'allocation du spectre.

Il est important de noter que nous avons proposé une solution pour la gestion du spectre dans le cas où les nœuds sont mobiles mais elle est également fonctionnelle lorsque les SUs sont fixes. En plus, notre proposition peut être appliquée pour un réseau ad-hoc ou cellulaire. La suite de ce chapitre est consacrée à l'évaluation des performances de notre proposition.

4.7 Evaluation des performances de l'approche NESAM

Cette section présente les résultats des simulations que nous avons effectuées afin de mesurer les performances de *NESAM*. D'une part, ces simulations ont pour objectif d'étudier l'effet de la variation de certains paramètres relatifs à notre approche, comme par exemple, les seuils α et β et le nombre de TCMs dans le réseau. D'autre part, ils nous permettent de voir à quel point notre approche améliore l'exploitation du spectre et les performances du handover.

Nous commencerons par présenter les paramètres de simulation ainsi que les différentes métriques que nous avons adoptées pour évaluer les performances de notre approche. Par la suite, nous analyserons les résultats que nous avons obtenus avec *NESAM* et nous les comparerons avec ceux obtenus avec une approche coopérative.

4.7.1 Paramètres de simulation

Afin d'évaluer les performances de notre proposition, nous avons utilisé un simulateur à événements discrets OMNETPP [147]. Le tableau 4.3 résume les différents paramètres de simulations que nous avons utilisés pour l'évaluation de *NESAM*.

Nous considérons dans notre scénario le cas spécifique où les TCMs se déplacent d'une première zone vers une autre. Nous déployons les PUs, au nombre de 100, aléatoirement dans ces deux zones et supposons que les TCMs arrivent selon la loi de Poisson de paramètre 5. Le spectre étant supposé divisé en bandes égales d'une largeur de 4 MHz, chaque bande est divisée en sous-bandes ayant chacune une taille égale à 1 MHz. Le TCM se déplace linéairement à une vitesse fixée à 10 mètres par seconde. En plus, le nombre de TCMs dans une simulation de 600s, varie entre 100 et 200. Nous considérons que tous les TCMs demandent en permanence

l'accès au spectre. Les paramètres $P_{initial}$ et $D_{initial}$ sont aléatoires et changent d'un PU à un autre. $P_{initial}$ varie entre 40 et 60 unités monétaires (um) et $D_{initial}$ varie entre 45 et 120 secondes (s). De même, les valeurs P_{max} et D_{fav} sont aléatoires où P_{max} appartient à l'intervalle [40-90] um et D_{fav} appartient à l'intervalle [60-120] secondes. Le reste des paramètres de simulation est présenté dans le tableau 4.3.

Afin d'évaluer la précision des résultats de simulation, nous avons calculé pour chacune des valeurs obtenues un intervalle de confiance à 95%. Ces intervalles de confiance sont représentés dans les courbes par des barres d'erreurs. Dans certaines courbes, ces barres ne sont pas (ou peu) visibles car les résultats sont très précis.

Tableau 4.3 Les paramètres de simulation

Paramètres	Valeurs
Distribution des TCMs (λ)	5
Nombre de PUs	100
Taille d'une bande de spectre	4 MHz
Taille d'une sous-bande spectrale	1 MHz
Vitesse du TCM	10m/s
Type de mobilité du TCM	Linéaire
Rayon de transmission	500 mètres
Γ (Délai d'attente de réception des réponses des PUs)	0.1 s
$P_{initial}$ du PU	[40- 60] um
$D_{initial}$ du PU	[45- 120] s
P_{max} du TCM	[40- 90] um
D_{fav} du PU	[60-120] s
Nombre de simulations	10
Temps de simulation	600s

4.7.2 Métriques

Dans cette section, nous définissons les différentes métriques choisies afin d'évaluer le fonctionnement de notre système. Nous commençons par mesurer le taux de réussite des négociations en fonction des seuils α et β . Par la suite, nous étudions l'utilisation du spectre au cours du temps et en fonction du nombre de TCMs pour différentes valeurs de α et β . Ensuite, afin d'évaluer la mobilité et les performances du handover, nous calculons le taux moyen de handover spectral, le taux moyen de blocage et le délai du handover. Nous mesurons également la satisfaction des utilisateurs du réseau en calculant l'*utilité* des PUs et des TCMs. Enfin, nous évaluons le coût de la négociation en termes de messages échangés.

- *Taux moyen de réussite des négociations*

Le taux moyen des négociations réussies représente les négociations qui ont abouti à un accord sur le prix ou la durée. On dit qu'il y a un échec si aucun arrangement n'est possible ni sur le prix ni sur la durée. Pour chaque TCM, nous calculons en moyenne le pourcentage des

négociations réussies parmi celles déclenchées, et le taux moyen de réussite des négociations sera la moyenne des pourcentages calculés pour tous les TCMs. Etant donné que le processus de négociation est paramétré par les seuils α et β , le taux de réussite des négociations dépend fortement de ces deux valeurs.

- *Taux moyen d'utilisation du spectre*

L'utilisation du spectre à un instant t noté $US(t)$ est égale à la quantité des bandes utilisées par tous les PUs et par tous les SUs présents dans la même zone à l'instant t , divisée par la quantité totale des bandes spectrales existantes. Elle est donnée par l'équation (4.5).

$$US(t) = \frac{\sum_{k=1}^{nbPU} S * PU_k(t) + \sum_{k=1}^{nbTCM(t)} S * TCM_k(t)}{\text{bandes de spectre existantes}} \quad (4.5)$$

Où $nbPU$ et $nbTCM(t)$ représentent, respectivement, le nombre de PUs et de TCMs existants dans la zone. S est la largeur de la sous-bande, fixée dans nos simulations à 1 MHz. $PU_k(t)$ représente la quantité de sous-bandes spectrales en cours d'utilisation par le $k^{\text{ème}}$ PU à l'instant t . De même, $TCM_k(t)$ est la quantité des sous-bandes spectrales en cours d'utilisation par le $k^{\text{ème}}$ TCM à l'instant t .

- *Taux moyen de handover fréquentiel*

Le handover spectral ou fréquentiel est un composant indispensable dans les réseaux à radio cognitive qui joue un rôle important pour maintenir la continuité de service lors du déplacement des nœuds. Une des métriques les plus importantes pour caractériser la gestion de la mobilité dans ces réseaux est le nombre moyen de handovers spectraux effectués par les TCMs, lorsqu'ils changent de réseau [148]. Le taux moyen de handovers fréquents reflète le nombre moyen de handovers avec changement de fréquence (handovers spectraux) par rapport au nombre total de handovers (avec et sans changement de fréquence).

- *Taux moyen de blocage du handover*

La continuité de service dans un réseau sans fil mobile, y compris les réseaux à radio cognitive, est un concept primordial pour assurer la qualité de service et éviter les interruptions éventuelles. Afin de caractériser l'impact de notre proposition sur la continuité de service, nous proposons de mesurer le taux moyen de blocage du handover. Ce dernier présente le pourcentage de requêtes qui n'ont pas abouti à une attribution du spectre. Un faible taux de blocage reflète une bonne garantie de la continuité de service, et ainsi, un système plus efficace. Rappelons que, dans notre proposition, deux cas peuvent engendrer un blocage:

1. Il n'existe aucune bande spectrale libre permettant de satisfaire les besoins du TCM en termes de ressources spectrales.
2. Toutes les négociations établies avec les PUs, ayant suffisamment de bandes libres par rapport à ce qui est demandé par le TCM, ont échoué.

- *Utilité des TCMs*

L'utilité des TCMs permet d'analyser le degré de satisfaction des utilisateurs à RC. Pour un TCM, la meilleure utilité (degré de satisfaction le plus élevé) est celle qui minimise le prix qu'il paye pour s'octroyer une partie du spectre et qui maximise la durée de son utilisation. L'utilité d'un TCM noté $U(TCM_i)$ est donnée par l'équation (4.6).

$$U(TCM_i) = \frac{1}{N_{all}} \sum_{j=1}^{N_{all}} \left(\frac{PI_{min}(PU)}{P[i]_{payé}} * \frac{D[i]_{attribuée}}{DI_{max}(PU)} \right) \quad (4.6)$$

Où N_{all} est le nombre total d'allocations pour le TCM_i. $P[i]_{payé}$ est le prix unitaire payé (pour l'allocation d'une sous-bande) par le TCM_i et $D[i]_{attribuée}$ est la durée d'accès attribuée. Rappelons que $PI_{min}(PU)$ et $DI_{max}(PU)$ représentent, respectivement, le prix minimum et la durée maximale d'utilisation qui peuvent être donnés par un PU pour l'accès au spectre.

- *Utilité des PUs*

L'utilité du PU_j notée $U(PU_j)$ dépend largement du prix payé par le TCM par rapport à la durée d'utilisation du spectre de chaque partage, elle est donnée par l'équation (4.7).

$$U(PU_j) = \frac{1}{N_{partage}} \sum_{i=1}^{N_{partage}} \left(\frac{P[i]_{payé}}{P_{max}(TCM)} * \frac{D_{min}(TCM)}{D[i]_{attribuée}} \right) \quad (4.7)$$

Où $P_{max}(TCM)$ et $D_{min}(TCM)$ représentent, respectivement, le prix maximum et la durée d'utilisation favorite minimale qui peuvent être proposés par un TCM pour un accès au spectre. $N_{partage}$ correspond au nombre total de partages effectués pour le PU_j.

- *Pourcentage de TCMs servis*

Le pourcentage de TCMs servis représente le nombre de SUs qui ont pu accéder au spectre (au moins une fois) par rapport au nombre total de TCMs.

- *Pourcentage de PUs qui ont pu allouer leurs bandes*

Ce pourcentage représente le nombre de PUs qui ont pu allouer leurs bandes de spectre libres par rapport au nombre total de PUs.

Ces deux derniers métriques reflètent, en même temps, le degré de satisfaction des utilisateurs (primaires et secondaires) ainsi que la continuité de service (taux de non blocage).

- *Délai de handover*

Le délai de handover est l'un des principaux critères d'évaluation d'un algorithme de handover. En effet, un bon algorithme permet de minimiser à la fois le délai de transfert et le nombre moyen de handovers. Le délai de handover (D_{HO}) est défini comme le temps d'attente moyen entre deux accès successifs au spectre. Autrement, il est égal à la moyenne des délais engendrés entre l'instant de fin d'utilisation d'une bande et l'instant de l'accès suivant au spectre, comme le montre l'équation (4.8).

$$D_{HO} = \frac{1}{nb_{TCMs}} * \sum_{nb_{TCMs}} \left[\frac{1}{N_{all}} * \sum_{i=1}^{N_{all}} (T_A(B_{i+1}) - T_E(B_i)) \right] \quad (4.8)$$

Où $T_A(B_{i+1})$ est l'instant auquel la bande $(i+1)$ a été attribuée et $T_E(B_i)$ est le temps auquel la bande numéro i précédemment allouée est devenue libre. N_{all} est le nombre total d'allocations de spectre par un TCM et nb_{TCMs} est le nombre de TCMs présents dans le système.

- *Nombre moyen de messages échangés avant l'accès au spectre*

Afin de calculer le coût de communication, nous mesurons le nombre de messages échangés entre le TCM souhaitant le partage et les PUs intéressés, avant l'accès effectif au spectre. Théoriquement, le nombre de messages échangés (Nb_{Msg}) lors d'une demande de partage réussite (suite à une seule tentative³) est donné par l'équation (4.9). Le nombre de messages moyen échangés avant l'accès au spectre est égal à Nb_{Msg} multiplié par le nombre moyen de tentatives avant l'accès au spectre.

$$Nb_{Msg} = 1 + Nb_{RESP} + 2 * P_{NegoPrix} + 2 * P_{NegoDurée} + 1 \quad (4.9)$$

Où le premier message échangé représente le message *DEMANDE_BANDE*, Nb_{RESP} est le nombre de messages *REPONSE_BANDE* reçus de la part des PUs intéressés par la demande du TCM. $P_{NegoPrix}$ représente la probabilité d'avoir une négociation du prix qui est égale à 1 si la négociation de prix a eu lieu, sinon elle est égale à 0. De même, $P_{NegoDurée}$ est la probabilité d'avoir une négociation de la durée qui peut être égale à 0 ou 1.

Dans le cas où une négociation a lieu, sur le prix ou sur la durée, deux messages additionnels peuvent être échangés dans chaque cas (*NEGO_PRIX* et *REPONSE_NEGO_PRIX* pour la négociation du prix ; *NEGO_DUR* et *REPONSE_NEGO_DUR* pour la négociation de la durée). Le dernier message échangé est le message *PARTAGE* afin de confirmer le contrat établi entre le PU et le TCM pour le partage de la bande de spectre attribuée.

- *Le surcoût de la négociation en termes de messages*

Le coût de la négociation effectuée sera évalué en termes de messages échangés. Tout d'abord, nous avons mesuré le "surcoût global dû aux messages de négociation" qui représente le nombre moyen de messages échangés pour la négociation (menant à une réussite ou un échec), divisé par le nombre total de messages échangés lors de la procédure de partage de bande. Ensuite, nous avons mesuré le "surcoût des négociations réussies" qui représente le taux moyen de messages échangés pour une négociation réussie par rapport au nombre total de messages échangés.

Dans la section suivante, nous présenterons les résultats d'étude de performances de notre proposition.

4.7.3 Résultats

Tout d'abord, nous allons étudier l'effet de α et β sur le taux de succès de la négociation. Ensuite, nous allons fixer deux combinaisons extrêmes de α et β (la première reflète un taux de succès faible et la deuxième donnant un taux de succès élevé) afin de mesurer les différentes métriques décrites dans la sous-section précédente à savoir : le taux moyen d'utilisation du spectre, le taux moyen de blocage, le taux moyen de handover fréquentiel,

³ Une tentative représente une demande de bande. Le nombre moyen de tentative avant l'accès au spectre représente le nombre de demandes de bandes envoyées avant qu'il y ait accès effectif au spectre.

l'utilité des utilisateurs et le délai moyen de handover. Une partie de ces résultats a été validée dans [99] tandis que [151] a permis de valider la suite.

4.7.3.1 Taux moyen de réussite des négociations

Rappelons qu'une négociation aboutit à un succès lorsque le PU présélectionné accepte le nouveau prix ou la nouvelle durée proposée par le TCM. La figure 4.6 décrit le taux moyen de réussite des négociations en fonction de α et β en fixant le nombre de PU à 100 et le nombre de TCMs à 120.

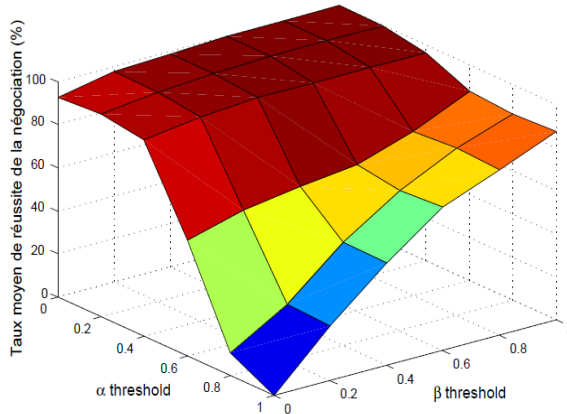


Figure 4.6 Taux moyen de succès des négociations en fonction de α et β

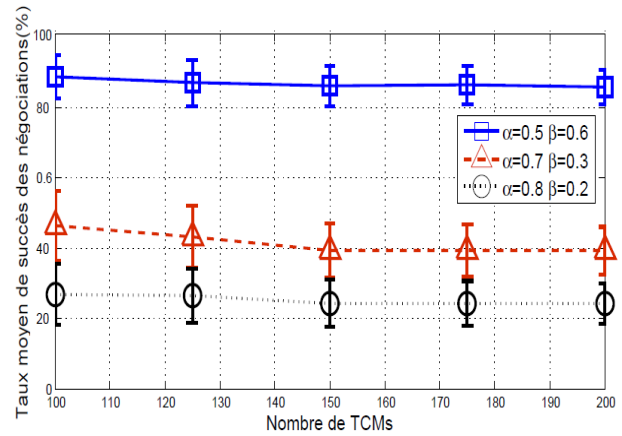


Figure 4.7 Taux moyen de succès des négociations en fonction du nombre de TCMs

Nous observons à travers la figure 4.6 que le taux de réussite des négociations dépend considérablement des seuils α et de β . En effet, plus α se rapproche de 0 et β de 1, plus le taux de réussite augmente.

Les résultats obtenus correspondent évidemment aux attentes. Effectivement, lorsque $\alpha=1$, le PU refuse toujours le nouveau prix puisqu'il est toujours inférieur au prix qu'il a initialement proposé ($P_{\text{New}} < \alpha * P_{\text{initial}}$) ce qui explique le faible taux de réussite des négociations. Respectivement, lorsque $\beta=0$, le PU refuse toujours la durée proposée par le TCM, et ainsi dans ce cas particulier le taux de succès obtenu est très faible. Inversement, si $\alpha=0$, le PU accepte n'importe quel prix proposé et si $\beta=1$, il accepte n'importe quelle durée proposée par le TCM à condition qu'elle ne dépasse pas le double de la durée qu'il a initialement proposée.

Il est important de souligner que le taux de réussite reste élevé même avec des valeurs intermédiaires de α et de β . Par ailleurs, nous remarquons que les meilleures performances de notre proposition s'obtiennent avec $\alpha \leq 0.5$ ou $\beta \geq 0.6$. Par conséquent, pour le reste des simulations nous choisissons les trois combinaisons suivantes de α et β :

1. $\alpha = 0.5$ et $\beta = 0.6$ donnant un taux de succès aux alentours de 85% avec un nombre maximal de 120 TCMs dans le système.
2. $\alpha = 0.7$ et $\beta = 0.3$ donnant un taux de succès de 43%.
3. $\alpha = 0.8$ et $\beta = 0.2$ donnant un taux de succès de 26%.

Afin de pouvoir se baser sur ces combinaisons dans la suite de nos études, il est important de vérifier l'impact de la variation du nombre de TCMs sur le taux de succès des

négociations. Nous présentons ainsi, à travers la figure 4.7, la variation de ce taux de succès en fonction du nombre de TCMs pour les trois combinaisons choisies de α et β .

Nous remarquons que le taux de succès des négociations décroît légèrement avec l'augmentation du nombre de TCMs étant donné qu'avec plus de TCMs, il y a moins de PUs proposant les ressources demandées et ainsi il y a moins de chance pour avoir un accord de partage suite à une négociation.

Dans la suite, nous étudierons l'effet de la variation du nombre de TCMs ainsi que des seuils α et β selon ces trois combinaisons ($\alpha = 0.5$ et $\beta = 0.6$), ($\alpha = 0.7$ et $\beta = 0.3$) et ($\alpha = 0.8$ et $\beta = 0.2$) sur le taux moyen d'utilisation du spectre, le taux moyen de blocage et l'utilité moyenne des utilisateurs.

4.7.3.2 Utilisation moyenne du spectre

Dans cette section, nous décrivons d'abord le taux moyen d'utilisation du spectre en fonction du temps pour 100 PUs et 120 TCMs et avec des valeurs aléatoires des seuils α et β , la durée de la simulation étant 600 secondes. Ensuite, nous mesurons le taux d'utilisation du spectre en fonction du nombre de TCMs pour les trois combinaisons de α et β précédemment choisies. Les figures 4.8 et 4.9 présentent, respectivement, la variation de l'utilisation moyenne du spectre en fonction du temps et en fonction du nombre de TCMs.

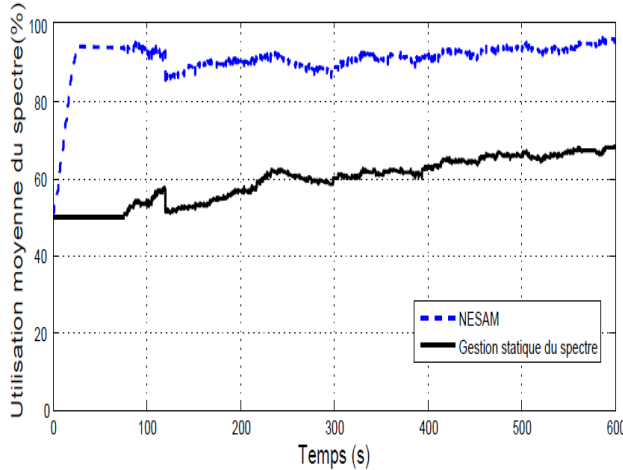


Figure 4.8 Taux moyen d'utilisation du spectre en fonction du temps

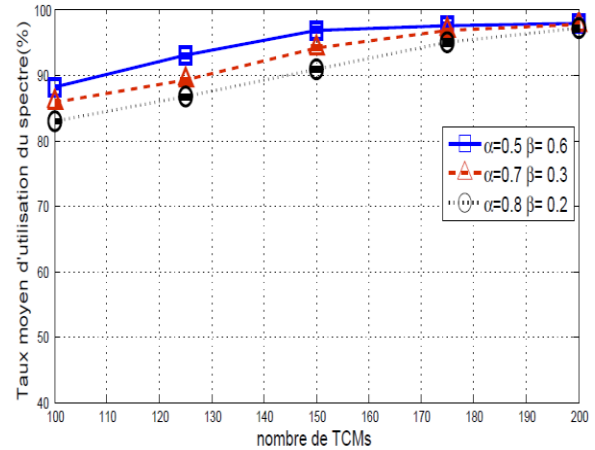


Figure 4.9 Taux moyen d'utilisation du spectre en fonction du nombre de TCMs

D'après la figure 4.8, nous observons que l'utilisation du spectre, grâce à notre proposition, s'accroît au cours du temps et s'élève à 98%. Par ailleurs, elle atteint un état stable après un temps transitoire relativement court qui correspond à l'arrivée de l'ensemble des TCMs. Ceci prouve que notre proposition assure une très bonne utilisation du spectre. La figure 4.8 montre également que notre proposition améliore considérablement l'exploitation du spectre grâce à la gestion dynamique en comparaison avec une gestion statique du spectre. En effet, à $t=0$, le taux d'utilisation du spectre correspond au pourcentage du spectre occupé par les PUs seulement avant l'application de *NESAM* dans le réseau. Avec une gestion statique du spectre, le taux d'utilisation au cours du temps reste faible par rapport à celui obtenu avec la gestion dynamique assurée par notre approche.

Afin de mieux évaluer le taux d'utilisation du spectre, nous avons mesuré sa variation en fonction du nombre de TCMs. La figure 4.9 expose l'effet de cette variation pour les trois combinaisons de α et β précédemment choisies. Le nombre de PUs est inchangé et égal à 100 et le nombre de TCMs varie entre 100 et 200. Cette figure montre que le taux d'utilisation du spectre reste très élevé avec les trois combinaisons de α et β , ce qui prouve que notre proposition assure toujours une exploitation très importante du spectre même avec des valeurs de α et β contraignantes pour la négociation (cas de $\alpha=0.8$ et $\beta=0.2$). Nous observons également que le taux d'utilisation du spectre augmente lorsque le nombre de TCMs augmente vu que la demande d'accès sera plus importante que les ressources disponibles et par conséquent la majorité des bandes libres seront allouées.

Les deux résultats présentés par les figures 4.8 et 4.9 prouvent l'apport significatif de *NESAM* en termes d'exploitation de ressources spectrales disponibles.

4.7.3.3 Taux moyen de blocage

La figure 4.10 décrit le taux moyen de blocage des TCMs lors de l'exécution d'un handover. Rappelons que le taux de blocage représente le pourcentage de requêtes qui n'ont pas abouti à une attribution du spectre. Intuitivement, le taux de blocage devrait augmenter lorsque le nombre de TCMs s'accroît et lorsque le taux de succès des négociations diminue ce qui est confirmé par les résultats de la figure 4.10.

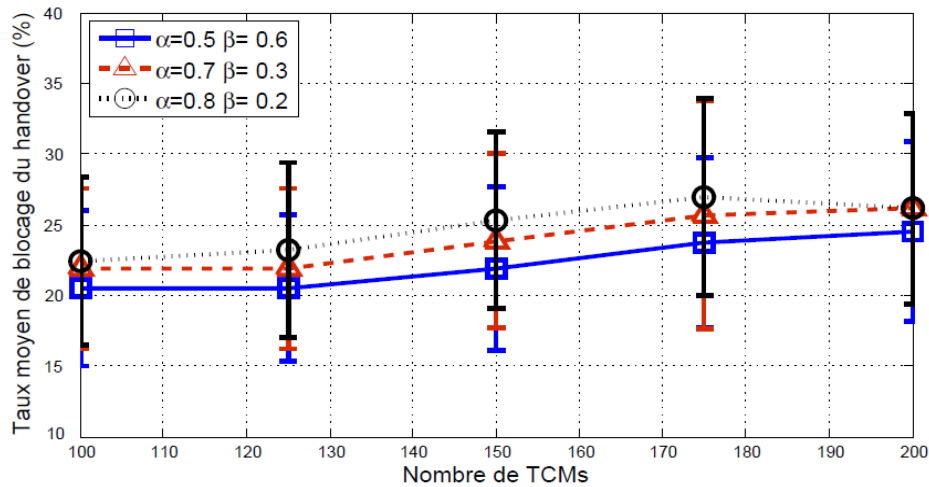


Figure 4.10 Taux moyen de blocage en fonction du nombre de TCM

Nous observons ainsi que le taux de blocage croît avec l'augmentation du nombre de TCMs, ce qui s'explique par la rareté des bandes disponibles lorsque le nombre de TCMs augmente. Le taux de blocage s'accroît également quand le taux de succès des négociations diminue (pour $\alpha=0.8$ et $\beta=0.2$). Ceci est expliqué par le fait que la probabilité qu'un TCM échoue lors de toutes ses négociations est plus élevée.

Les résultats donnés par la figure 4.10 montrent, néanmoins, que *NESAM* garantit un taux de blocage faible quel que soit le nombre de TCMs et quelles que soient les valeurs de α et β . Ainsi, *NESAM* permet clairement de minimiser les interruptions de service lors du handover.

4.7.3.4 Utilité moyenne des TCMs

La figure 4.11 montre l'utilité moyenne des TCMs calculée en utilisant l'équation (4.6). Cette figure prouve que notre approche permet d'assurer une bonne utilité pour les TCMs quel que soit leur nombre. En effet, le mécanisme de négociation que nous adoptons permet (1) de réduire le prix payé pour la durée allouée ou bien (2) de prolonger la durée d'utilisation du spectre pour le prix payé, lorsque le rapport prix par durée d'utilisation initialement proposé par le PU est élevé par rapport au PPS_{max} du TCM.

L'utilité des TCMs diminue faiblement lorsque le nombre de TCMs augmente et ceci s'explique par l'augmentation de la concurrence entre les demandeurs (TCMs) dans un système où les ressources disponibles sont inchangées. Concernant la variation par rapport aux seuils α et β , nous observons que l'utilité des TCMs augmente lorsque le taux de succès de la négociation augmente (exemple pour $\alpha=0.5$, $\beta=0.6$). Cependant, les résultats obtenus montrent aussi que l'utilité des TCMs reste élevée même avec un taux de succès relativement faible (le taux de succès des négociations n'est que 26% par exemple avec $\alpha=0.8$ et $\beta=0.2$).

Notre approche garantit ainsi une utilité élevée pour les utilisateurs à radio cognitive même avec un grand nombre de TCMs et même avec des seuils α et β contraignants pour la négociation. En outre, ces résultats montrent que NESAM permet de satisfaire les exigences des utilisateurs à radio cognitive.

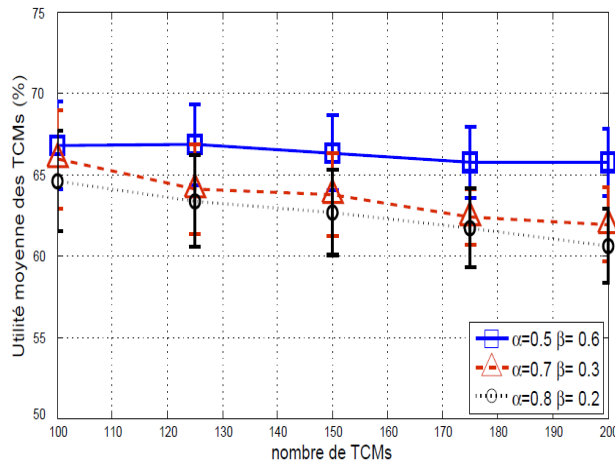


Figure 4.11 Utilité moyenne des TCMs

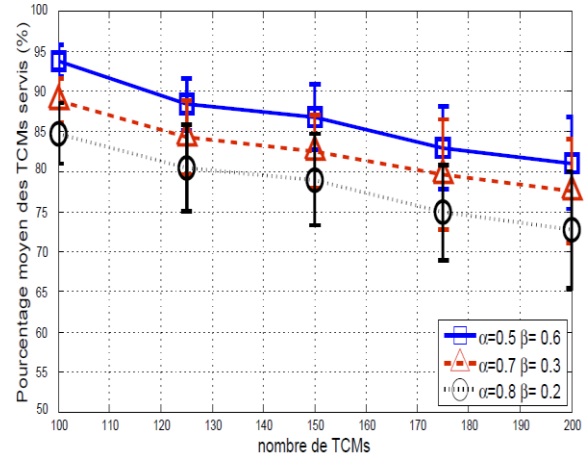


Figure 4.12 Pourcentage des TCMs servis

4.7.3.5 Pourcentage des TCMs servis

Dans la même perspective d'évaluation de la satisfaction des utilisateurs, nous avons mesuré le pourcentage des TCMs qui ont réussi à accéder au spectre, et dont le résultat est présenté sur la figure 4.12. D'après celle-ci, nous pouvons voir que le pourcentage des TCMs servis est très élevé surtout lorsque le nombre de TCMs est égal à 100 (ce qui correspond au nombre de PUs présents) où ce pourcentage atteint 95% avec $\alpha=0.5$ et $\beta=0.6$.

D'une façon générale, lorsque le nombre de TCMs augmente, le pourcentage des TCMs servis diminue puisque les bandes libres sont attribuées aux premiers TCMs arrivés. Étant donné que les PUs sont fixes, lorsque le nombre de TCMs devient très important par rapport aux ressources existantes, les bandes de spectre libres seront totalement allouées et certains

TCMs seront ainsi bloqués et non servis. Il est intéressant de signaler que le pourcentage de TCMs servis demeure important et supérieur à 70 % même lorsque le nombre de TCMs devient égal au double de celui des PUs (200 TCMs VS 100 PUs).

Par ailleurs, le pourcentage des TCMs servis dépend également des valeurs de α et β . En effet, plus le pourcentage de succès de la négociation est élevé (exemple avec $\alpha=0.5$ et $\beta=0.6$), plus le pourcentage de TCMs servis est important.

4.7.3.6 Utilité moyenne des PUs

Afin d'évaluer le degré de satisfaction des PUs, nous avons d'abord mesuré leur utilité moyenne (équation (4.7)) puis le pourcentage des PUs qui ont pu allouer leurs bandes libres en fonction du nombre de TCMs et en fonction des seuils α et β , comme le présentent respectivement les figures 4.13 et 4.14.

La figure 4.13 montre que notre approche assure une bonne utilité pour les PUs, qui ne dépend pas du nombre de TCMs mais seulement des seuils α et β . En effet, l'utilité des PUs est plus importante avec des valeurs de α et β contraignantes pour la négociation (cas où $\alpha=0.8$ et $\beta=0.2$), ce qui permet aux PUs d'allouer leurs bandes avec des prix par secondes plus élevés. Par conséquent, l'utilité des PUs et l'utilité des TCMs varient de façon inverse par rapport aux seuils α et β puisque les valeurs plus favorables pour les TCMs (c.-à-d. résultant en un taux élevé de succès des négociations) sont moins intéressantes pour les PUs en termes de gain.

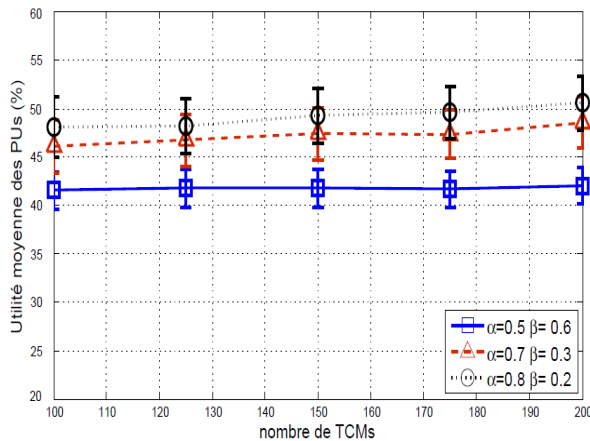


Figure 4.13 Utilité moyenne des PUs

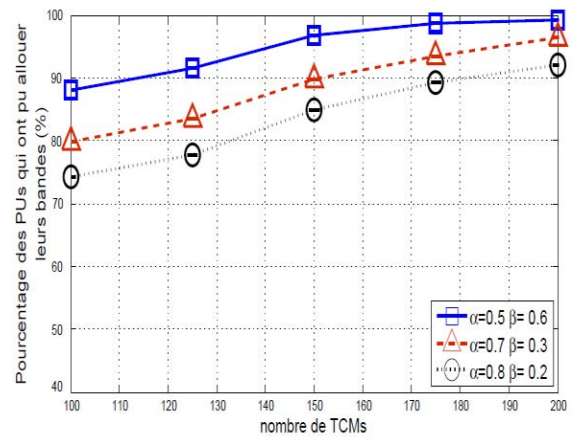


Figure 4.14 Pourcentage de PUs qui ont pu allouer leurs bandes

4.7.3.7 Pourcentage des PUs qui ont pu allouer leurs bandes

La figure 4.14 décrit le pourcentage des PUs qui ont réussi à partager leurs bandes de spectre inutilisées.

Nous remarquons que notre approche assure une exploitation très importante des bandes libres mises à disposition par les PUs. Sur la figure 4.14, le pourcentage des PUs qui ont alloué leurs bandes atteint quasiment 100% avec un grand nombre de TCMs et avec des valeurs de α et β donnant un taux élevé de succès de la négociation (pour $\alpha=0.5$ et $\beta=0.6$). D'une façon générale, ce pourcentage dépend du nombre de TCMs et des valeurs de α et β ; plus le nombre de TCMs augmente plus le nombre des PUs qui parviennent à allouer leurs bandes augmente vu que la demande dépasse les ressources disponibles lorsque le nombre de TCMs est élevé. Il

est plus important également avec des valeurs de α et β permettant d'avoir un taux de succès de négociation élevé, puisque la probabilité que les PUs refusent les offres des TCMs diminue.

4.7.3.8 Nombre de messages échangés avant l'accès au spectre

Le coût de communication en termes de messages échangés, en fonction du nombre de TCMs et en fonction de α et β , est présenté sur la figure 4.15. Afin de mieux valider les valeurs de simulation, nous les avons comparées avec les résultats théoriques qu'on peut obtenir à l'aide de l'équation (4.9) définie dans la section 4.7.2. Rappelons que le nombre de messages moyen échangés avant l'accès au spectre est égal à Nb_{Msg} multiplié par le nombre moyen de tentatives avant l'accès au spectre où Nb_{Msg} est défini comme suit :

$$Nb_{Msg} = 1 + Nb_{RESP} + 2 * P_{NegoPrix} + 2 * P_{NegoDurée} + 1 \quad (4.9)$$

L'équation (4.9) peut être simplifiée ainsi :

$$Nb_{Msg} = [2 + Nb_{RESP} + 2 * (P_{NegoPrix} + P_{NegoDurée})]$$

$P_{NegoPrix}$ est égal à 1 ou 0. De même, $P_{NegoDurée}$ est égal à 0 ou 1. Donc, $2 * (P_{NegoPrix} + P_{NegoDurée})$ peut être égal à 0, 2 ou 4. Ainsi, le nombre de messages échangés avant l'accès au spectre (Nb_{MsgEch}), donné par l'équation (4.10), appartient théoriquement à l'intervalle suivant : $[(2 + Nb_{RESP}) * Nb_{Tentative}, (6 + Nb_{RESP}) * Nb_{Tentative}]$.

$$Nb_{MsgEch} = Nb_{Msg} * Nb_{Tentative} \quad (4.10)$$

Où $Nb_{Tentative}$ représente le nombre de demandes de bande avant l'accès au spectre.

La valeur approximative du nombre de messages échangés avant l'accès au spectre peut être également calculée comme suit :

$$Valeur\ approximative = [2 + Nb_{RESP} + (P_{négociation} * 2)] * Nb_{Tentative}$$

L'équation contient ainsi trois inconnues qui sont Nb_{RESP} , $P_{négociation}$ et $Nb_{Tentative}$ que nous avons mesurées à travers les simulations sachant que $P_{négociation}$ est la probabilité qu'une négociation entre le TCM et le PU soit établie. Nous présentons un exemple de résultats de simulations, pour 150 TCMs, dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4 Exemple de résultats pour 150 TCMs

	Nb_{RESP}	$Nb_{Tentative}$	Intervalle théorique du Nb_{MsgEch}	$P_{négociation}$	Valeur approximative
$\alpha=0.5, \beta=0.6$	10.9142	1	[13, 17]	0.7967	~14,6
$\alpha=0.7, \beta=0.3$	12.8405	1.9	[28, 36]	0.7649	~ 31,1
$\alpha=0.8, \beta=0.2$	14.9611	2.09	[35, 44]	0.6417	~ 37,5

D'après le tableau 4.4, le nombre de messages échangés avant l'accès au spectre appartient à l'intervalle [13, 17] pour ($\alpha=0.5$, $\beta=0.6$). Par ailleurs, d'après la figure 4.15, le nombre de messages échangés pour 150 TCMs est égal à 15. Ceci prouve la conformité avec les résultats théoriques du tableau 4.4. Il en est de même pour les autres combinaisons de α et β .

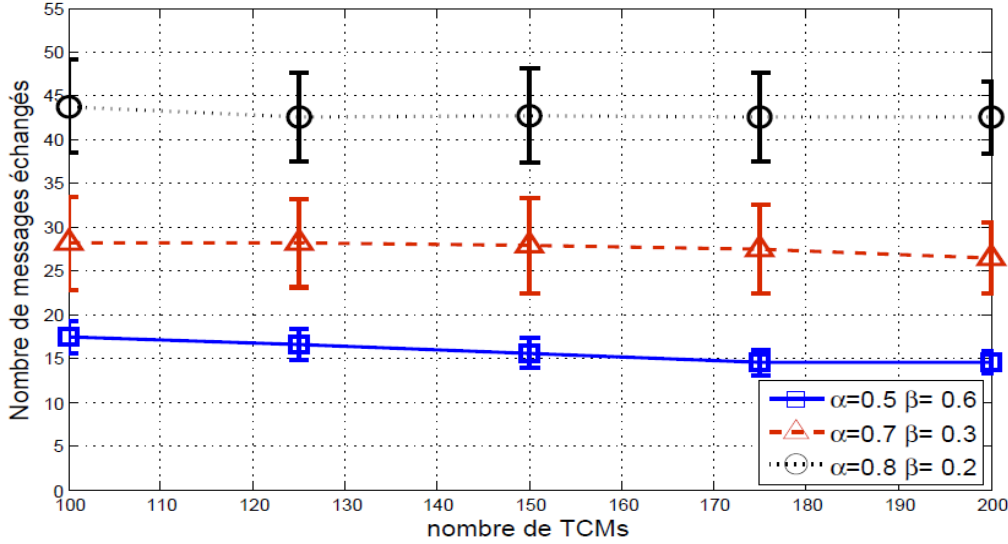


Figure 4.15 Nombre moyen de messages échangés avant l'accès au spectre

D'après la figure 4.15, nous remarquons que le nombre de messages échangés est fortement dépendant des seuils α et β . En effet, plus les PUs sont exigeants (les valeurs de α et β sont contraignantes pour la négociation), plus le nombre de messages échangés augmente. Par ailleurs, lorsque le taux de succès des négociations diminue (exemple pour $\alpha=0.8$, $\beta=0.2$), les TCMs seront amenés à relancer leurs demandes de bandes plusieurs fois, ainsi le nombre de tentatives avant l'accès au spectre augmente et par conséquent le nombre de messages échangés augmente de façon remarquable. Il est important de noter que notre approche entraîne un échange de messages acceptable, qui ne surcharge pas le trafic.

Dans la section suivante, nous évaluerons le surcoût des messages relatifs à la négociation afin de mesurer l'effet du mécanisme de négociation sur le coût de la communication et sur la charge du trafic dans le réseau.

4.7.3.9 Surcoût de la négociation

Rappelons que nous définissons deux métriques pour le calcul du surcoût de la négociation : (1) "le surcoût global dû aux messages de négociation", noté S_g et (2) "le surcoût des négociations réussies", noté S_s .

S_g représente le nombre moyen de messages échangés pour la négociation qui aboutit à une réussite ($NbR_{MsgNego}$) ou un échec ($NbE_{MsgNego}$), divisé par le nombre total de messages échangés lors de la procédure de partage de bande ($Nb_{MsgTotal}$), comme le décrit l'équation (4.11):

$$S_g = \frac{NbR_{MsgNego} + NbE_{MsgNego}}{Nb_{MsgTotal}} \quad (4.11)$$

Quant 'au "surcoût des négociations réussies", noté S_s , il représente le taux moyen de messages échangés pour une négociation réussie par rapport au nombre total de messages échangés comme l'exprime l'équation (4.12).

$$S_s = \frac{NbR_{MsgNego}}{Nb_{MsgTotal}} \quad (4.12)$$

Les figures 4.16 et 4.17 montrent la variation des ces deux surcoûts S_g et S_s en fonction du nombre de TCMs et de certaines valeurs de α et β .

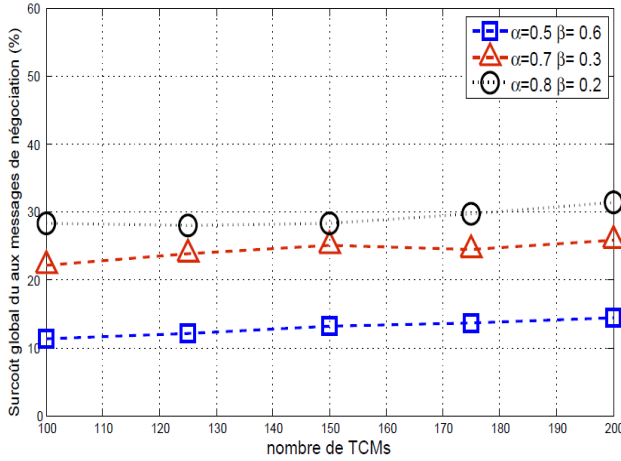


Figure 4.16 Surcoût global de la négociation

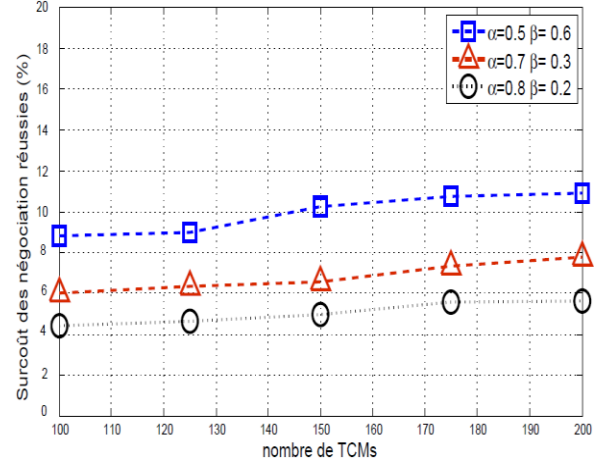


Figure 4.17 Surcoût des négociations réussies

Nous remarquons, d'après les figures 4.16 et 4.17 que le surcoût de négociation en termes de nombre de messages est faible dans les deux mesures essentiellement dans le cas des négociations réussies où le pourcentage des messages dûs aux négociations ne dépasse pas 12%. Ceci montre que la négociation n'alourdit pas la communication ni le trafic du réseau.

Par ailleurs, le nombre de TCMs n'a pas d'influence remarquable sur la variation des surcoûts de la négociation alors que les seuils α et β l'impactent considérablement. En effet, lorsque les PUs sont exigeants et maintiennent des valeurs de α et β contraignantes pour la négociation (comme $\alpha=0.8$ et $\beta=0.2$), les TCMs auront beaucoup de refus, ce qui les amène à réinitialiser leurs demandes de bandes et établir de nouvelles négociations avec d'autres PUs. Ainsi, le nombre de messages échangés augmente et par la suite le surcoût global dû aux messages de négociation augmente. Par contre, plus les PUs sont tolérants (α et β donnant un taux de succès de négociation élevé), plus le surcoût global de négociation diminue. Effectivement, d'après l'équation (4.10), le numérateur diminue, donc le rapport diminue ce qui fait que le nombre de messages échangés dûs à des négociations échouées diminue.

Cependant, la variation du surcoût de succès de négociation par rapport à α et β est inverse à celle du surcoût global. Ainsi, lorsque α et β sont contraignantes pour la négociation (comme $\alpha=0.8$ et $\beta=0.2$), on obtient moins de messages dûs à des négociations réussies et ainsi le numérateur de l'équation (4.11) diminue, et par conséquent le rapport présentant le surcoût de succès de négociation diminue.

Il reste à évaluer les performances du handover par l'étude du taux moyen de handover spectral et le délai du handover. Étant donné que α et β n'ont pas d'influence sur ces deux métriques, nous présenterons, dans la section suivante, les résultats de *NESAM* en termes de handover fréquentiel et de délai de handover en comparaison avec ceux de l'approche coopérative.

4.7.4 Comparaison de *NESAM* avec l'approche coopérative

Dans cette section, il est question de comparer les performances de *NESAM* avec l'approche coopérative qui n'utilise pas de mécanisme de négociation et ne considère pas le paramètre de fréquence lors du choix de la bande de spectre adéquate. L'approche coopérative suit le fonctionnement suivant:

Lorsque le TCM a besoin de spectre, il demande aux PUs leurs disponibilités et choisit le PU qui propose la bande passante requise avec le prix par seconde le plus faible sans négociation et sans avoir privilège le PU_{sf} .

Dans ce qui suit, nous étudierons l'effet de notre contribution sur les performances du handover et sur l'allocation du spectre en considérant que α et β sont aléatoires pour les PUs (varient entre 0 et 1) et que le nombre de TCMs varie entre 100 et 200.

4.7.4.1 Taux moyen de handover fréquentiel

Rappelons que le taux moyen de handover fréquentiel ou spectral, donné par la figure 4.18, représente le pourcentage de handovers réalisés par les TCMs avec changement de fréquence (handovers spectraux) par rapport au nombre total de handovers (avec et sans changement de fréquence).

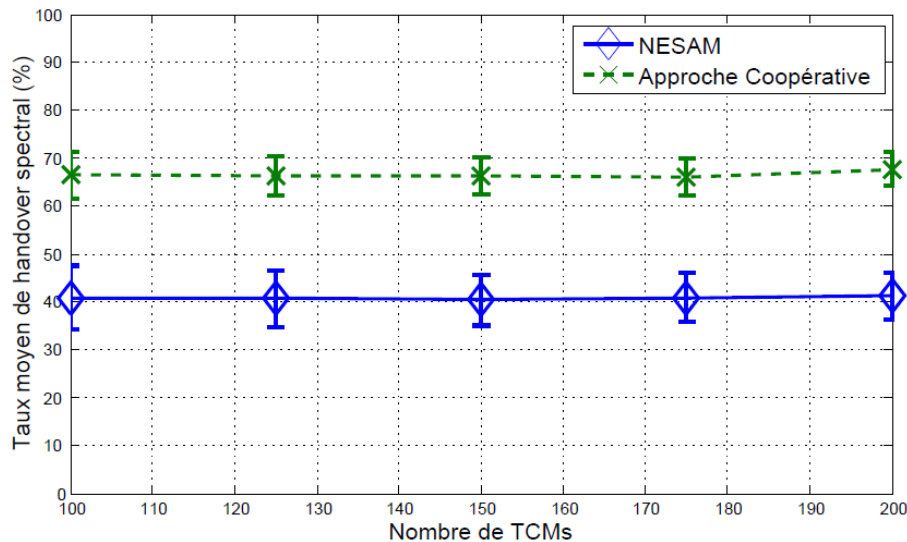


Figure 4.18 Taux moyen de handover fréquentiel

La figure 4.18 montre que *NESAM* permet de diminuer, pratiquement de 30%, le taux de handovers fréquents lorsque le TCM change de réseau. Ce résultat est très important confirmant que notre approche améliore les performances du handover et permet de préserver la continuité de service pendant la mobilité des nœuds à radio cognitive.

4.7.4.2 Délai moyen de handover

Une deuxième métrique très importante dans l'évaluation des performances du handover est le délai de handover. Rappelons qu'on a défini ce délai comme étant le temps d'attente moyen entre la fin d'un accès au spectre et le début de l'accès suivant (voir l'équation (4.8)). La figure 4.19 présente le délai de handover en fonction du nombre de TCMs dans le cas de *NESAM* ainsi que dans le cas de l'approche coopérative.

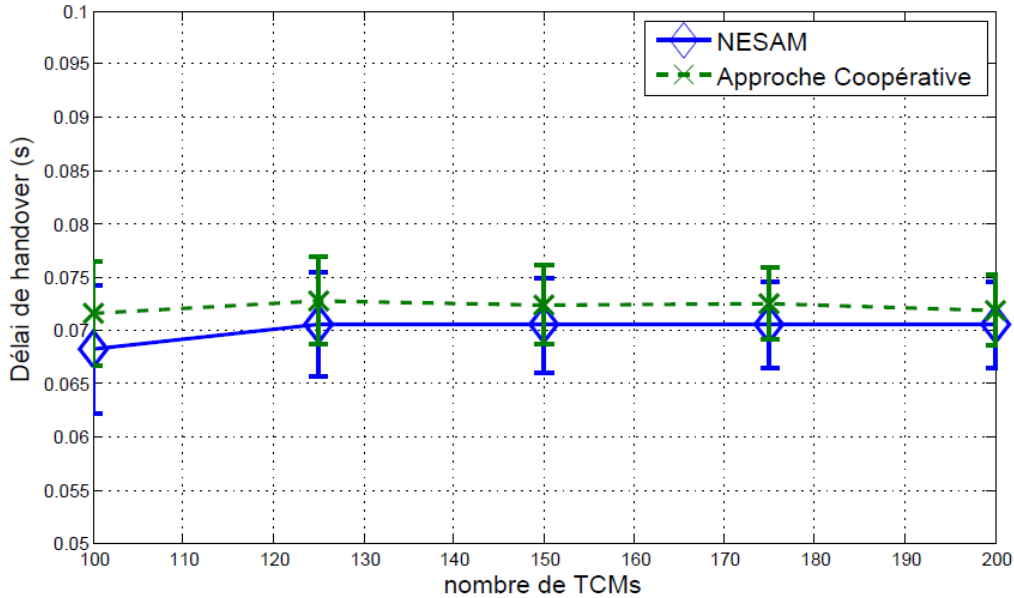


Figure 4.19 Délai moyen de handover

D'après la figure 4.19, nous observons qu'au début, le délai moyen de handover s'accroît légèrement lorsque le nombre de TCMs augmente puis reste stable et faible. Ceci est dû au temps de libération des canaux qui est plus important avec un grand nombre de TCMs puisqu'il y a plus d'allocations de spectre. En termes de comparaison, notre approche garantit un délai moyen de handover plus faible que celui produit par l'approche coopérative.

Il est important de signaler que *NESAM* assure un délai de handover très faible qui ne dépasse pas 0.08 s, ce qui confirme que notre approche minimise le temps d'interruption et garantit un transfert très rapide assurant de bonnes performances dans un réseau mobile.

4.7.4.3 Autres comparaisons

Dans ces dernières simulations, nous comparons *NESAM* avec l'approche coopérative en termes d'utilisation moyenne du spectre, de taux moyen de blocage, d'utilité des utilisateurs, de durée moyenne attribuée et de nombre moyen de messages échangés. Les figures 4.20 jusqu'à 4.25 représentent les résultats de ces comparaisons sachant que α et β sont toujours aléatoires et différent d'un PU à un autre.

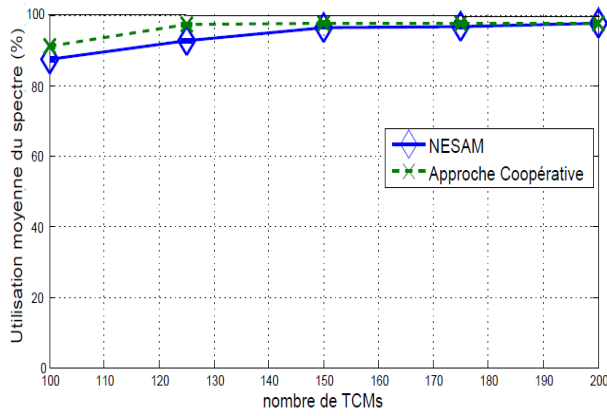


Figure 4.20 Comparaison en termes d'utilisation du spectre

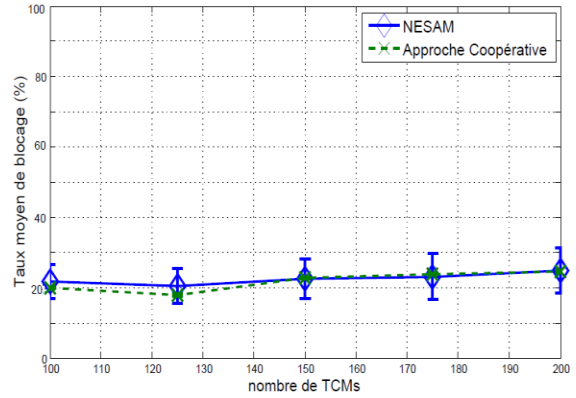


Figure 4.21 Comparaison en termes de taux moyen de blocage

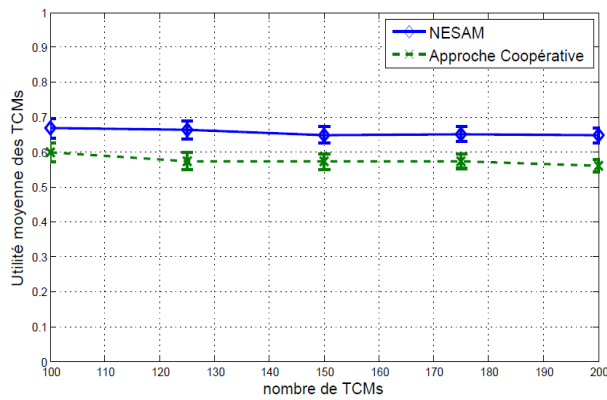


Figure 4.22 Comparaison en termes d'utilité des TCMs

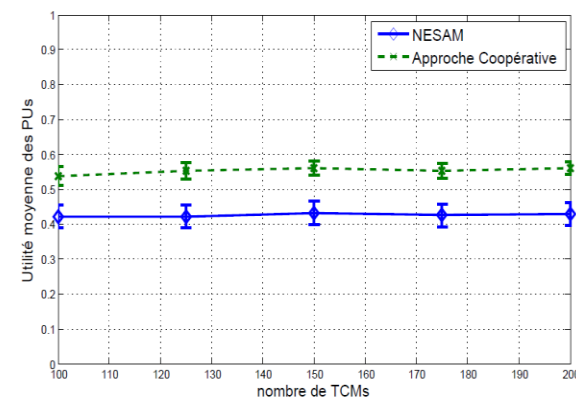


Figure 4.23 Comparaison en termes d'utilité des PUs

Les figures 4.20 et 4.21 montrent que *NESAM* assure une exploitation importante du spectre quasiment égale à celle offerte par l'approche coopérative ainsi qu'un taux de blocage faible qui est pratiquement le même pour les deux approches. Il est clair que l'approche coopérative permet d'obtenir la meilleure utilisation du spectre et le taux de blocage le plus faible puisque le TCM accepte n'importe quel prix pour n'importe quelle durée d'utilisation, sans aucune négociation. Ceci prouve l'intérêt et l'efficacité de notre proposition puisqu'elle ne pénalise pas l'utilisation du spectre et garantit un taux de blocage faible bien qu'elle intègre un mécanisme de négociation et prend en considération la fréquence courante.

De plus, la figure 4.22 montre que *NESAM* assure une utilité pour les TCMs nettement plus intéressante que celle obtenue avec l'approche coopérative puisque les TCMs peuvent négocier les prix et les durées d'utilisation des bandes spectrales libres, ce qui confirme l'apport de notre proposition. Par ailleurs et par analogie, il est tout à fait logique d'obtenir sur la figure 4.23 une utilité des PUs plus importante dans le cas de l'approche coopérative car la négociation favorise les TCMs en termes de gain.

D'autre part, *NESAM* permet de garantir une durée d'utilisation du spectre plus importante par rapport à l'approche coopérative grâce au mécanisme de négociation, comme le prouve la figure 4.24.

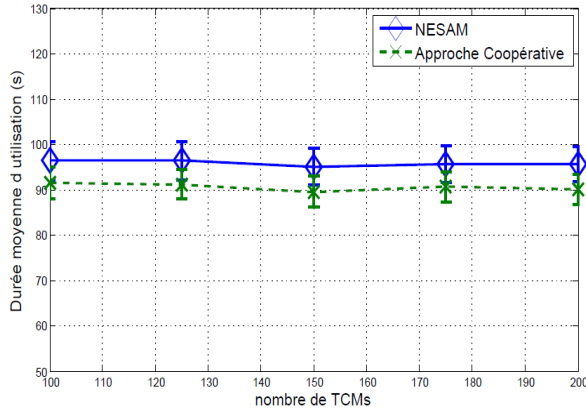


Figure 4.24 Comparaison en termes de durée d'accès

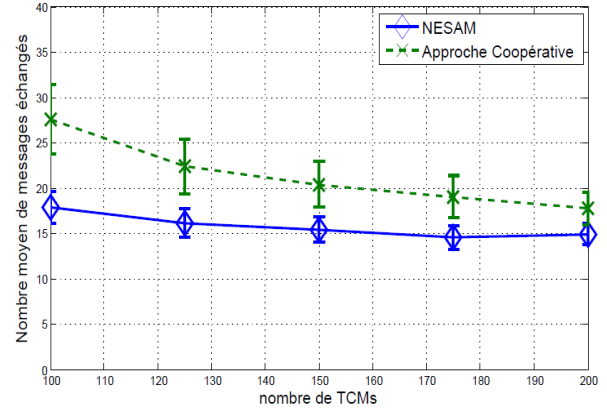


Figure 4.25 Comparaison en termes de messages échangés

En termes du coût de communication, nous pouvons remarquer sur la figure 4.25 que *NESAM* engendre beaucoup moins de messages par rapport à l'approche coopérative malgré les messages additionnels dus à la négociation, ce qui confirme l'efficacité de notre proposition.

Pour résumer, *NESAM* assure une utilisation importante du spectre et un blocage faible tout comme l'approche coopérative. En plus, notre approche garantit une utilité meilleure pour les TCMs, elle permet de diminuer le nombre de handovers spectraux et de minimiser le délai moyen de handover, tout en assurant un faible coût de communication en termes de messages échangés, ce qui prouve l'apport significatif de *NESAM*.

Dans cette approche, nous avons considéré des utilisateurs à radio cognitive qui ont des exigences sur la fréquence, le prix et la durée (exigence par rapport au prix par seconde). Dans un travail similaire, nous avons étudié le cas des utilisateurs ayant des exigences sur la fréquence et le prix seulement sans considération sur la durée. Nous avons ainsi défini une deuxième variante des algorithmes de sélection et de négociation dédiée à ce deuxième type d'utilisateurs moins exigeants. Cette alternative est détaillée dans l'annexe B sachant que les résultats d'évaluation des performances ont été publiés dans [100]. Nous avons également comparé les deux variantes dans une de nos publications [161].

4.8 Conclusion

Nous avons présenté tout au long de ce chapitre notre proposition *NESAM* pour la gestion du spectre et de la mobilité des terminaux à radio cognitive, en détaillant le processus de sélection du canal adéquat lors du handover ainsi que le mécanisme de négociation adopté. Ensuite, nous avons évalué, par simulation, les performances de notre proposition notamment en la comparant à une approche coopérative qui n'intègre ni la négociation ni la prise en considération de la fréquence.

Nous avons montré que *NESAM* permet d'améliorer l'utilisation globale du spectre qui peut atteindre 98%. Nous avons également prouvé que notre approche permet d'améliorer les performances du handover. En effet, elle garantit, d'une part, un taux de blocage faible minimisant l'interruption de service lors de la mobilité des nœuds. D'autre part, elle réduit le nombre de handovers fréquents ce qui permet de supprimer les délais supplémentaires de changement de spectre pendant le handover. En plus, notre proposition assure un délai d'attente moyen très faible pour l'accès au spectre. Enfin, grâce à la négociation, notre proposition garantit un degré de satisfaction élevé pour les utilisateurs du réseau.

Dans le chapitre suivant, nous proposons une deuxième solution pour la gestion du spectre pour les terminaux mobiles à radio cognitive qui utilise les enchères multi-agents et l'apprentissage. Elle sera évaluée et comparée avec notre première approche *NESAM*.

CHAPITRE 5

5 LASMA : Gestion dynamique du spectre en utilisant l'enchère multi-agents et l'apprentissage

Sommaire

5.1	Introduction	75
5.2	Contexte et architecture	75
5.3	Description de l'algorithme général et du diagramme de séquences.....	77
5.4	Comportement détaillé du PU	78
5.5	Comportement détaillé du TCM	79
5.6	Exemple illustratif	80
5.7	Types d'allocation de spectre	81
5.7.1	Allocation uni-bande	81
5.7.2	Allocation multi-bandes.....	81
5.8	Prise en considération de la fréquence	82
5.9	Algorithme d'apprentissage	83
5.10	Evaluation des performances de l'approche LASMA	85
5.10.1	Paramètres de simulation	85
5.10.2	Métriques.....	85
5.10.3	Résultats de comparaison des deux types d'allocation	88
5.10.4	Résultats de comparaison avec l'enchère classique	90
5.11	Comparaison de NESAM avec LASMA.....	98
5.12	Conclusion.....	101

5.1 Introduction

Les enchères représentent un concept très utilisé pour la gestion du spectre dans les réseaux à radio cognitive. Contrairement à la plupart des travaux de recherche, qui se focalisent essentiellement sur des études théoriques basées sur des outils mathématiques (voir section 2.5.2), nous proposons dans ce travail une implémentation réaliste des enchères avec un algorithme d'apprentissage multi-agents permettant d'améliorer les performances globales du système.

Dans ce chapitre, nous présenterons donc notre deuxième proposition *LASMA* (*Learning based Auction approach for Spectrum Mobility and Assignment*) basée sur les enchères et l'apprentissage pour la gestion du spectre et de la mobilité des terminaux à radio cognitive. D'abord, nous décrirons le contexte et la solution proposée ainsi que ses différents algorithmes illustrés par des exemples explicatifs. Ensuite, nous évaluerons par simulation les performances de l'approche proposée et nous la comparerons avec notre première proposition *NESAM*.

5.2 Contexte et architecture

Nous considérons un réseau ad-hoc mobile avec un ensemble d'utilisateurs primaires et secondaires en supposant que les SUs sont des terminaux mobiles à radio cognitive (TCMs) alors que les PUs sont des terminaux fixes. Chaque PU fonctionne dans une bande de fréquences et peut libérer de temps en temps certaines sous-bandes lorsqu'il n'en aura plus besoin. Ainsi, les TCMs essaient d'accéder à ces bandes inutilisées sans pour autant interférer avec les PUs présents. La mobilité des TCMs peut engendrer une dégradation de la qualité de service reçue, ce qui les oblige à changer de bandes de fréquences. Le défi, dans ce scénario, consiste à permettre aux TCMs de sélectionner le canal cible adéquat lors du handover spectral et de se déplacer d'une zone vers une autre de façon transparente et rapide, sans provoquer d'interruption de service ni d'interférence avec les PUs. Il est nécessaire, en même temps, d'aboutir à un accord entre les TCMs et les PUs pour l'accès au spectre en tenant compte des préférences et des exigences des deux utilisateurs.

Dans notre proposition, les deux processus d'allocation et de handover spectral sont modélisés par des enchères entre les PUs et les TCMs présents dans la même zone. Chaque PU, considéré comme le commissaire-priseur, ayant des sous-bandes libres commence une vente aux enchères. Quant aux SUs, chacun d'entre eux joue le rôle de soumissionnaire (appelé aussi enchérisseur) et fait des offres jusqu'à ce qu'il soit déclaré gagnant de l'une des enchères.

Plusieurs types d'enchères existent dans la littérature et diffèrent principalement par le type de l'offre (cachée ou publique) et par le type d'enchérissement qui peut être en un seul tour, ascendant ou descendant (voir section 2.2.4). Les enchères à enveloppe cachée, comme l'enchère au premier prix (ou *FPSB: First Price Sealed Bid*), sont très appropriées à des systèmes nécessitant une exécution dans un temps déterminé et avec un coût de signalisation acceptable en comparaison avec les enchères séquentielles telles que l'enchère anglaise [108, 154]. Pour ces raisons, nous optons, dans notre proposition, pour l'enchère *FPSB* entre un PU et un ensemble de TCMs intéressés, comme le montre la figure 5.1.

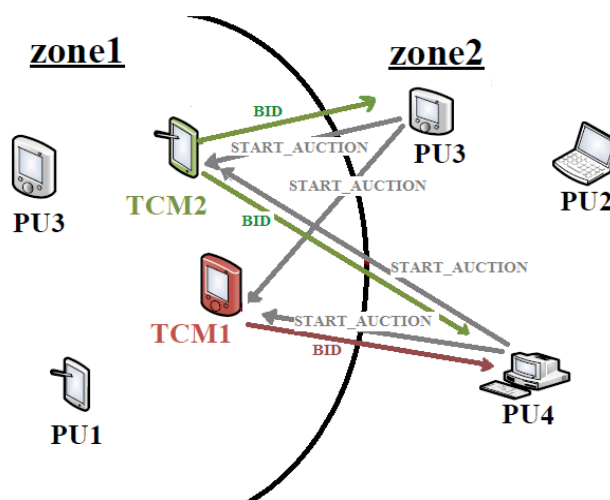


Figure 5.1 Enchère FPSB

Nous observons sur la figure 5.1 un exemple de deux PUs qui déclenchent simultanément deux enchères de type FPSB. Les TCMs intéressés (TCM₁ et TCM₂) proposent ainsi leurs offres sous forme de plis scellés envoyés chacun des deux PUs. L'offre la plus élevée gagne l'enchère et le TCM correspondant paie le prix qu'il a soumis. Pour des raisons de clarté, nous avons présenté, dans la figure 5.1 une partie des messages échangés, le reste sera détaillé dans le diagramme de séquences de la figure 5.3.

D'un point de vue architectural, *LASMA* est conçu au niveau de la couche application où nous intégrons, en plus de la tâche "*Partage du spectre*", un processus de "*Décision du handover*" pour la sélection du canal cible, et un algorithme d'*Apprentissage* pour l'amélioration de la qualité d'enchérissement. Nous utilisons la norme *IEEE 802.11* pour les couches physique et MAC, et nous considérons le protocole IP (Internet Protocol) au niveau de la couche réseau. La figure 5.2 montre l'architecture de *LASMA* qui est la même pour NESAM également sauf qu'il n'y a pas d'apprentissage au niveau de la couche physique et le partage de spectre ainsi que la décision de handover se font par la négociation. Il est important de noter que notre approche peut être appliquée dans tout système actuel ou futur, équipé par la technologie radio cognitive tels que les normes *IEEE 802.22* et *IEEE 802.11af* [162].

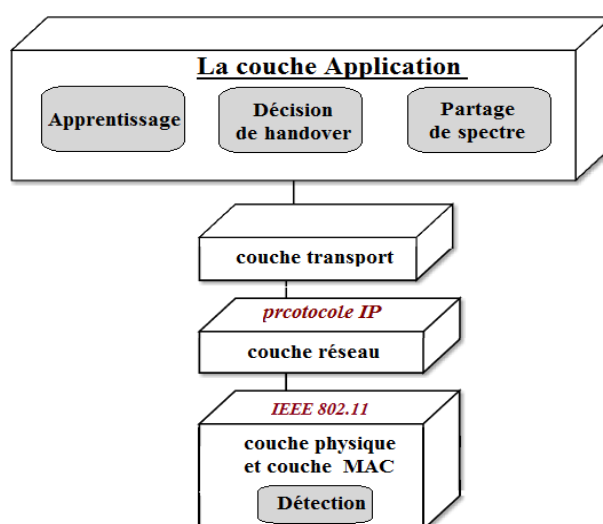


Figure 5.2 Architecture de LASMA

5.3 Description de l'algorithme général et du diagramme de séquences

Initialement, chaque PU annonce une vente aux enchères lorsqu'il libère une partie du spectre et diffuse un message "*CFA*" (*Call For Auction participation*) contenant la bande de fréquences licenciée ($Freq(PU)$) et le nombre de sous-bandes libérées ($S_{libre}(PU)$). Par ailleurs, un TCM a besoin de changer de spectre dans deux cas: (1) en arrivant à proximité d'une nouvelle zone où on assiste à une dégradation de la qualité du signal reçu; (2) lorsque la durée d'utilisation qui lui a été attribuée expire. Cependant, comme chaque TCM a ses propres exigences en termes de bande passante, il ne participera alors qu'aux vente aux enchères initiées par des PUs dont la quantité de sous-bandes libres couvre ses besoins en ressources spectrales (notés $S_{demandé}(TCM)$). Chaque TCM participant envoie un message "*BID*" contenant son offre sous forme de prix par seconde (PPS_{bid}) relatif à l'allocation d'une sous-bande.

Le PU commissaire-priseur choisit parmi les offres reçues celle qui présente le prix par seconde le plus élevé et envoie au vainqueur, noté TCM_W , un message "*WINNER*" contenant la durée ($D(PU)$) durant laquelle les sous-bandes lui sont allouées.

Le PU attend un accusé de réception positif (*ACK (OK)*) de la part du TCM_W pour pouvoir commencer le partage. En contre partie, le TCM accède à la bande de spectre du premier PU qui le déclare comme gagnant de l'enchère. Si le TCM reçoit, ultérieurement, d'autres messages '*WINNER*' de la part d'autres PUs alors qu'il est déjà en train d'utiliser une bande de spectre allouée par un PU donné, il leur envoie des accusés de réception négatifs (*ACK (NO)*) pour indiquer qu'il a déjà remporté une enchère. A la réception d'un *ACK(NO)*, le PU réinitialise le processus d'appel d'offres afin de choisir un autre gagnant.

L'échange de messages établi entre un PU (le commissaire-priseur) et un TCM (un SU enchérisseur) est représenté de façon simplifiée dans le diagramme de séquences donnée par la figure 5.3.

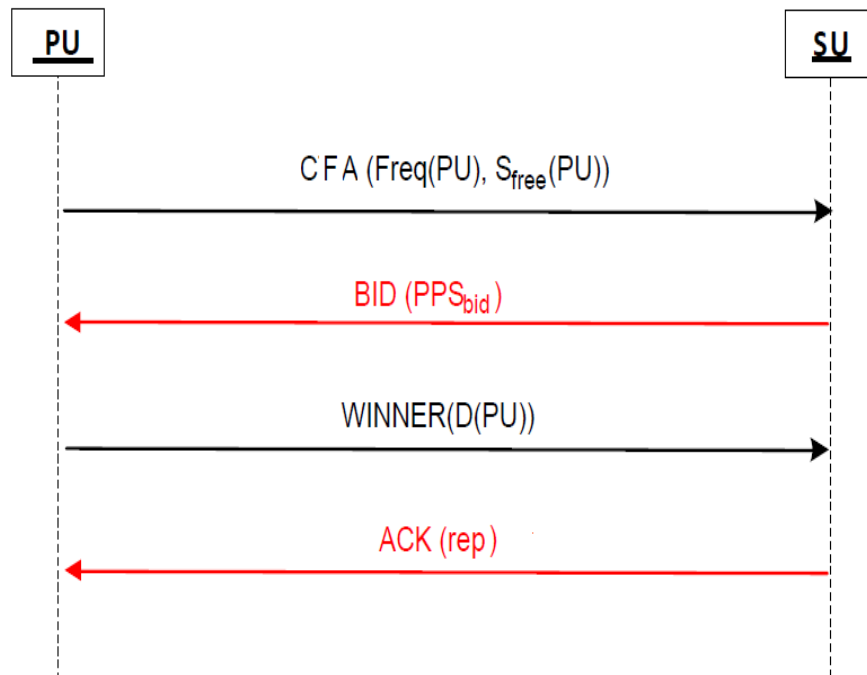


Figure 5.3 Diagramme de séquences de *LASMA*

5.4 Comportement détaillé du PU

L'algorithme décrivant le comportement du PU est donné en annexe D et son diagramme d'état est représenté sur la figure 5.4.

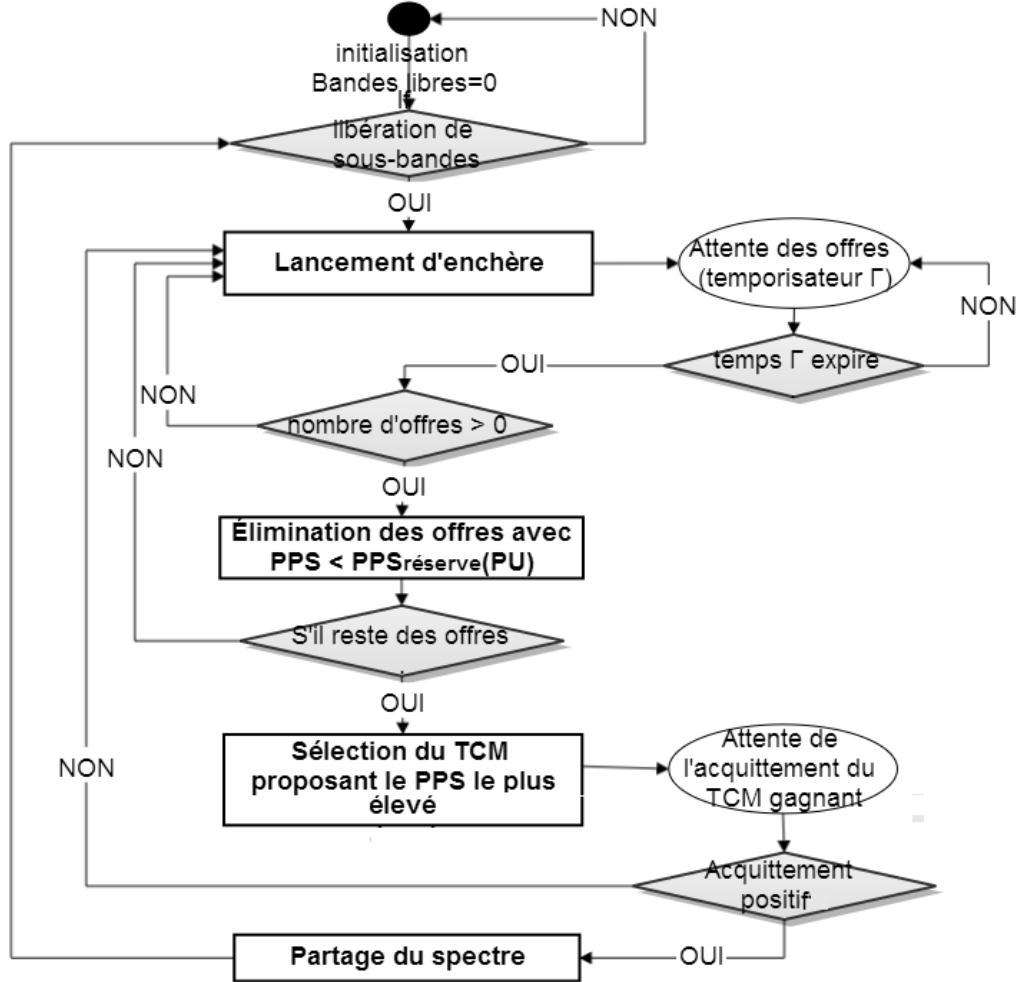


Figure 5.4 Comportement détaillé du PU

Chaque PU a un prix par seconde minimal qu'il peut accepter pour l'allocation d'une sous-bande, noté $PPS_{réserve}$, et est donné par l'équation (5.1).

$$PPS_{réserve}(PU_i) = \frac{PR(PU_i)}{DR(PU_i)} \quad (5.1)$$

$$\text{Où } \begin{cases} PR(PU_i) \in [PR_{\min}(PU), PR_{\max}(PU)] \\ DR(PU_i) \in [DR_{\min}(PU), DR_{\max}(PU)] \end{cases}$$

$PR_{\min}(PU)$ et $PR_{\max}(PU)$ représentent, respectivement, le minimum et le maximum de prix qui peuvent être proposés par un PU pour l'allocation d'une bande spectrale. $PR_{\min}(PU)$ et $PR_{\max}(PU)$ sont des valeurs fixes et sont les mêmes pour tous les PUs. $DR_{\min}(PU)$ et $DR_{\max}(PU)$ représentent, respectivement, le minimum et le maximum de durées d'utilisation qui peuvent être attribuées par un PU pour l'allocation de ses bandes, leurs valeurs sont également fixes et identiques pour tous les PUs.

Suite au lancement d'une enchère, le PU attend un temps Γ pour la réception des offres des TCMs intéressés. A partir de ces offres, il élimine celles où le PPS est inférieur à son $PPS_{réserve}$, puis il choisit le TCM qui propose le PPS le plus élevé. Si le PU reçoit la même offre de la part de plusieurs TCMs, il en choisit un aléatoirement. Ensuite, le PU envoie un message 'WINNER' au TCM sélectionné pour un partage avec un prix $P_{payé}$ donné par l'équation (5.2) et une durée d'utilisation $D(PU)$ correspondant à celle initialement proposée par le PU.

$$P_{payé} = D(PU) * PPS(TCM_W) * S_{alloué}(TCM_W) \quad (5.2)$$

Où $PPS(TCM_W)$ représente le prix par seconde unitaire (i.e. pour l'allocation d'une sous-bande) et $S_{alloué}(TCM_W)$ est la quantité de spectre allouée au TCM gagnant.

La figure 5.4 présente l'organigramme décrivant le comportement détaillé du PU. Le comportement des TCMs sera détaillé dans la section suivante.

5.5 Comportement détaillé du TCM

Une fois que le TCM détecte un changement de zone, il met à jour automatiquement son paramètre d'environnement HO_VAR (*Variable de HandOver*) (voir annexe E) afin de signaler la nécessité d'effectuer un handover spectral. En effet, le TCM s'aperçoit du changement de zone lorsque la force du signal reçu (RSS) devient inférieure à la limite L_{RSS} qui lui permet d'assurer une bonne qualité de service.

En se rapprochant de la nouvelle zone, le TCM reste en attente d'appel d'offres de la part de l'un des PUs présents. Une fois reçu, il vérifie si le PU déclencheur de l'enchère offre suffisamment de sous-bandes libres pour couvrir ses besoins. Ainsi, le TCM participe à toutes les enchères lancées par des PUs possédant suffisamment de spectre libre ($S_{libre}(PU)$) pour satisfaire ses besoins ($S_{demandé}(TCM)$), jusqu'à ce qu'il soit élu comme gagnant de l'une d'elles.

Chaque TCM_i a un prix $P_i(TCM_i)$ qu'il propose pour l'attribution des bandes mais aussi une durée favorite $D_i(TCM_i)$ qu'il souhaite obtenir. Par conséquent, il a un prix par seconde initial noté $PPS_{initial}(TCM_i)$, donné par l'équation (5.3).

$$PPS_{initial}(TCM_i) = \frac{P(TCM_i)}{D(TCM_i)} \quad (5.3)$$

$$\text{Où } \begin{cases} P(TCM_i) \in [P_{\min}(TCM), P_{\max}(TCM)] \\ D(TCM_i) \in [D_{\min}(TCM), D_{\max}(TCM)] \end{cases}$$

$P_{\min}(TCM)$ et $P_{\max}(TCM)$ représentent, respectivement, le minimum et le maximum de prix qui peuvent être proposés par un TCM pour l'allocation du spectre. $D_{\min}(TCM)$ et $D_{\max}(TCM)$ représentent, respectivement, le minimum et le maximum de durées d'utilisation qui peuvent être demandées par un TCM. Tous les TCMs ont les mêmes intervalles de prix et de durée d'utilisation.

La figure 5.5 présente l'organigramme décrivant le comportement du TCM sachant que l'algorithme est donné en annexe E.

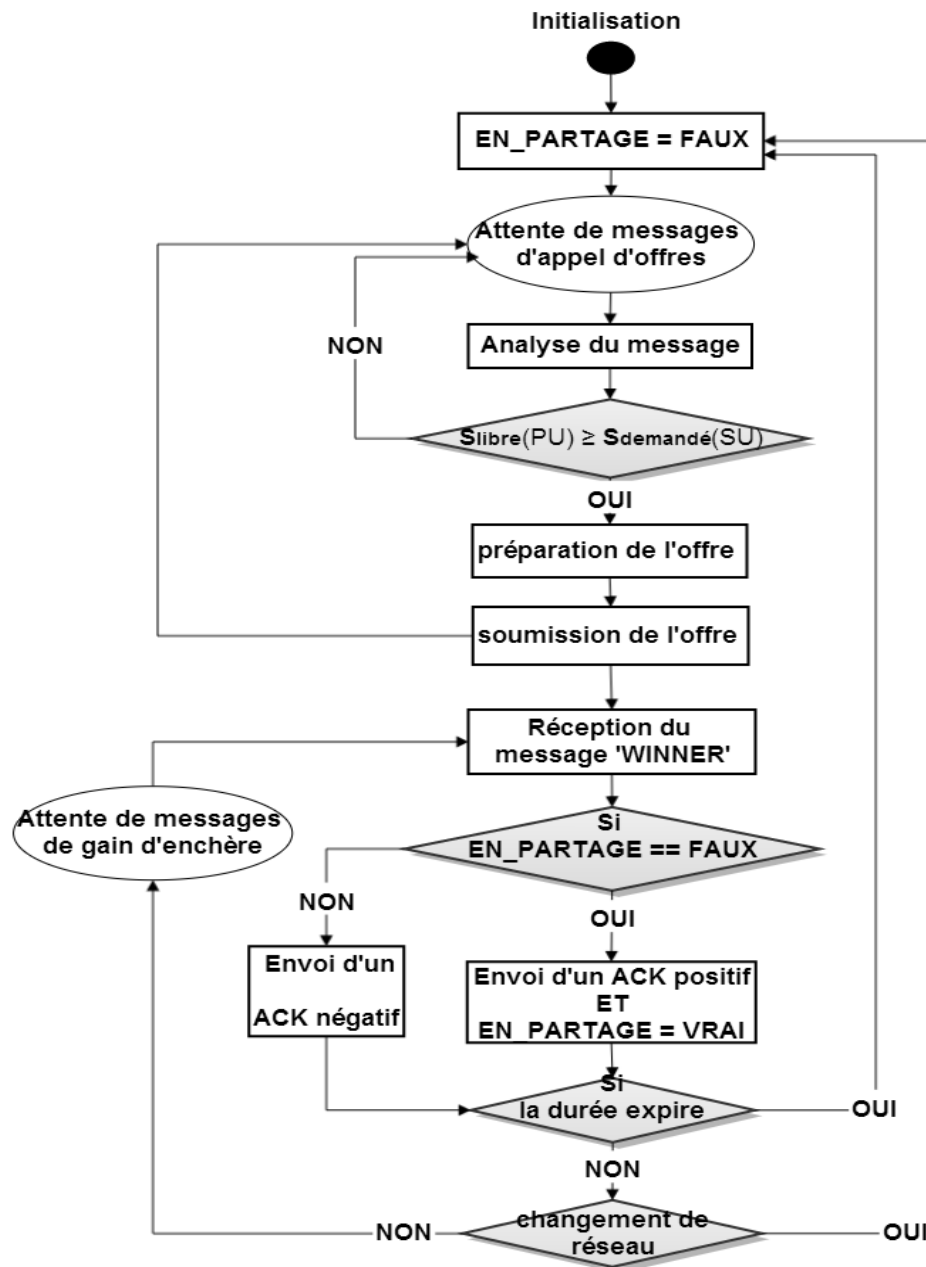


Figure 5.5 Comportement détaillé d'un TCM

Dès que le TCM remporte une enchère, il répond par un acquittement positif pour confirmer le partage du spectre. S'il reçoit d'autres réponses précisant qu'il a gagné une autre enchère alors qu'il est en train de partager une bande de spectre il envoie un acquittement négatif. L'exemple illustratif de la section suivante permettra d'avoir une vision plus claire du fonctionnement du TCM et du PU.

5.6 Exemple illustratif

Nous considérons, comme le montre la figure 5.6, deux TCMs qui souhaitent accéder au spectre et trois PUs qui existent dans la zone Z. PU_1 a 2 sous-bandes libres et PU_3 en possède 3. Par conséquent, PU_1 et PU_3 diffusent des messages d'initialisation d'enchères dans la zone Z (étapes I et II sur la Fig. 5.6). Comme le TCM_1 a besoin de 2 sous-bandes, il participe aux deux

enchères déclenchées (étape III et IV). Cependant, TCM_2 a besoin de 3 sous-bandes et il ne participe donc qu'à l'enchère initiée par le PU_3 (étape V).

PU_1 n'a reçu qu'une seule offre supposée inférieure à son $PPS_{réserve}$, et il n'a donc pas de vainqueur. Par contre, PU_3 reçoit 2 offres, qui sont plus élevées que son $PPS_{réserve}$ et sachant que l'offre 'Bid₁' du TCM_1 est supérieure à l'offre 'Bid₂' du TCM_2 . Par conséquent, PU_3 envoie un message 'WINNER' au TCM_1 (étape VI) qui répond par un acquittement positif et partage ainsi le spectre avec PU_3 (étape VII).

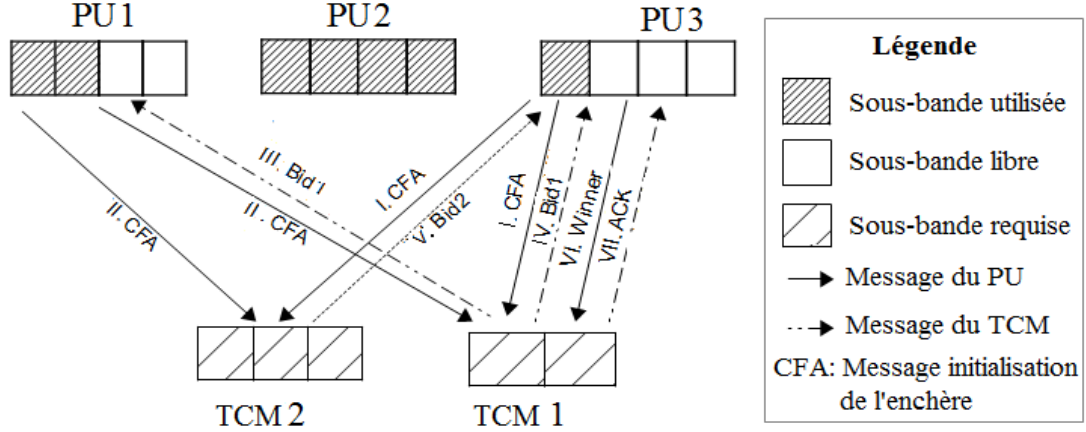


Figure 5.6 Exemple illustratif du fonctionnement de *LASMA*

Deux cas de figures peuvent exister au niveau de l'allocation du spectre: (1) le PU_3 attribue au TCM_1 les deux sous-bandes requises et redémarre une autre enchère pour allouer la sous-bande libre restante, ou (2) il attribue toutes ses sous-bandes libres au TCM_1 et lui donne accès au prix de 3 sous-bandes. Ces deux types d'attribution de spectre sont définis comme allocation uni-bande et allocation multi-bandes et sont détaillés dans la section suivante.

5.7 Types d'allocation de spectre

Le PU peut attribuer ses ressources spectrales libres par unité (allocation uni-bande) ou accorder l'accès à la totalité de ses sous-bandes disponibles (allocation multi-bandes).

5.7.1 Allocation uni-bande

Le PU partage le nombre exacte de sous-bandes requises par le TCM, qui a remporté l'enchère, et redémarre un nouvel appel d'offres s'il détient encore des sous-bandes libres. Dans ce cas, le PU affecte son spectre avec un prix $P_{payé}$ donné par l'équation (5.4):

$$P_{payé} = D(PU) * PPS(TCM_W) * S_{demandé}(TCM_W) \quad (5.4)$$

Où $PPS(TCM_W)$ est l'offre du TCM gagnant et $S_{demandé}(TCM_W)$ est la quantité de sous-bandes requises par le TCM_W . $D(PU)$ est la durée proposée par le PU pour l'allocation du spectre. Rappelons que $D(PU)$ est une valeur indépendante pour chaque PU et est choisie aléatoirement dès le début de chaque simulation.

5.7.2 Allocation multi-bandes

Le PU attribue au TCM gagnant la totalité de ses sous-bandes libres. Dans ce cas, il ne prend pas en compte les besoins du TCM en termes de ressources spectrales et l'autorise à

accéder au spectre avec le prix de la totalité du spectre disponible. $P_{payé}$ est donné par l'équation (5.5) suivante :

$$P_{payé} = D(PU) * PPS(TCM_W) * S_{libre}(PU) \quad (5.5)$$

$P_{payé}$ est calculé en fonction de la durée d'utilisation du spectre fixée par le PU ($D(PU)$), du PPS proposé par le TCM gagnant ($PPS(TCM_W)$), mais aussi de la quantité de sous-bandes libres du PU $S_{libre}(PU)$.

Nous avons effectué différents tests et simulations afin de comparer ces deux alternatives d'allocation de spectre. Les résultats obtenus, présentés dans la section 5.10.3, prouvent que l'allocation uni-bande est plus avantageuse en termes d'utilisation du spectre et de délai moyen du handover. Par conséquent, nous avons adopté l'allocation uni-bande dans notre proposition.

Par ailleurs, notre approche intègre deux nouvelles importantes contributions qui sont la prise en considération de la fréquence utilisée par le TCM et l'apprentissage permettant d'accélérer l'accès et d'améliorer l'efficacité des enchères. Nous présenterons en détail chacune de ces deux contributions dans les deux sections qui suivent.

5.8 Prise en considération de la fréquence

Lors de son déplacement d'une zone vers une autre, le TCM est obligé d'effectuer un handover pour maintenir sa connectivité. Afin d'éviter la latence supplémentaire engendrée par le handover fréquentiel, nous proposons une solution qui permet de garder, dans la mesure du possible, la fréquence courante. Ainsi, le TCM privilégie la bande spectrale du PU qui inclue la fréquence qu'il est déjà en train d'utiliser. Rappelons que le PU proposant cette bande est désigné par PU_{sf} (sf: same frequency). Le TCM propose donc son offre maximale lorsqu'il participe à l'enchère lancée par le PU_{sf} afin d'augmenter ses chances de gagner cette enchère.

Nous définissons PPS_{max} comme étant le prix par seconde maximal qui peut être proposé par un TCM pour l'allocation du spectre. PPS_{max} est le même pour tous les TCMs et est donné par l'équation (5.6).

$$PPS_{max} = \frac{P_{max}(TCM)}{D_{min}(TCM)} \quad (5.6)$$

Où $P_{max}(TCM)$ et $D_{min}(TCM)$ sont définis dans la section 5.4 comme le prix maximal qui peut être proposé par un TCM et la durée minimale qui peut être demandée par un TCM pour l'utilisation de la bande.

Ainsi, l'offre PPS_{bid} qui peut être proposée par un TCM_i est donnée par l'équation (5.7).

$$PPS_{bid}(TCM_i) = \begin{cases} PPS_{max} & \text{Si } PU_{commisaire-priseur} = PU_{sf} \\ PPS_{initial}(TCM_i) & \text{Si } PU_{commisaire-priseur} \neq PU_{sf} \end{cases} \quad (5.7)$$

Où $PPS_{initial}(TCM_i)$ est le prix par seconde initial du TCM à proposer en réponse aux appels d'offres des PUs. Il sera remplacé par PPS_{max} lorsque l'enchère est lancée par PU_{sf} .

L'offre $PPS_{initial}$ de certains TCMs peut être trop faible par rapport au $PPS_{réserve}$ des PUs existants, ce qui peut entraîner un problème de famine; malgré que les TCMs participent à plusieurs enchères, certains d'entre eux peuvent ne pas réussir à avoir un accès au spectre à cause d'un $PPS_{initial}$ très faible. De même, certains PUs peuvent ne pas parvenir à partager leurs

sous-bandes libres à cause d'un $PPS_{réserve}$ très élevé. Pour pallier ce problème, nous intégrons au niveau de l'algorithme définissant le fonctionnement du TCM, un module d'apprentissage qui permet de diminuer l'écart entre le PPS proposé par le TCM et le $PPS_{réserve}$ du PU.

5.9 Algorithme d'apprentissage

L'idée principale de notre module d'apprentissage est la mise à jour de l'offre du TCM (PPS_{bid}) en fonction des enchères initiées par les PUs. A chaque fois que le TCM reçoit un nouvel appel d'offres de la part du même PU, alors il augmente son PPS_{bid} de façon à maximiser ses chances de remporter l'enchère. En effet, le processus d'apprentissage permettra au TCM d'atteindre le $PPS_{réserve}$ du PU dans le cas où ce dernier est supérieur à son $PPS_{initial}$. Sinon, il permet d'augmenter le PPS_{bid} proposé par le TCM de façon à dépasser les offres des autres SUs, ce qui permet d'accélérer l'accès au spectre. L'incrémentation du PPS_{bid} est caractérisée par le paramètre apprentissage ψ et dépend du nombre d'appels d'offres reçus de la part d'un même PU_j, noté ηA (PU_j). $PPS_{bid}(TCM_i)$ est calculé à travers l'équation (5.8).

$$\begin{cases} PPS_{bid}(TCM_i) = PPS_{initial}(TCM) + [\eta A(PU_j) - 1] * \psi \\ PPS_{bid}(TCM_i) \leq PPS_{max} \end{cases} \quad (5.8)$$

Le processus d'apprentissage est illustré par la figure 5.7. D'abord, le TCM vérifie si le PU déclencheur de l'enchère est bien le PU_{sf} proposant la même bande de fréquences que celle actuellement utilisée. Dans ce cas, il propose son PPS_{max} afin de conserver sa fréquence, sinon, il calcule son PPS_{bid} comme présenté par l'équation (5.8). Le PPS_{bid} , est initialisé à $PPS_{initial}$ et est incrémenté de ψ à chaque fois que le TCM reçoit un nouvel appel d'offre du même PU. Le PPS_{bid} continue à augmenter jusqu'à ce qu'il atteigne PPS_{max} ou que le TCM accède aux ressources spectrales dont il a besoin.

Suite à un succès (contrat de partage), le PPS_{bid} est réinitialisé à sa valeur initiale $PPS_{initial}$. L'idée est d'éviter qu'un TCM n'offre toujours des PPS élevés alors que les conditions environnementales ont probablement changé. Nous présenterons, dans ce qui suit, un exemple illustratif afin d'expliquer davantage le module d'apprentissage proposé.

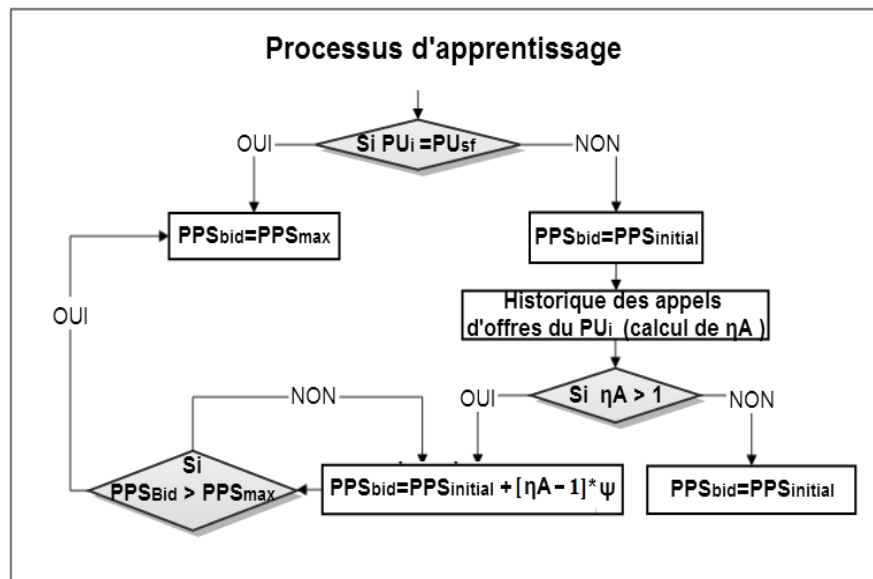


Figure 5.7 Processus d'apprentissage

Exemple explicatif

Le tableau 5.1 présente un exemple illustrant le fonctionnement de notre algorithme d'apprentissage.

Nous considérons trois TCMs qui viennent d'arriver dans la zone Z où coexistent trois PUs. Comme tous les PUs disposent de sous-bandes libres (FSb) (1 pour PU_1 , 3 pour PU_2 et 2 pour PU_3), chacun d'entre eux lance un appel d'offres. Chaque TCM envoie son offre initiale ($PPS_{initial}$) à tous les PUs proposant suffisamment de sous-bandes libres (Sb) couvrant ses besoins. Dans notre exemple, TCM_1 et TCM_3 participent aux enchères lancées par tous les PUs puisqu'ils ont besoin d'une seule sous-bande alors que PU_2 , qui a besoin de deux sous-bandes, participe seulement aux enchères lancées par PU_2 et PU_3 , étant donné qu'ils proposent respectivement trois et deux sous-bandes libres. Le tableau 5.1 trace le déroulement et le résultat des différentes enchères.

Tableau 5.1 Exemple illustratif du processus d'apprentissage

	PU₁ $PPS_{réserve}=0.4$ $FSb=1; D(PU_1)=120\text{ s}$		PU₂ $PPS_{réserve}=0.65$ $FSb=3; D(PU_2)=60\text{ s}$		PU₃ $PPS_{réserve}=0.7$ $FSb=2; D(PU_3)=180\text{ s}$		
	1 ^{er} Appel	2 ^{ème} Appel	1 ^{er} Appel	2 ^{ème} Appel	1 ^{er} Appel	2 ^{ème} Appel	3 ^{ème} Appel
TCM₁ ($PPS_1=0.5$; $besoin=1\text{ Sb}$)			/		/	/	GAIN
TCM₂ ($PPS_2=0.58$; $besoin=2\text{ Sb}$)			/	GAIN	/	/	
TCM₃ ($PPS_3=0.7$; $besoin=1\text{ Sb}$)	GAIN		/		/	/	

Comme le TCM_3 propose au PU_1 le PPS le plus élevé (0.7) et se trouve être supérieur à son $PPS_{réserve}$ (0.4), ce dernier le sélectionne comme gagnant de l'enchère. TCM_3 correspond également au gagnant des enchères lancées par PU_2 et PU_3 , cependant, comme PU_1 est le premier à avoir répondu au TCM_3 , ce dernier lui envoie un acquittement positif pour un partage d'une durée égale à 120 secondes et un prix égal à 84 unités de paiement, calculé à travers l'équation (5.2) ($84=120 * 0.7 * 1$). Par ailleurs, le TCM_3 envoie des acquittements négatifs aux deux autres PUs.

PU_2 et PU_3 n'ont pas pu allouer leurs bandes dès leur première enchère. Par conséquent, ils relancent de nouvelles enchères et ainsi TCM_1 et TCM_2 participent avec des PPS incrémentés. Supposant que le paramètre d'apprentissage est fixé à 0.1, TCM_1 envoie un PPS égal à 0.6 (au lieu de son $PPS_{initial}$ égal à 0.5) alors que TCM_2 participe avec un PPS égal à 0.68 (au lieu de 0.58). Les nouvelles offres sont calculées à travers l'équation (5.8). PU_2 choisit TCM_2 comme gagnant de l'enchère car il propose le PPS le plus élevé parmi les deux reçus, et qui est supérieur à son $PPS_{réserve}$ (0.65).

Cependant, PU_3 n'a toujours pas alloué ses bandes libres car il a un $PPS_{réserve}$ (0.7) un peu élevé par rapport aux dernières offres. Ainsi, il déclenche une troisième enchère. Dans ce cas, le PU_3 reçoit simplement une offre de TCM_1 (n'ayant pas pu encore accéder au spectre), qui atteint maintenant un PPS égal à 0.7 grâce à l'algorithme d'apprentissage. Comme cette offre est égale au $PPS_{réserve}$ du PU_3 , ce dernier attribue ses deux sous-bandes libres au TCM_1 pour une durée d'utilisation égale à 180 secondes et pour un prix égal à 126 unités de paiement ($126 = 180 * 0.7 * 1$) comme indiqué dans l'équation (5.2)).

Nous consacrons le reste du chapitre à l'évaluation des performances de *LASMA* en étudiant l'effet de chacune de nos contributions sur le partage du spectre et la gestion du handover.

5.10 Evaluation des performances de l'approche LASMA

Dans cette section, nous évaluerons les performances de notre deuxième proposition *LASMA* à travers le simulateur à événements discrets OMNETPP [147]. Nous présenterons d'abord les paramètres de simulation et les métriques considérées. Par la suite, nous exposerons les résultats de l'étude comparative entre les deux types d'allocation uni-bande et multi-bandes. Puis, nous montrerons l'effet de l'algorithme d'apprentissage sur les résultats obtenus. Enfin, nous comparerons *LASMA* avec notre première approche *NESAM*.

5.10.1 Paramètres de simulation

Nous considérons pratiquement les mêmes paramètres de simulation que ceux adoptés pour l'évaluation de performances de *NESAM* (section 4.7.1) sauf pour les intervalles de prix et de durée respectifs aux PUs et TCMs.

Le temps d'attente de réception des offres Γ est fixé à 0.6 seconde (s). Le tableau 5.2 résume les principaux paramètres de simulation. Dans toutes les simulations, nous considérons un intervalle de confiance de 95% pour chaque valeur moyenne représentée dans les courbes.

Tableau 5.2 Paramètres de simulation pour l'évaluation de l'approche *LASMA*

Paramètres	Valeurs
Nombre de PUs	100
Nombre de TCMs	[100, 200]
P(TCM)	[30, 50] (um)
D(TCM)	[30, 90] (s)
PR(PU)	[35, 55] (um)
DR(PU)	[60, 240] (s)
Temps d'attente d'offres(Γ)	0.6 (s)
Temps de simulation	600 (s)

5.10.2 Métriques

Pour évaluer *LASMA*, nous avons étudié la plupart des métriques considérées lors de l'évaluation de l'approche *NESAM*, à savoir : le taux moyen d'utilisation du spectre, le taux moyen de handover spectral, le délai moyen du handover, l'utilité des TCMs et des PUs ainsi

que les pourcentages des TCMs servis et des PUs qui ont pu allouer leurs bandes et le nombre moyen de messages échangés avant l'accès au spectre. De plus, nous avons également étudié le nombre de tentatives avant l'accès au spectre.

Pour le taux moyen d'utilisation du spectre, le taux moyen du handover spectral et le délai moyen du handover, nous avons utilisé les mêmes définitions que celles présentées dans la section 4.7.2. Le taux moyen d'utilisation du spectre et le délai moyen du handover sont définis à travers les équations (4.5) et (4.8), respectivement.

- *Utilités des TCMs*

L'utilité d'un TCM est définie dans la section 4.7.2 par l'équation (4.6) comme suit :

$$U(TCM_i) = \frac{1}{N_{all}} \sum_{j=1}^{N_{all}} \left(\frac{PI_{min}(PU)}{P[i]_{payé}} * \frac{D[i]_{attribuée}}{DI_{max}(PU)} \right)$$

où $PI_{min}(PU)=PR_{min}(PU)$ et $DI_{max}(PU)=DR_{max}(PU)$ sachant que $PR_{min}(PU)$ et $DR_{max}(PU)$ représentent, respectivement, le prix minimum de réserve et la durée maximale de réserve qui peuvent être acceptés par un PU pour l'accès au spectre. Ainsi, l'utilité d'un TCM_i peut être définie également à travers l'équation (5.9) (la démonstration de l'équivalence entre les deux équations (4.6) et (5.9) est présentée dans l'annexe C.3).

$$U(TCM_i) = \frac{1}{N_{all}} \sum_{j=1}^{N_{all}} \left(\frac{Min(PPS_{réserve}(PU_j))}{PPS_{bid}(TCM_i)} \right) \quad (5.9)$$

$$\text{Où } Min(PPS_{réserve}(PU)) = \frac{PR_{min}(PU)}{DR_{max}(PU)} \text{ (voir équation (5.1))}$$

- *Utilité des PUs*

L'utilité du PU_j donnée par l'équation (4.7) peut être présentée différemment, par l'équation (5.10). A chaque partage i , l'utilité du PU dépend du PPS_{bid} du TCM gagnant du $i^{\text{ème}}$ partage et du PPS_{max} des TCMs. L'équivalence entre l'équation (4.7) et l'équation (5.10) est démontrée dans l'annexe C.4.

$$U(PU_j) = \frac{1}{N_{partage}} \sum_{i=1}^{N_{partage}} \frac{PPS_{bid}(TCM_w[i])}{PPS_{max}(TCM)} \quad (5.10)$$

- *Nombre moyen de messages échangés avant l'accès au spectre*

Afin de calculer le coût de communication produit par l'enchère, nous avons mesuré le nombre de messages échangés entre le PU déclencheur de l'enchère et les TCMs intéressés par le partage. Le nombre de messages (Nb_{ER}) échangés lors d'une enchère réussie dès le premier appel d'offres est donné par l'équation (5.11).

$$Nb_{ER} = 1 CFA + nb_{BID} + 1W + 1ACK_p = 3 + nb_{BID} \quad (5.11)$$

Où le premier message échangé représente le message de diffusion 'CFA' (*Call For Auction participation*) lancé par le PU pour l'initiation de l'enchère, nb_{BID} est le nombre de

propositions reçues de la part des TCMs intéressés par la bande de spectre mise en enchère. 1W est le message 'WINNER' envoyé par le PU au TCM gagnant. 1ACK_p est l'acquiescement positif reçu de la part du TCM gagnant pour confirmer le partage du spectre.

Le nombre moyen de messages échangés entre le PU et les TCMs avant un partage du spectre est égal à EN_Nb_{Msg} , donné par l'équation (5.12).

$$EN_Nb_{Msg} = (1 CFA + nb_{BID}) * (nb_{Ef} + 1) + 2 * (nb_{wo} + 1) \quad (5.12)$$

Où nb_{Ef} est le nombre moyen d'enchères lancées sans aucune proposition retenue. Deux cas possibles pour lesquelles nb_{Ef} est différent de 0 : pas de propositions ou toutes les propositions sont inférieures au $PPS_{réserve}(PU)$. nb_{wo} est le nombre de TCMs gagnants d'une enchère mais qui répondent avec un acquiescement négatif. Ce dernier engendre deux messages supplémentaires qui sont : le message 'WINNER' pour déclarer le gagnant et le message 'ACK' pour préciser que le TCM ne peut pas accepter le partage car il a déjà gagné une autre enchère.

- *Nombre moyen de tentatives avant l'accès au spectre*

Il s'agit du nombre moyen d'offres envoyées par un TCM lors de sa participation à des enchères jusqu'à l'obtention d'un accès au spectre. Nous calculons le nombre moyen de tentatives (Nb_{Tent}) avant l'accès au spectre, à l'aide de l'équation (5.13), comme suit :

$$Nb_{Tent} = \frac{1}{nb_{TCMs}} \sum_{i=1}^{nb_{TCMs}} \frac{nb_{BTot} - ACK_N - nb_{BI}}{N_{all}} \quad (5.13)$$

Où pour chaque TCM, nb_{BTot} est le nombre total d'offres envoyées pour la participation aux enchères qui l'intéresse, ACK_N représente le nombre d'acquiescements négatifs envoyés et nb_{BI} est le nombre d'offres inutiles qui ont été envoyées après l'offre retenue. Rappelons que N_{all} représente le nombre total d'allocations obtenues par un TCM et nb_{TCMs} est le nombre total de TCMs qui ont eu accès au spectre.

La figure 5.8 présente un exemple de participation de TCM pour lequel nous expliquons comment le nombre moyen de tentatives pour un TCM est calculé.

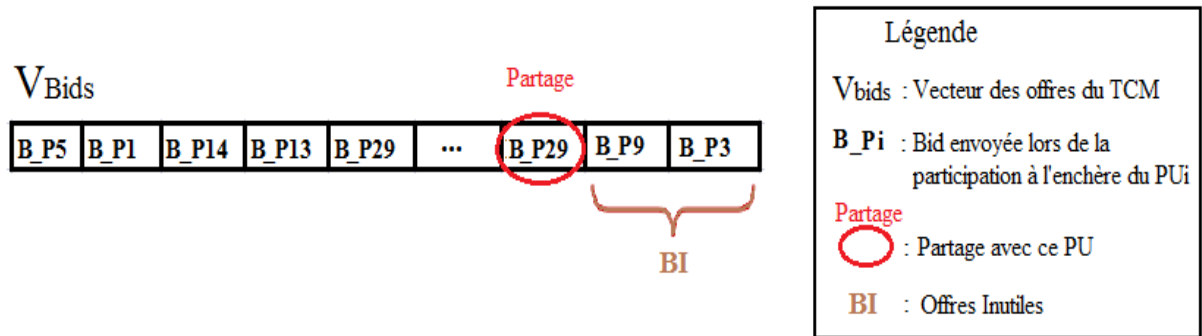


Figure 5.8 Exemple de tentatives

Le nombre total d'offres (nb_{BTot}) correspond à la taille du vecteur (V_{Bids}) contenant toutes les offres envoyées. Après un partage, le TCM n'envoie plus d'offres mais plutôt des acquiescements négatifs (ACK_N). Ainsi, les offres inutiles que nous avons appelées BI sont celles envoyées avant la réception du message 'WINNER' notifiant au TCM qu'il a remporté une

enchère. On soustrait ACK_N du nombre total de tentatives car ce n'est pas une participation (ou tentative) qui a échoué. Cependant, il s'agit d'une offre gagnante qui ne peut pas être retenue car le TCM est en train de partager une bande de spectre avec un autre PU.

Dans cet exemple, nous supposons que la taille du vecteur V_{Bids} est égale à 10, nb_{BI} est égal à 2 et il s'agit de la première allocation ($N_{all}=1$ et $ACK_N=0$) ainsi le nombre de tentatives avant l'accès au spectre est égal à 8.

5.10.3 Résultats de comparaison des deux types d'allocation

Nous commençons l'évaluation de performances de *LASMA* par une comparaison entre les deux types d'allocation uni-bande et multi-bandes. D'après les simulations effectuées, les différences majeures entre les deux types d'allocation portent essentiellement sur trois métriques : (1) taux moyen d'utilisation du spectre, (2) nombre moyen de tentatives avant l'accès au spectre et (3) délai moyen de handover. Les résultats des comparaisons présentés respectivement par les figures 5.9, 5.10 et 5.11, ont, en partie, fait l'objet de la publication [150].

5.10.3.1 Utilisation du spectre

La figure 5.9 représente le taux moyen d'utilisation du spectre en variant le nombre de TCMs entre 100 et 200 et en fixant le nombre de PUs à 100. Ce résultat montre que l'utilisation du spectre demeure élevée quel que soit le nombre de TCMs. En effet, ce dernier dépasse toujours le nombre de PUs existants et par conséquent les sous-bandes inutilisées trouvent toujours un preneur parmi les TCMs présents.

D'autre part, la figure 5.9 montre que l'allocation uni-bande garantit un taux d'utilisation plus élevé que celui de l'allocation multi-bandes. Ceci s'explique par le fait que le PU, dans l'affectation multi-bandes, attribue toutes ses sous-bandes libres au même TCM quel que soit son besoin alors que le TCM n'a besoin qu'une partie des sous-bandes accordées, ce qui laissera forcément certaines sous-bandes inexploitées.

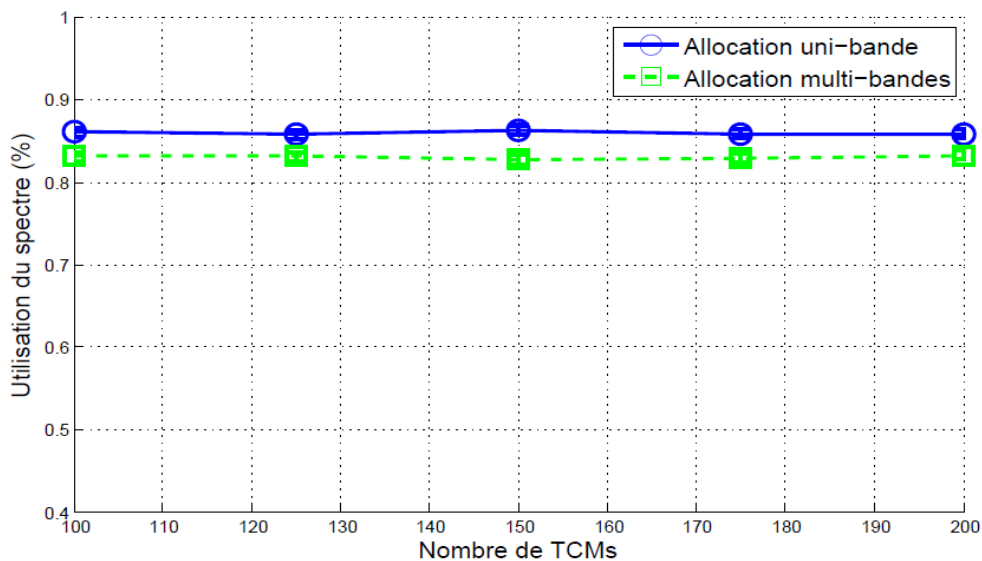


Figure 5.9 Comparaison entre les deux types d'allocation en termes d'utilisation du spectre

5.10.3.2 Nombre moyen de tentatives avant l'accès au spectre

Le nombre moyen de tentatives par TCM avant l'accès au spectre représente le nombre d'offres faites par le TCM avant qu'il ne puisse remporter une enchère. La figure 5.10 montre que ce nombre est plus faible dans le cas de l'allocation uni-bande car le nombre des appels d'offres lancés par les PUs est plus important (puisque les ressources sont mieux réparties) et la probabilité de trouver des fréquences libres est plus élevée. Par conséquent, les TCMs peuvent accéder au spectre avec moins de tentatives.

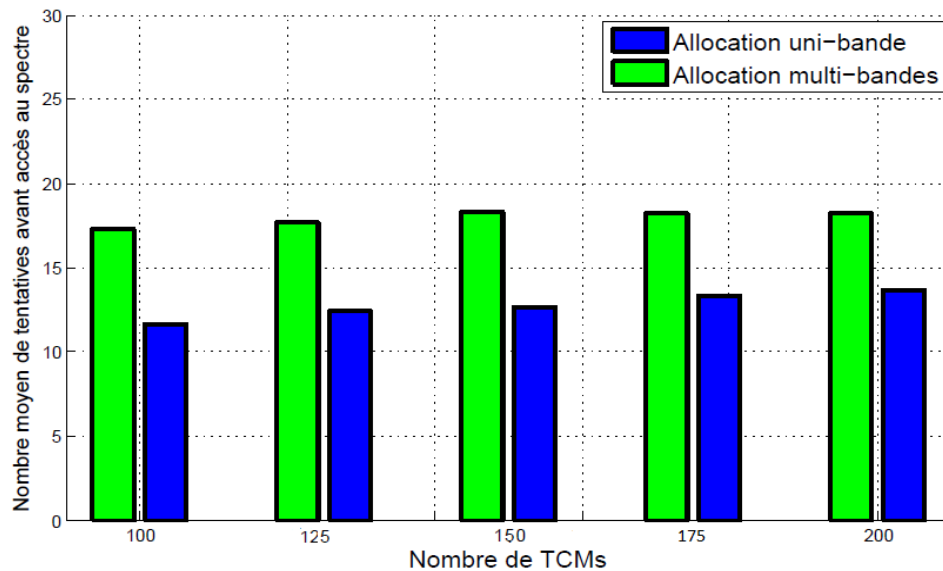


Figure 5.10 Comparaison entre les types d'allocation en termes du nombre de tentatives

Nous remarquons qu'avec l'allocation uni-bande, le nombre de tentatives diminue par rapport à l'allocation multi-bandes jusqu'à atteindre 13 tentatives en moyenne. Ce nombre de tentatives s'explique par le fait que le TCM envoie plusieurs offres en même temps puisqu'il participe à toutes les enchères couvrant ses besoins en termes de bande passante jusqu'à ce qu'il soit élu comme gagnant. De plus, la réponse du PU prend au moins un temps Γ (temps d'attente de réception des offres), pendant lequel le TCM peut continuer à envoyer d'autres offres à différents PUs.

5.10.3.3 Délai moyen de handover

La figure 5.11 présente le temps moyen d'attente avant l'accès au spectre dans les deux cas d'allocation uni-bande et multi-bandes. Comme le montre cette figure, le temps moyen d'attente entre deux attributions successives de bandes de fréquences augmente légèrement avec l'accroissement du nombre de TCMs. Ce résultat est évidemment attendu puisque la quantité de ressources disponibles diminue et ainsi le temps d'attente pour accéder au spectre augmente.

La figure 5.11 confirme que l'allocation uni-bande assure un délai de handover plus faible que celui obtenu avec l'allocation multi-bandes pour les mêmes raisons évoquées pour la figure 5.10.

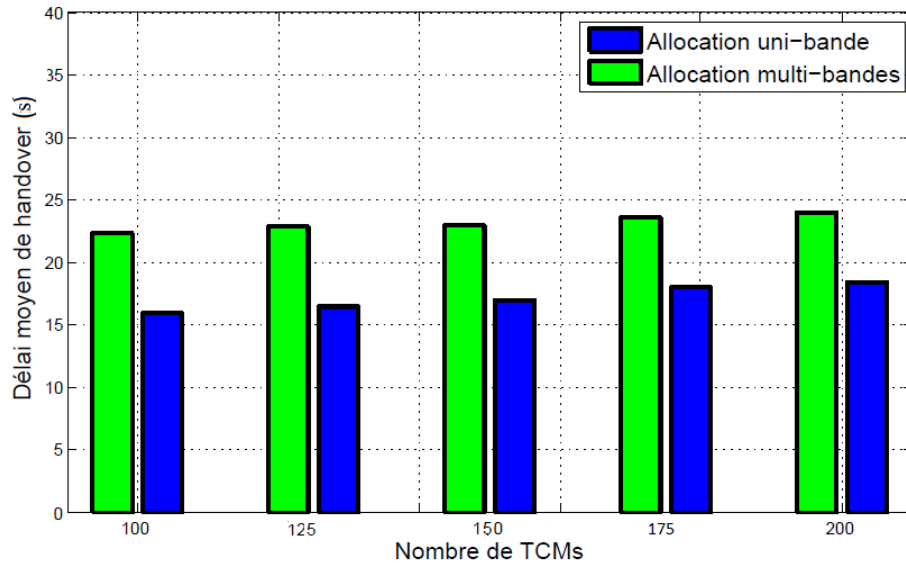


Figure 5.11 Comparaison entre les types d'allocations en termes de délai

Malgré que l'allocation multi-bandes semble plus intéressante en termes de gains obtenus par les PUs (puisque'elle leur permet d'être toujours payés pour la totalité de leurs bandes libres), nous avons choisi d'utiliser l'allocation uni-bande dans notre proposition puisque'elle présente de meilleures performances en termes d'utilisation du spectre, nombre moyen de tentatives et délai moyen avant l'accès au spectre.

5.10.4 Résultats de comparaison avec l'enchère classique

Dans cette section, nous allons évaluer les performances de *LASMA* et étudier l'influence de l'algorithme d'apprentissage sur les résultats obtenus. Par conséquent, nous avons comparé *LASMA* avec une approche sans apprentissage (*approche d'enchère classique*) dont le fonctionnement est brièvement décrit comme suit: Les PUs disposant de bandes spectrales libres déclenchent des enchères ; les TCMs participent ainsi aux appels d'offres couvrant leurs besoins en termes de ressources spectrales. Chaque participant envoie toujours son $PPS_{initial}$ quel que soit le PU déclencheur de l'enchère (sans aucune préférence pour le PU_{sf}) et quelle que soit la fréquence de cet appel d'offres (η_A). Le PU choisit tout simplement le TCM proposant l'offre la plus élevée et ainsi le partage du spectre a lieu suite une réponse positive du TCM gagnant.

5.10.4.1 Utilisation moyenne du spectre

Le pourcentage d'utilisation du spectre est une métrique très importante dans l'étude de la gestion dynamique des ressources spectrales dans les réseaux à radio cognitive puisque'elle reflète le degré d'exploitation du spectre. Ainsi, nous étudierons d'abord la variation du taux moyen d'utilisation du spectre au cours du temps (cf. figure 5.12), puis sa variation en fonction du nombre de TCMs (cf. figure 5.13) et enfin nous présenterons la comparaison des résultats de *LASMA* avec ceux de l'enchère classique.

La figure 5.12 présente le taux moyen d'utilisation du spectre au cours de 600s pour un nombre total de 125 TCMs (choisi aléatoirement) et 100 PUs. Le paramètre d'apprentissage ψ est aléatoire et différent pour chaque TCM. Nous observons, d'après cette figure, que le taux

d'utilisation du spectre évolue au cours du temps et peut atteindre jusqu'à 94%. Puis, il atteint un état stable, avec un taux d'utilisation très important, jusqu'à la fin de la simulation. Ceci prouve que *LASMA* améliore de façon significative l'allocation des ressources spectrales.

La figure 5.13 montre l'impact de la variation du nombre de TCMs sur le taux d'utilisation du spectre. Nous fixons, en effet, le nombre de PUs à 100 et varions le nombre de TCMs entre 100 et 200, ψ est toujours variable. Cette figure montre que le taux d'utilisation du spectre reste élevé quel que soit le nombre de TCMs. En plus, les résultats de comparaison prouvent que les deux approches présentent des taux d'utilisation du spectre très proches où *LASMA* est légèrement meilleure, ce qui prouve l'apport significatif de notre proposition en termes d'exploitation du spectre.

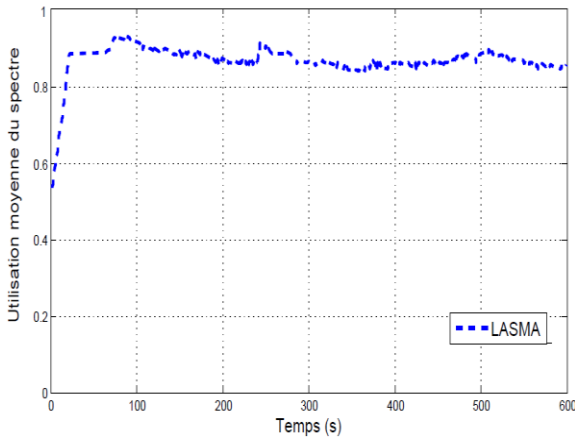


Figure 5.12 Utilisation moyenne du spectre au cours du temps

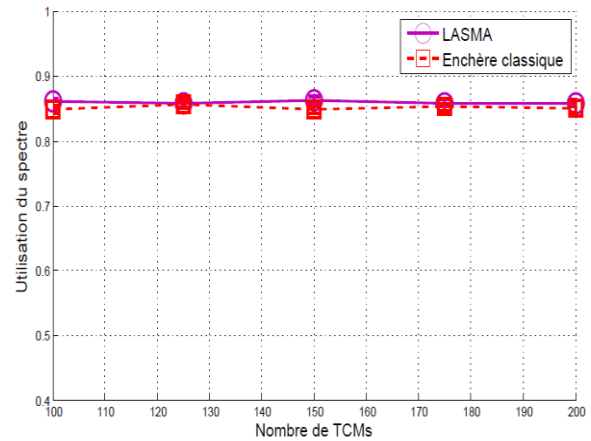


Figure 5.13 Utilisation moyenne du spectre en fonction du nombre de TCMs

5.10.4.2 Taux moyen de handover fréquentiel

Rappelons que le taux de handover fréquentiel reflète le nombre moyen de handover spectraux effectués lors du déplacement des TCMs. Cette métrique est très importante pour évaluer les performances du handover. La figure 5.14 décrit la variation de ce taux en fonction du nombre de TCMs ainsi que la comparaison entre *LASMA* et l'enchère classique par rapport à cette métrique.

D'abord, nous remarquons, d'après la figure 5.14, que le nombre de TCMs n'a pas d'influence sur le taux de handover fréquentiel, ce qui prouve l'efficacité de notre proposition. D'autre part, la figure 5.14 montre que *LASMA* diminue considérablement le taux moyen de handover fréquentiel par rapport à l'enchère classique, ce qui permet aux TCMs d'éviter certains changements de canaux, tout en maintenant la qualité de service. Ce résultat est obtenu grâce au mécanisme de prise en considération de la fréquence que nous avons intégré dans notre approche (section 5.7).

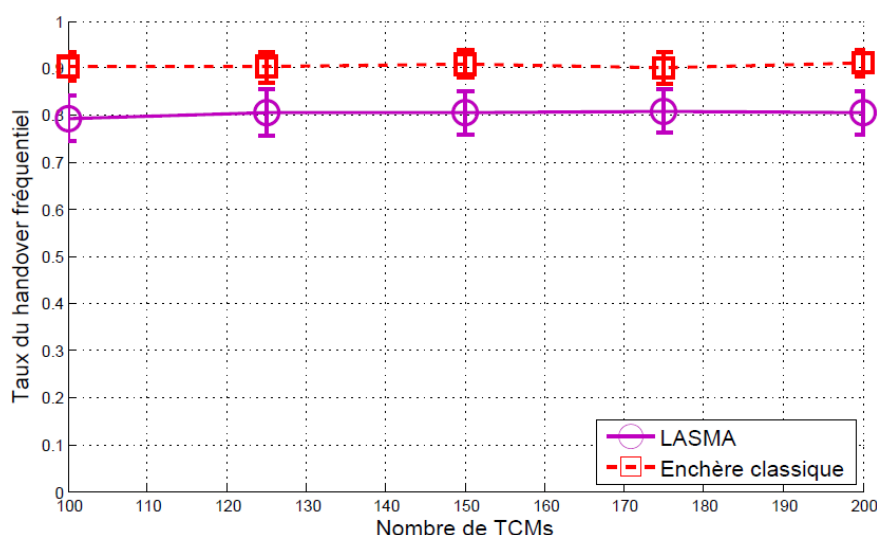


Figure 5.14 Taux de handover fréquentiel

5.10.4.3 Taux moyen de blocage

Le taux moyen de blocage représente le pourcentage de TCMs qui sont bloqués et qui n'arrivent pas à accéder au spectre tout au long de la simulation. La figure 5.15 trace ce taux en fonction du nombre de TCMs pour l'approche *LASMA* ainsi que pour l'enchère classique.

Nous observons que le taux moyen de blocage subit une augmentation remarquable quand le nombre de TCMs augmente puisque les demandes dépassent de plus en plus les ressources disponibles. En effet, avec 100 TCMs le taux de blocage est égal à 0% dans le cas de *LASMA*. Cependant, lorsque le nombre de TCMs augmente, les premiers arrivés sont les premiers servis, ce qui fait diminuer la quantité de ressources spectrales disponibles.

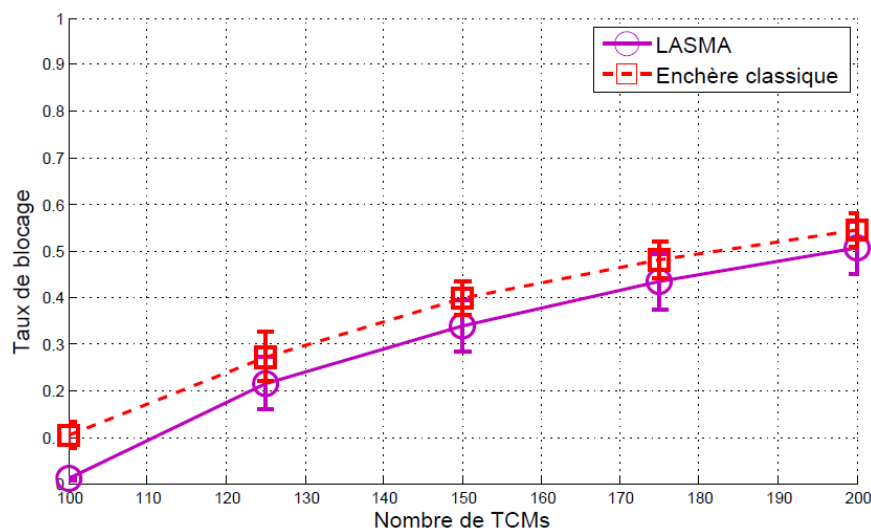


Figure 5.15 Taux de blocage

La figure 5.15 montre également que *LASMA* permet de diminuer le taux de blocage pratiquement de 10% par rapport à l'enchère classique, grâce à l'algorithme d'apprentissage que nous avons intégré au niveau du comportement des TCMs. En effet, l'apprentissage permet

aux TCMs ayant un $PPS_{initial}$ faible de pouvoir modifier leur offre afin de se rapprocher du $PPS_{réserve}$ des PUs et d'accéder ainsi au spectre diminuant, par conséquence, le taux de blocage.

5.10.4.4 Utilité moyenne des TCMs

Afin d'étudier l'effet de l'intégration de l'algorithme d'apprentissage sur la satisfaction des utilisateurs, nous avons mesuré l'utilité des TCMs obtenue avec *LASMA* et nous l'avons comparée avec celle que donne l'enchère classique. La figure 5.16 représente ces résultats.

Nous remarquons que l'utilité des TCMs ne dépend pas de leur nombre. En effet, par définition (équation (5.9)), l'utilité d'un TCM ne dépend que du $PPS_{réserve}$ minimal des PUs et de l'offre proposée par le TCM lui-même.

Nous observons également que l'apprentissage entraîne une diminution au niveau de l'utilité des TCMs par rapport à l'enchère classique. Ceci s'explique par le fait que l'apprentissage permet d'augmenter la valeur de l'offre des TCMs au fur et à mesure de l'évolution des enchères initiées par les PUs, ce qui fait baisser naturellement la valeur de l'utilité du TCM. L'algorithme d'apprentissage aura, bien évidemment, un impact inverse sur l'utilité des PUs, ce que nous allons illustrer dans la section suivante.

5.10.4.5 Utilité moyenne des PUs

La figure 5.17 trace la variation de l'utilité des PUs en fonction du nombre de TCMs. Nous observons, d'après cette figure que le nombre de TCMs n'a pas d'influence sur l'utilité des PUs également, ceci s'explique par le fait que l'utilité des PUs dépend seulement du PPS_{max} des TCMs et des offres des TCMs gagnants, comme le montre l'équation (5.10).

De plus, les résultats de comparaison confirment que *LASMA* est plus avantageuse en termes d'utilité pour les PUs par rapport à l'enchère classique, vu qu'ils reçoivent des offres plus intéressantes grâce à l'algorithme d'apprentissage.

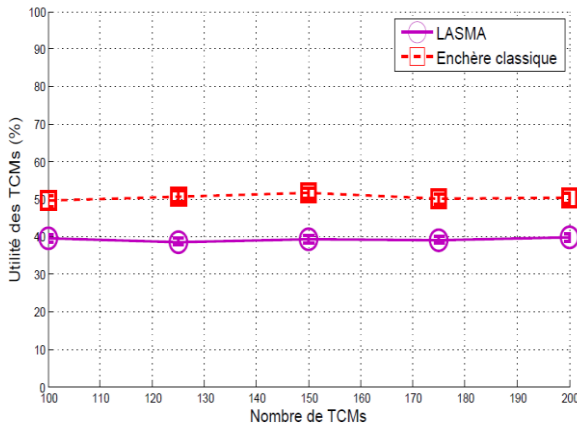


Figure 5.16 Utilité moyenne des TCMs

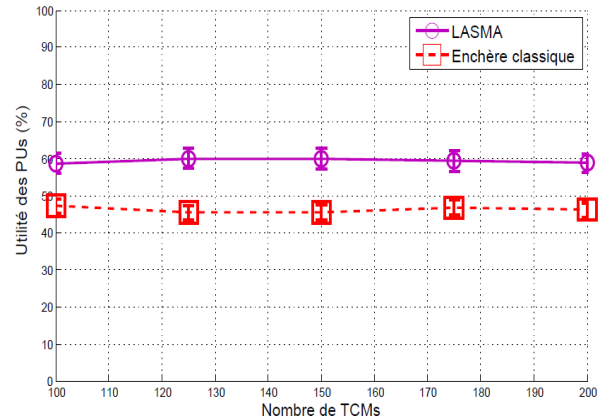


Figure 5.17 Utilité moyenne des PUs

Nous remarquons d'après les deux figures 5.16 et 5.17 que l'apprentissage a un effet inversé sur l'utilité des utilisateurs ; il est plus intéressant pour les PUs en termes de gain puisque les offres des TCMs se sont accrues. La figure 5.18 décrit l'effet du paramètre d'apprentissage ψ sur les utilités des PUs et des TCMs.

Pour ces simulations, le nombre de TCMs est fixé à 125 et le paramètre d'apprentissage varie entre 0.1 et 0.5. Dans la figure 5.18, nous présenterons également les résultats de comparaison entre *LASMA* (où les offres des TCMs sont variables) et le cas où chaque TCM participe avec son PPS_{max} . Cette alternative a pour but de maximiser la chance du TCM d'emporter l'enchère sans passer par l'apprentissage.

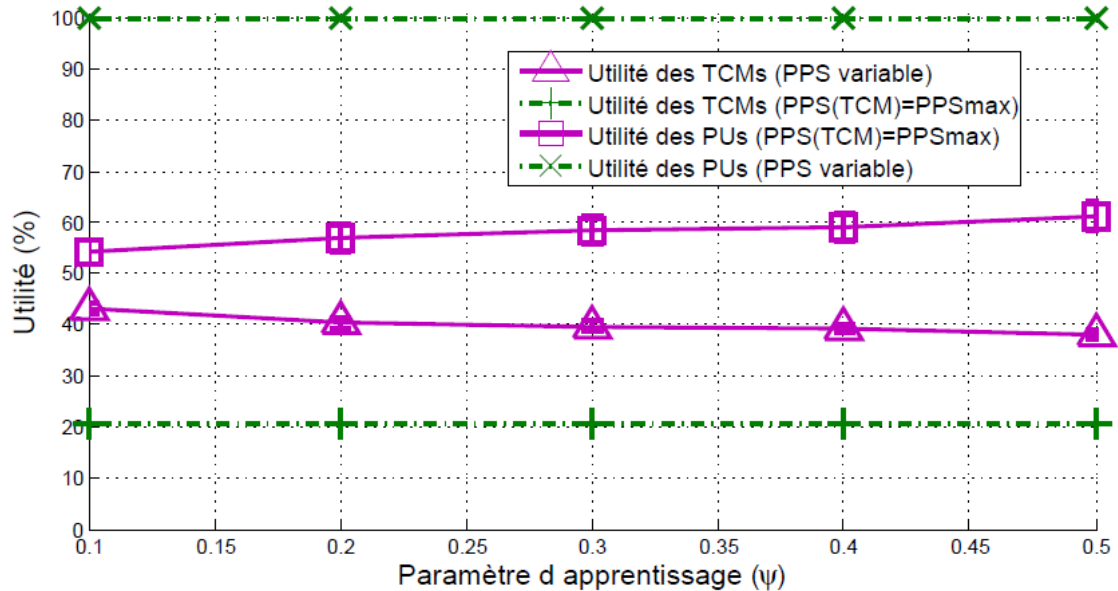


Figure 5.18 Utilité moyenne des utilisateurs en fonction de ψ

La figure 5.18 montre que lorsque ψ augmente, l'utilité des PUs augmente alors que l'utilité des TCMs diminue. Nous observons également que l'utilité des utilisateurs (PUs et TCMs) tend vers les valeurs extrêmes obtenues dans le cas où tous les TCMs participent avec leur PPS_{max} . Effectivement, cette alternative représente le cas idéal pour les PUs vu qu'elle permet d'aboutir à une utilité maximale égale à 1 (cf. équation (5.10)). En contre partie, la valeur de l'utilité des TCMs est la plus basse étant donné que leurs offres sont plus élevées.

5.10.4.6 Pourcentage des TCMs servis et pourcentage des PUs qui ont alloué leurs bandes

Les figures 5.19 et 5.20 représentent, respectivement, le pourcentage de TCMs servis et le pourcentage des PUs qui parviennent à partager leurs bandes libres en fonction du nombre de TCMs.

Nous remarquons, à travers ces figures, que les deux pourcentages diminuent lorsque le nombre de TCMs augmente. La pente est plus importante dans le cas des TCMs servis car les ressources seront saturées lorsque le nombre de TCMs devient assez élevé par rapport au nombre de PUs (fixé à 100) et ainsi l'accès au spectre devient impossible pour certains TCMs. Par contre, du côté des PUs, ces derniers attribuent leurs bandes aux premiers TCMs proposant les meilleures offres quel que soit le nombre de TCMs, ainsi l'effet de la variation du nombre de TCMs sur le pourcentage de PUs qui ont alloué leurs bandes inutilisées est très faible.

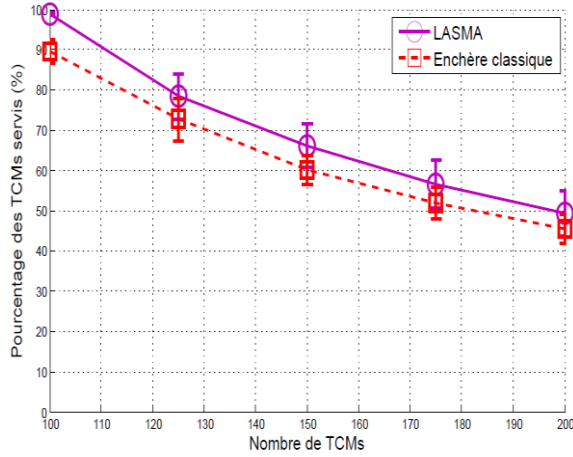


Figure 5.19 Pourcentage de TCMs servis

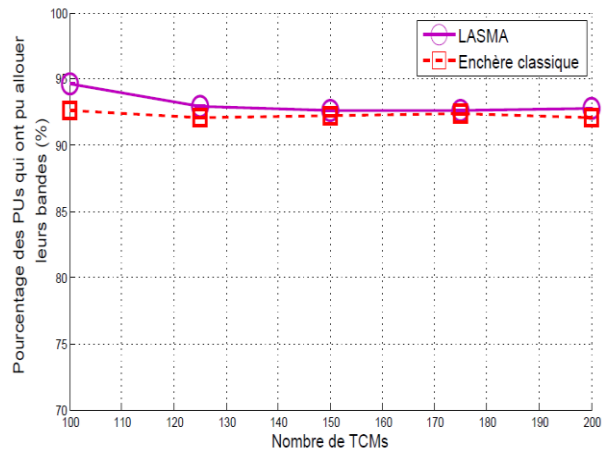


Figure 5.20 Pourcentage des PUs qui ont pu allouer leurs bandes

Par ailleurs, les résultats des figures 5.19 et 5.20 montrent que notre proposition permet d'améliorer le pourcentage d'utilisateurs servis par rapport à l'enchère classique grâce à l'algorithme d'apprentissage proposé. D'une part, les TCMs ayant des PPS initiaux faibles peuvent désormais, avec l'apprentissage, incrémenter leurs offres de façon à pouvoir améliorer leur opportunité d'accès au spectre. Les offres des TCMs peuvent ainsi atteindre les $PPS_{réserve}$ des PUs ou bien dépasser les offres des autres TCMs, ce qui leur permettra de gagner des enchères et d'accéder au spectre. D'autre part, les PUs ayant des $PPS_{réserve}$ très élevés pourraient, grâce à l'algorithme d'apprentissage, allouer leurs bandes puisque les offres des TCMs deviennent plus intéressantes. Par conséquent, le pourcentage des PUs qui parviennent à allouer leurs bandes augmente également.

5.10.4.7 Nombre moyen de messages échangés avant l'accès au spectre

Dans cette simulation, nous avons mesuré le nombre moyen de messages échangés entre les TCMs et les PUs pour l'allocation des bandes de spectre. Nous présentons dans la figure 5.21 la comparaison entre *LASMA* et l'approche d'enchère classique, ainsi que la variation par rapport au nombre de TCMs. Puis, sur la figure 5.22, nous montrons l'influence du paramètre d'apprentissage sur le nombre de messages échangés.

Les résultats de comparaisons présentés dans la figure 5.21 prouvent que l'algorithme d'apprentissage diminue considérablement le nombre moyen de messages échangés entre les utilisateurs puisque les offres des TCMs sont plus efficaces et les TCMs peuvent accéder aux ressources avec moins d'offres. Ce résultat prouve que notre proposition permet de réduire nettement le coût de communication.

Par ailleurs, l'apprentissage est modulé à travers le paramètre ψ , d'où l'intérêt d'étudier l'effet de ce paramètre sur le nombre moyen de messages échangés avant l'accès au spectre. Sur la figure 5.22, nous présentons une comparaison entre notre approche (où les offres des TCMs sont variables), et le cas où les TCMs participent tous avec leur PPS_{max} .

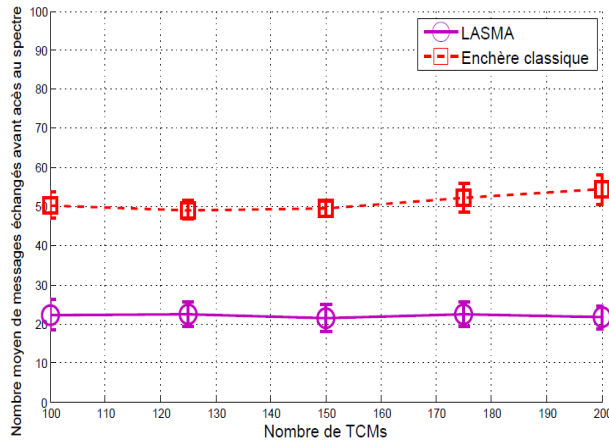
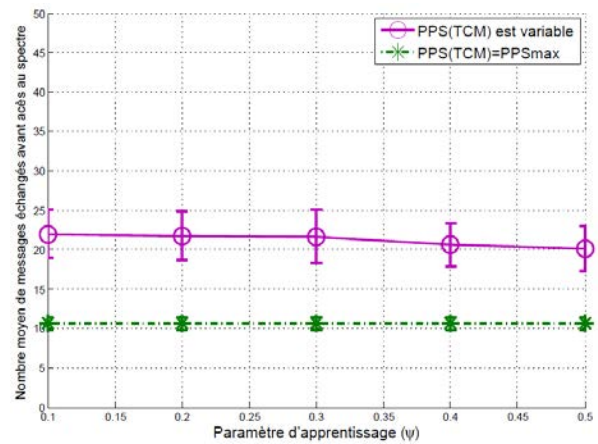


Figure 5.21 Nombre moyen de messages échangés


 Figure 5.22 Nombre moyen de messages échangés en fonction de ψ

Nous remarquons, d'après la figure 5.22, que le nombre de messages échangés avant l'accès au spectre diminue légèrement lorsque le paramètre ψ augmente. Ceci s'explique par le fait que les TCMs incrémentent leurs offres d'une valeur plus importante ce qui leur permet de gagner les enchères plus rapidement avec moins d'offres faites et moins de messages échangés.

Dans le cas où PPS(TCM) est toujours égal à PPS_{max}, le nombre de messages échangés avant l'accès au spectre est presque égal à la moitié du nombre de messages obtenu avec LASMA (~10 messages seulement). Cependant, malgré l'intérêt du résultat obtenu, il n'est pas possible d'adopter le cas où les TCMs proposent tous la même offre maximisée (PPS_{max}) car ceci ne reflète pas la réalité et en plus le choix entre les TCMs sera aléatoire et ne correspond plus à une enchère, sans oublier le fait que cette alternative n'est pas du tout avantageuse pour les TCMs.

5.10.4.8 Nombre moyen de tentatives avant l'accès au spectre

Nous avons mesuré le nombre moyen de tentatives avant l'accès au spectre tel qu'il est présenté dans l'équation (5.13). D'abord, nous avons tracé sa variation selon le nombre de TCMs, en considérant que ψ est variable (cf. figure 5.23). Ensuite, nous avons étudié l'effet du paramètre d'apprentissage sur ce résultat en fixant le nombre de TCMs à 125 (cf. figure 5.24).

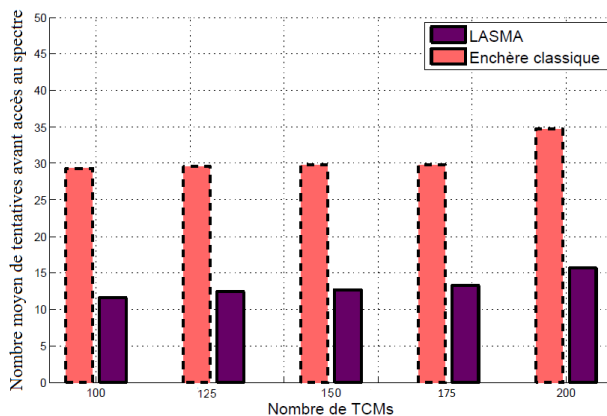
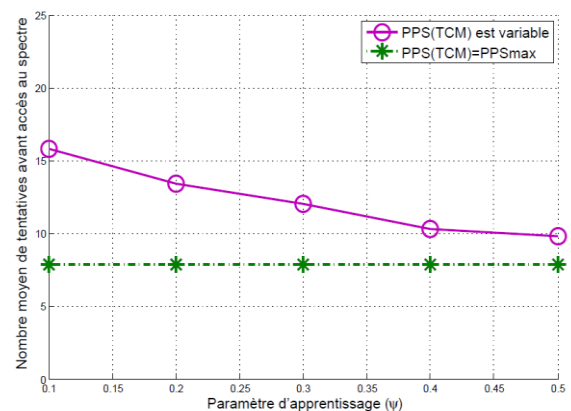


Figure 5.23 Nombre moyen de tentatives en fonction du nombre de TCMs


 Figure 5.24 Nombre moyen de tentatives avant l'accès au spectre en fonction de ψ

Nous observons, à travers la figure 5.23, que le nombre moyen de tentatives avant l'accès au spectre s'accroît légèrement avec l'augmentation du nombre de TCMs vu que la concurrence entre les SUs s'accroît et la probabilité qu'un TCM soit élu comme vainqueur de l'enchère diminue. Par conséquent, les TCMs seront amenés à effectuer plus de tentatives avant l'accès au spectre.

Le résultat le plus intéressant à percevoir depuis la figure 5.23, est la diminution remarquable du nombre moyen de tentatives avant l'accès au spectre grâce à l'algorithme d'apprentissage. En effet, *LASMA* permet de réduire de deux tiers le nombre moyen de tentatives par rapport à celui obtenu avec l'enchère classique. Ce résultat montre encore une fois l'intérêt et l'apport significatif de l'algorithme d'apprentissage proposé.

Par ailleurs, nous avons étudié l'influence du paramètre d'apprentissage ψ sur le nombre de tentatives, comme présenté sur la figure 5.24 sur laquelle nous pouvons facilement observer que le nombre moyen de tentatives avant l'accès au spectre diminue considérablement lorsque le paramètre d'apprentissage ψ augmente. Ceci s'explique par le fait que les offres des TCMs atteignent les $PPS_{réserve}$ des PUs plus rapidement ce qui permet d'augmenter les chances de remporter les enchères. Ce résultat prouve l'efficacité de l'algorithme d'apprentissage proposé. La figure 5.24 montre également que lorsque ψ augmente, le nombre moyen de tentatives avant l'accès au spectre tend vers le résultat obtenu par l'alternative où $PPS(TCM)=PPS_{max}$, ce qui était évidemment attendu.

5.10.4.9 Délai moyen de handover

La figure 5.25 trace la variation du délai moyen de handover en fonction du nombre de TCMs ainsi que la comparaison entre *LASMA* et l'enchère classique.

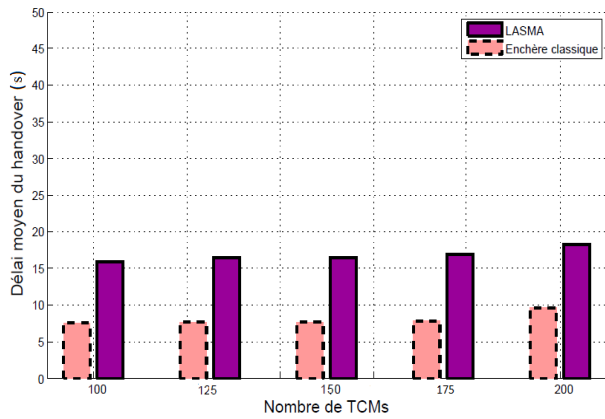


Figure 5.25 Délai moyen du handover

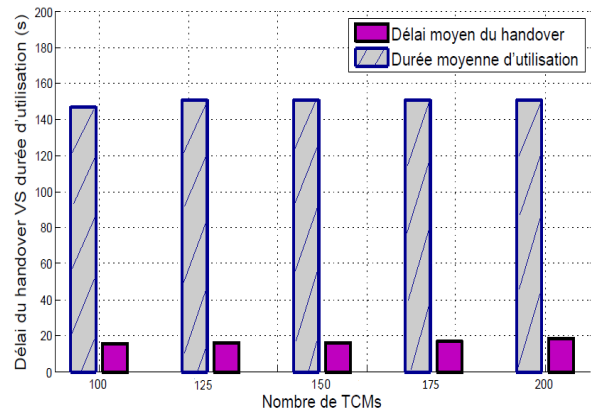


Figure 5.26 Délai moyen du handover VS durée moyenne d'utilisation

Nous observons à travers la figure 5.25 que le délai moyen de handover est légèrement supérieur avec notre proposition. L'apprentissage permet d'augmenter le nombre de TCMs réussissant à accéder au spectre, ce qui implique plus d'allocations de bandes, moins de PUs disponibles et ainsi plus de temps pour la libération des canaux après utilisation. Par conséquent, les TCMs auront besoin d'un délai supplémentaire pour trouver une bande libre et accéder au spectre. De même, le délai moyen du handover augmente en fonction du nombre de TCMs vu que la disponibilité des ressources devient limitée.

Nous remarquons, à partir de la figure 5.25, que le délai moyen de handover est relativement élevé avec *LASMA* vu que les TCMs n'abandonnent pas leurs attentes d'appels d'offres et leurs demandes d'accès au spectre au bout d'un certain temps, ce qui augmente la probabilité de rester en attente pendant un temps important notamment lorsque le réseau est surchargé. Néanmoins, l'intégration d'un temps limite d'abandon peut engendrer un problème de pénurie au niveau de l'utilisation de spectre particulièrement lorsque le nombre de désistements est élevé.

Par ailleurs, d'après la figure 5.26, le délai moyen d'attente avant l'accès au spectre reste raisonnable par rapport à la durée moyenne d'utilisation des ressources sachant que *LASMA* permet d'obtenir un taux moyen d'utilisation de spectre élevé d'environ 94% (cf. Figure 5.13).

Il découle de ce qui précède que *LASMA* garantit un bon fonctionnement du système et permet d'améliorer les performances du handover grâce aux deux contributions majeures qui sont la prise en considération de la fréquence et l'algorithme d'apprentissage. Nous avons montré, à travers les simulations et les comparaisons, que notre proposition permet de garantir une exploitation importante du spectre, de diminuer le taux moyen de handover spectral et de réduire le nombre moyen de tentatives avant l'accès au spectre ainsi que le coût de communication en termes de messages échangés. En revanche, *LASMA* reste couteuse en termes de délai de handover qui est une conséquence logique d'une occupation plus importante des canaux. Dans la section suivante, nous comparerons nos deux propositions *LASMA* et *NESAM*.

5.11 Comparaison de NESAM avec LASMA

Nous avons proposé deux solutions pour la gestion dynamique du spectre et la gestion de la mobilité des terminaux à radio cognitive en utilisant les systèmes multi-agents. La première approche, *NESAM*, est basée sur la négociation et la deuxième, *LASMA*, est basée sur les enchères et l'apprentissage. Dans cette section, nous effectuerons une comparaison par simulation des deux approches.

D'après les analyses précédentes (sections 4.7.3 et 5.10.4), nous remarquons que les deux propositions assurent une utilisation très importante du spectre, qui est quasiment la même dans les deux cas. Par ailleurs, la négociation est plus avantageuse en termes de délai du handover puisque le TCM lance la demande de spectre dès qu'il se rapproche d'une nouvelle zone de connexion, à l'opposé du cas des enchères où le TCM reste en attente d'appels d'offres afin de pouvoir prétendre à l'accès au spectre. De plus, *NESAM* garantit une utilité meilleure pour les TCMs car ces derniers ont la possibilité de négocier pour diminuer le prix, ou augmenter la durée d'utilisation. Alors que dans le cas des enchères, l'utilité des PUs est plus intéressante puisqu'un PU attribue ses bandes au TCM le plus offrant, ce qui implique l'augmentation de l'utilité des PUs et la baisse de celle des TCMs.

Afin de valider ces constatations, nous avons effectué des simulations pour la comparaison entre les deux propositions en termes de coût de communication, de taux moyen de handover fréquentiel, de l'utilité des utilisateurs et de délai moyen de handover, comme le montrent les figures 5.27 jusqu'à 5.32. Nous considérons les paramètres de simulation donnés dans le tableau 4.3.

La figure 5.27 décrit l'utilité des utilisateurs primaires et secondaires en fonction du nombre de TCMs. Cette figure montre que *NESAM* garantit une utilité meilleure pour les TCMs alors que *LASMA* est plus avantageuse pour les PUs. Ce résultat attendu s'explique par le fait que *NESAM* permet aux TCMs de négocier le prix ou la durée d'utilisation de façon à diminuer leur prix par seconde (PPS) pour l'accès au spectre. Inversement, dans *LASMA*, les TCMs ont intérêt à augmenter leurs offres afin de remporter les enchères et accéder au spectre.

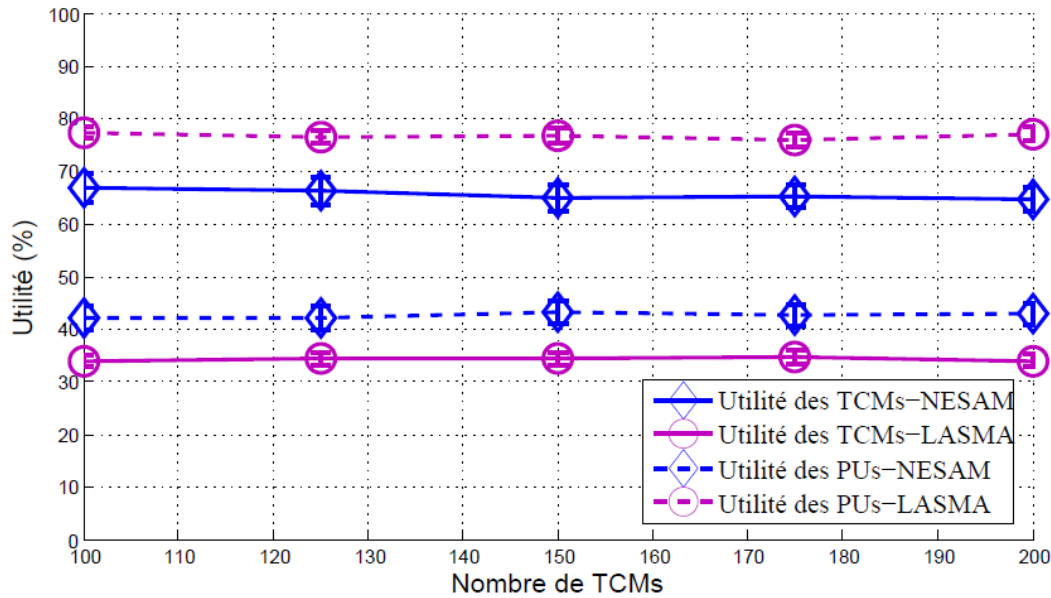


Figure 5.27 *NESAM* vs *LASMA* en termes d'utilité

Dans la même perspective de comparaison en termes de satisfaction des utilisateurs, nous comparons les deux approches *NESAM* et *LASMA* en termes de pourcentage de TCMs servis et pourcentage de PUs qui ont alloué leurs bandes libres, tel que présenté sur les figures 5.28 et 5.29, respectivement.

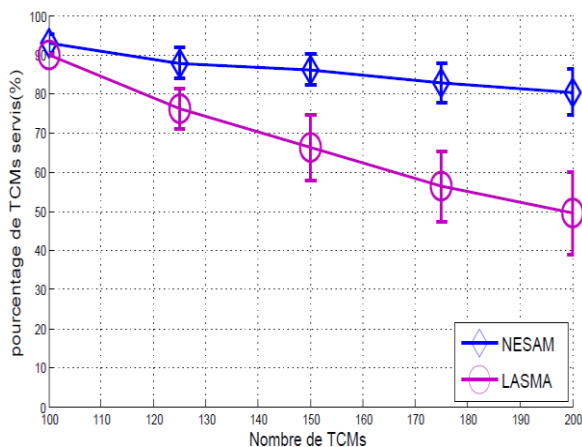


Figure 5.28 *NESAM* vs *LASMA* en termes de pourcentage de TCMs servis

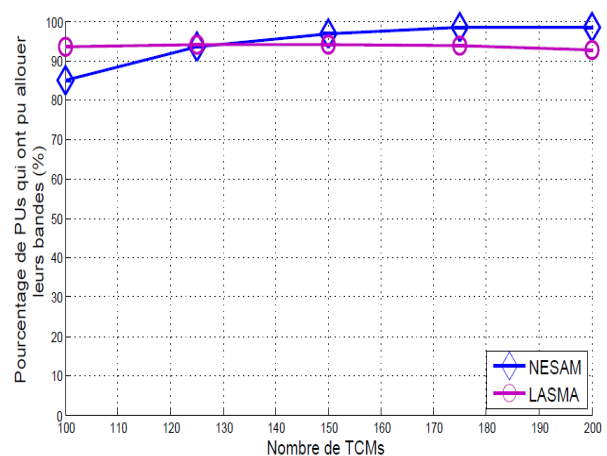


Figure 5.29 *NESAM* vs *LASMA* en termes de pourcentage de PUs allouant leurs bandes

Nous remarquons à travers les résultats de la figure 5.28 que *NESAM* satisfait un nombre plus important de TCMs. Les PUs, avec *LASMA*, ont tendance à choisir les mêmes

TCMs proposant les offres les plus élevées, ce qui fait que le nombre de TCMs accédant au spectre est moins élevé que celui de *NESAM*.

Par ailleurs, la figure 5.29 montre que le pourcentage de PUs qui ont réussi à allouer leurs bandes libres, dans le cas de *LASMA*, est meilleur lorsque le nombre de TCMs n'est pas très élevé par rapport au nombre de PUs existants. Cependant, à partir de 125 TCMs (vs 100 PUs), *NESAM* satisfait un nombre plus important de PUs. En fait, avec *NESAM* le pourcentage de PUs qui allouent leurs bandes augmente en fonction du nombre de TCMs jusqu'à atteindre 99% puisque l'attribution des bandes se fait au fur et à mesure de l'arrivée des TCMs. Cependant, pour *LASMA*, ce pourcentage reste quasi constant quel que soit le nombre de TCMs puisque les PUs attribuent leurs bandes libres aux TCMs proposant les meilleures offres.

Dans les deux simulations suivantes, nous comparerons les performances de handover obtenues avec *NESAM* et *LASMA*. Nous commencerons par le taux moyen de handover fréquentiel, comme le montre la figure 5.30. Puis, nous étudierons le délai moyen de handover, tel que présenté sur la figure 5.31.

Nous observons, à travers la figure 5.30, que *NESAM* réduit davantage le taux moyen de handover fréquentiel, ce qui montre que le mécanisme de prise en considération de la fréquence est plus efficace avec l'approche *NESAM* que *LASMA*. En effet, dans le cas de *NESAM*, le TCM choisit, lui-même, le PU proposant la bande la plus adéquate à ses besoins et ainsi il a plus de chance de retrouver le PU_{sf} dans la liste des PUs disponibles et qui répondent à sa demande. Par contre, avec *LASMA*, le TCM reste en attente de réception d'appels d'offres et maximise son offre si le déclencheur de l'enchère est le PU_{sf} , ce qui est moins probable.

Par ailleurs, la figure 5.31 montre que *NESAM* assure un délai d'attente nettement inférieur à celui produit par *LASMA*. Ce résultat s'explique par le fait que les TCMs évitent des délais d'attente supplémentaires, comme le temps d'attente de réception des appels d'offres et le temps d'attente pour être élu comme gagnant de l'enchère, qui se produisent lors de l'enchère avec *LASMA*. En effet, avec *NESAM*, le TCM choisit directement la bande de spectre adéquate dès qu'il se rapproche d'une nouvelle zone de connexion et commence le partage avec un des PUs existants, par contre avec *LASMA*, il peut rester bloqué pour une longue durée avant d'accéder au spectre à cause d'un $PPS_{initial}$ assez faible.

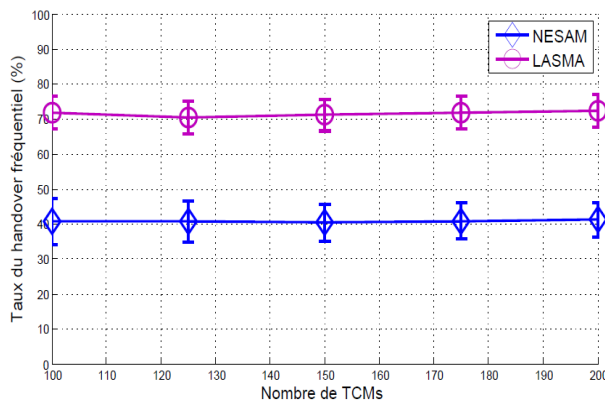


Figure 5.30 *NESAM* vs *LASMA* en termes du taux de handover fréquentiel

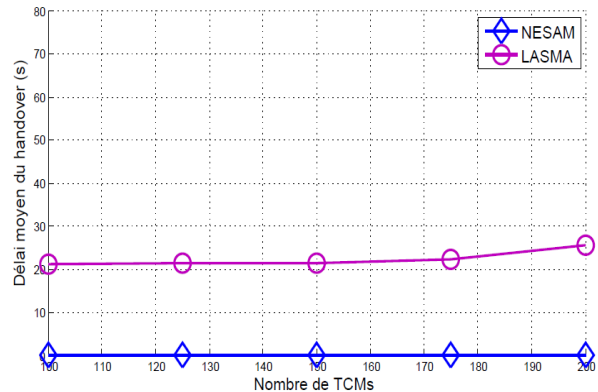


Figure 5.31 *NESAM* vs *LASMA* en termes de délai moyen de handover

Finalement, nous comparons *NESAM* et *LASMA* en termes du nombre moyen de messages échangés avant l'accès au spectre. Nous observons à travers cette comparaison, présentée sur la figure 5.32, que *NESAM* garantit moins d'échanges de messages bien qu'elle utilise des messages supplémentaires pour la phase de négociation. Avec l'approche *LASMA*, le nombre de messages échangés dépend essentiellement du nombre d'offres reçues et du nombre de relances d'enchères suite à des acquittements négatifs qui peuvent multiplier ces échanges. Pour *NESAM*, le nombre de messages échangés est dépendant du nombre de réponses reçues de la part des PUs (suite à chaque demande de bande) et du nombre de tentatives de négociation avant l'atteinte d'un accord. Le nombre de réponses des PUs (dans le cas de *NESAM*) est au maximum égal à 100 alors que le nombre d'offres reçues de la part des TCMs (dans le cas de *LASMA*) peut atteindre le nombre maximal de TCMs dans le système qui varie entre 100 et 200. Nous remarquons d'après la figure 5.32 que dans le cas où le nombre de TCMs est égal au nombre de PUs (égal à 100), on obtient quasiment le même nombre de messages échangés pour les deux propositions. Lorsque le nombre de TCMs s'accroît, l'écart entre *NESAM* et *LASMA* en termes de nombre de messages échangés augmente.

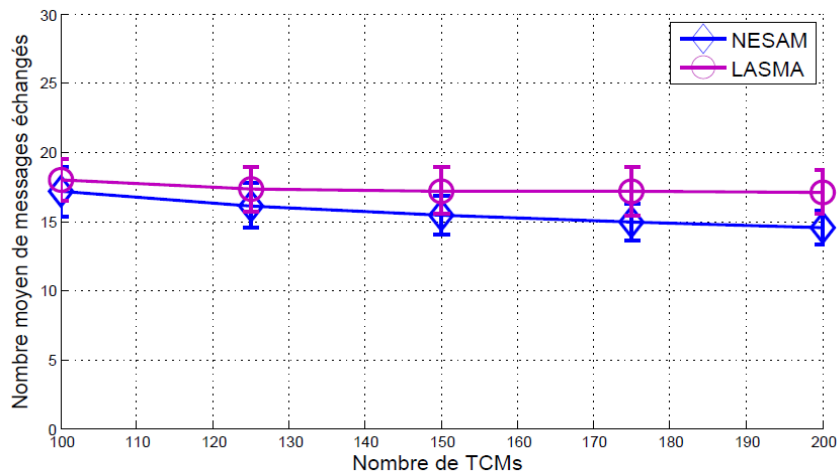


Figure 5.32 *NESAM* vs *LASMA* en termes de nombre de messages échangés

Pour résumer, L'enchère représente une approche intéressante du point de vue déploiement puisque dans un système réel elle est plus simple à mettre en place par les opérateurs (correspondant aux PUs). De plus, elle est plus rentable pour ces derniers étant donné qu'elle offre une utilité très importante aux PUs, ce qui explique l'intérêt que lui réserve une grande majorité de chercheurs. Néanmoins, les études que nous avons élaborés, dans cette thèse, ont montré que la négociation offre concrètement de meilleurs résultats selon la plupart des critères de performances étudiés, à savoir l'utilité des TCMs, le délai moyen de handover, le nombre moyen de messages échangés et le taux moyen de handover fréquentiel.

5.12 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation de notre deuxième proposition *LASMA* pour la gestion du spectre et du handover dans un réseau mobile à radio cognitive en se basant sur les enchères multi-agents.

Au début de ce chapitre, nous avons détaillé les comportements des SUs et des PUs, puis nous avons introduit les deux principales contributions de cette proposition qui sont la prise en considération de la fréquence et l'algorithme d'apprentissage. Tout au long de cette présentation de *LASMA*, nous avons illustré nos algorithmes par des exemples explicatifs. De plus, nous avons défini deux types d'allocation de spectre qui peuvent être adoptés par les PUs lors de l'attribution des bandes et nous avons étudié la différence entre ces deux méthodes afin d'adopter celle qui donne les meilleures performances pour notre proposition.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons évalué les performances de *LASMA* selon différents critères. Les résultats de simulation ont montré que notre proposition permet de garantir une exploitation importante du spectre et une utilité intéressante pour les PUs. Elle permet également de réduire le taux moyen de handover fréquentiel et le taux moyen de blocage. En plus, nous avons montré l'apport significatif de l'algorithme d'apprentissage sur le fonctionnement de *LASMA* en termes de nombre moyen de tentatives et d'opportunité d'accès au spectre. Nous avons prouvé également que *LASMA* permet d'assurer un coût de communication faible en termes de messages échangés et un délai de handover acceptable.

A la fin de ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la comparaison de *LASMA* avec notre première proposition *NESAM* basée sur la négociation. En se basant sur différentes métriques, les résultats de comparaison ont montré que *NESAM* est généralement meilleure, cependant *LASMA* reste également intéressante parce qu'elle permet de garantir une meilleure rentabilité pour les PUs et peut être plus facilement déployée par les opérateurs.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

La radio cognitive est une technologie prometteuse en termes d'exploitation du spectre radio. Elle a été récemment proposée afin d'améliorer le débit et la qualité de service offerts aux utilisateurs et représente un excellent moyen pour optimiser l'allocation du spectre. Cette technologie permet à un terminal d'acquérir une connaissance de son environnement radio et d'avoir une capacité d'apprentissage et d'adaptation. Les terminaux à radio cognitive sont ainsi capables de détecter les parties inutilisées du spectre et d'adapter leurs caractéristiques de transmission pour utiliser les bandes libres.

Depuis une dizaine d'années, les chercheurs ont donné beaucoup d'intérêt à l'étude de cette nouvelle technologie. Cependant, l'accès dynamique au spectre dans un système à radio cognitive soulève plusieurs défis notamment la détection des bandes de spectre libres, le partage équitable des ressources, la gestion des conflits et des interférences et la gestion de la mobilité des utilisateurs. Chaque communauté de recherche focalise ses études sur l'une de ces problématiques afin d'aboutir à une gestion efficace du spectre. Néanmoins, certaines thématiques primordiales au bon fonctionnement de cette technologie ne sont pas encore suffisamment étudiées comme la gestion du handover spectral et la gestion de la mobilité des terminaux qui rend la tâche de gestion des ressources spectrales plus complexe.

Dans cette thèse, nous avons proposé deux solutions de gestion dynamique du spectre combinant l'allocation des ressources avec la mobilité des terminaux à radio cognitive. La première approche est basée sur la négociation multi-agents (appelée *NESAM*) alors que la deuxième est basée sur l'enchère et l'apprentissage (appelée *LASMA*). Nos deux propositions opèrent au niveau applicatif et visent à produire un système de tarification réaliste pour l'accès au spectre.

NESAM définit un algorithme qui permet de corréler la mobilité des utilisateurs avec les négociations pour le partage dynamique du spectre. Elle se base sur l'implémentation d'un agent au sein de chaque nœud du réseau. Chaque agent radio cognitive (TCM) déclenche le processus de handover dès qu'il s'approche d'une nouvelle zone de transmission. Ainsi, il communique avec les agents primaires existants (PUs) afin de s'informer sur l'état du spectre et les tarifs d'allocation des bandes. Par la suite, le TCM choisit le PU offrant la bande la plus

adéquate à ses besoins : d'une part, il essaie de conserver sa bande de fréquences afin de minimiser le nombre de handovers spectraux lors de ses déplacements, et d'autre part il tente de se voir attribuer le spectre avec le meilleur prix pour la durée qu'il envisage de l'utiliser. Le TCM peut lancer une démarche de négociation avec le PU dans le cas où les tarifs proposés ne lui conviennent pas. Cette négociation a pour objectif de réduire le prix du spectre alloué ou de prolonger la durée de son utilisation.

D'un autre côté, *LASMA* représente une deuxième alternative pour l'accès au spectre et la gestion de la mobilité, où les processus d'allocation et de gestion du handover sont modélisés par des enchères entre les PUs et les SUs mobiles (TCMs). Chaque PU ayant des sous-bandes libres joue le rôle d'un commissaire-priseur qui lance un appel d'offres pour l'allocation de ses bandes inutilisées. Les SUs correspondent aux enchérisseurs et essaient de présenter leurs offres jusqu'à ce qu'ils soient élus comme gagnants et puisse accéder au spectre. Dans cette approche également, les TCMs essaient de conserver la fréquence courante afin de minimiser le nombre de handovers spectraux lors de leurs déplacements. Aussi, le processus d'enchère que nous proposons dans *LASMA* intègre un algorithme d'apprentissage afin d'améliorer l'efficacité de l'enchérissement et d'accélérer l'attribution des bandes aux TCMs.

Afin d'évaluer les performances de nos propositions, nous avons opté pour la simulation à événements discrets. À travers les résultats obtenus, *NESAM* a montré une optimisation remarquable de l'exploitation du spectre et une amélioration considérable de l'utilité des utilisateurs à radio cognitive, tout en assurant la satisfaction des utilisateurs primaires. Cette amélioration est obtenue grâce au mécanisme de négociation que nous avons défini. Par ailleurs, nous avons prouvé que *NESAM* réduit de manière significative le nombre de handovers spectraux et garantit de faibles délais de handover lors des transitions entre les différents réseaux. Nous avons aussi montré que notre solution réduit le taux de blocage du handover, ce qui permet d'éviter les interruptions de service lors de la mobilité des nœuds. Enfin, le coût de communication en termes de messages échangés est vraiment faible avec *NESAM*.

LASMA a également montré de très bonnes performances. En effet, elle permet de garantir une exploitation importante du spectre et une utilité intéressante pour les PUs. Elle réduit le taux moyen de blocage et le taux moyen de handovers fréquents grâce à la prise en considération de la fréquence lors de la participation aux enchères. En plus, nous avons montré que l'algorithme d'apprentissage proposé constitue un apport significatif sur le fonctionnement de *LASMA* en termes de nombre moyen de tentatives et d'opportunités d'accès au spectre. *LASMA* permet également de garantir un coût de communication faible en termes de nombre de messages échangés.

La comparaison effectuée entre *NESAM* et *LASMA* prouve que les deux propositions contribuent à une amélioration au niveau de l'exploitation du spectre et garantissent de très bonnes performances de handover. Par ailleurs, *NESAM* permet d'obtenir de meilleurs résultats en termes de délai de handover, de coût de communication et d'utilité pour les TCMs. *LASMA*, plus proche de la réalité, permet de garantir une meilleure utilité pour les PUs.

Une partie des travaux décrits dans ce rapport a donné lieu à plusieurs publications : [97] [98] [99] [100] [101] [150] [151] [161]. Pour le reste du travail, nous nous sommes fixés plusieurs perspectives qui visent à améliorer et enrichir nos propositions, que nous détaillerons dans la section suivante.

Perspectives

Dans la continuité de ce travail, nous envisageons: (1) à court terme, d'optimiser nos algorithmes, (2) à moyen terme, de faire une évaluation par modélisation mathématique; et (3) à long terme, de faire une étude de cas et une validation expérimentale des deux propositions.

Par ailleurs, nous trouvons qu'il est important de spécifier un modèle de mobilité plus général et relâcher l'hypothèse de déplacement linéaire des utilisateurs. Nous étudierons, par la suite, l'effet de la vitesse et du modèle de mobilité sur le délai du handover et sur la continuité de service lors des déplacements des TCMs. En plus, la répartition de l'espace en zones semble limitative et il sera intéressant de tenir compte de la distance et des portées de transmission des nœuds durant le processus de décision et de sélection des bandes.

Aussi, nous comptons traiter les autres cas de figures que peut rencontrer le terminal mobile lors de son déplacement, comme par exemple le cas où le spectre est occupé par des SUs uniquement. Dans ce cas, nous pensons intégrer un mécanisme de coopération entre le TCM et les autres SUs afin d'avoir un partage équitable du spectre.

En termes d'optimisation, nous suggérons d'utiliser des algorithmes génétiques afin de trouver les valeurs optimales des seuils α et β pour l'approche *NESAM* et trouver la meilleure valeur du paramètre d'apprentissage ψ dans le cas de la proposition *LASMA*.

Au niveau de l'approche *NESAM*, une amélioration qui nous paraît prometteuse est de modifier le comportement de négociation du PU afin de maximiser ses chances d'aboutir à un accord avec les SUs. En effet, il est plus pertinent que le PU vérifie s'il y a d'autres demandes intéressantes avant de refuser catégoriquement la nouvelle offre du TCM lors de la négociation. Dans ce cas, le PU pourra relancer le TCM, avec lequel il est en train de négocier en lui faisant une nouvelle proposition de prix ou de durée. Pour cela, deux alternatives sont possibles : (1) utiliser l'argumentation en se référant à l'historique d'échanges avec les SUs, (2) se baser sur les heuristiques. Nous proposons également d'intégrer un algorithme d'apprentissage au sein des agents TCMs pour améliorer le processus de sélection de la bande de PU la plus adéquate, en privilégiant par exemple, les PUs avec lesquels des accords ont été établis au préalable.

Au niveau de l'approche *LASMA*, nous comptons établir un compromis entre l'utilisation du spectre et l'intégration d'un temps limite d'attente d'appels d'offres de la part des PUs, au bout duquel le TCM abandonne la demande d'accès au spectre, dans le but de diminuer les délais de handover engendrés par l'enchère.

Il nous semble aussi intéressant de proposer d'autres stratégies d'apprentissage pour l'agent TCM lors de l'enchérissement et de choisir la plus performante. Par exemple, nous comptons étudier le cas où le TCM tient compte de la valeur de l'offre avec laquelle il a pu

remporter une enchère et commencer par cette valeur lors de ses prochains enchérissements. L'intégration d'un processus d'apprentissage au niveau du PU semble aussi une extension intéressante.

Afin de mieux évaluer et valider nos propositions, nous prévoyons trois principales orientations : (1) comparaison avec d'autres approches de la littérature telles que les approches coopératives utilisant les réseaux contractuels et la formation de coalitions ; (2) validation par des modélisations mathématiques à travers des chaînes de Markov; (3) validation expérimentale à travers une étude de cas en utilisant une plateforme réelle.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

BTS : Base Tranceiver Station
CCC: Common Control Channel
CDMA: Code division multiple access
CNP : Contract Net Protocol
CRN: Cognitive Radio Network
DSA: Dynamic Spectrum Access
FCC: Commission Fédérale de Communication
FPSB : First Price Sealed Bit
GSM : Global System for Mobile Communication
IA: Intelligence artificielle
IAD: l'intelligence artificielle distribuée
IP : Internet Protocol
KS: Knowledge Source
MAC: Medium Access Control
NE: Nash Equilibrium
NP: Nondeterministic Polynomial time
PU: Primary User
QoS: Quality of Service
RC: Radio Cognitive
RL: Reinforcement Learning
RSS : Received Signal Strength
SMA : Systèmes Multi Agents
SNR : Signal to Noise Ratio
SU: Secondary User
TVWS: TV White Space
UMTS : Universal Mobile Telecommunications System.

LISTE DES PUBLICATIONS

Revue internationale avec comité de lecture (1)

1. **E. Trigui**, M. Esseghir et L. Merghem Boulahia, "On using Multi-Agent Systems in Cognitive Radio Networks: A survey," *International Journal of Wireless and Mobile Networks (IJWMN)*, 2012, vol.4, n°6, pp 1 - 16.

Conférences internationales avec actes et comité de lecture (5)

1. **E. Trigui**, M. Esseghir et L. Merghem Boulahia, "Cognitive Radio Spectrum Assignment and Handoff Decision," *24th annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (IEEE PIMRC'13)*, London, UK, 8-11 Septembre 2013.
2. **E. Trigui**, M. Esseghir et L. Merghem Boulahia, "Spectrum Handoff Algorithm for Mobile Cognitive Radio Users based on agents' Negotiation", *9th IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (IEEE WiMob'13)*, Lyon, France, 7-9 Octobre 2013.
3. **E. Trigui**, M. Esseghir et L. Merghem Boulahia, "A Mobility Schema for Cognitive Radio Networks," *12th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (MED-HOC-NET'13)*, Ajaccio, Corsica, France, 24 -26 juin 2013.
4. **E. Trigui**, M. Esseghir et L. Merghem Boulahia, "Multi-Agent Systems Negotiation Approach for Handoff in Mobile Cognitive Radio Networks," *IEEE International Conference on New Technologies, Mobility and Security (IEEE NTMS'12)*, Istanbul, 7-10 Mai 2012, pp 1-5.
5. **E. Trigui**, M. Esseghir et L. Merghem Boulahia, "Spectrum Access during Cognitive Radio Mobiles' Handoff," *International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC'11)*, Luxembourg, 19 - 24 Juin 2011, pp 221-224.

Conférence nationale avec acte et comité de lecture (1)

1. **E. Trigui**, M. Esseghir et L. Merghem Boulahia, “Gestion dynamique du spectre entre terminaux radio cognitive mobile,” *Colloque Francophone sur l’Ingénierie des Protocoles (CFIP’11)*, Sainte Maxime, France, 10 - 13 Mai 2011.

Revues internationales avec comité de lecture en cours de soumission (2)

1. **E. Trigui**, M. Esseghir et L. Merghem Boulahia, “NESAM : Negotiation based approach for Spectrum Access and Mobility management in cognitive radio networks,” en cours de soumission.
2. **E. Trigui**, M. Esseghir et L. Merghem Boulahia, “Realistic Implementation of Learning based Auction for Channel Selection in Mobile Cognitive Radio Networks,” en cours de soumission.

RÉFÉRENCES

- [1] ET Docket 03-222 “Notice of proposed rule making and order.” FCC, Décembre 2003.
- [2] J. Mitola, “Cognitive radio architecture : The Engineering Foundations of Radio XML Link”, John Wiley and Sons, 2006.
- [3] I.F. Akyildiz, W-Y. Lee, M.C. Vuran et S. Mohanty, “Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey”, *Computer Networks*, 2006, vol.50, n°13, pp. 2127–2159.
- [4] S. Haykin, “Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Février 2005, vol. 23, pp. 201–220.
- [5] Q. Zhao et B.M. Sadler, “A survey of dynamic spectrum access: signal processing, networking, and regulatory policy”, *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 4, n°3, 2007, pp.79-89.
- [6] J. Mitola III, “Cognitive radio for flexible mobile multimediacommunication”, *IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications (MoMuC)*, Novembre 1999, pp. 3–10.
- [7] J. Mitola, “*Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio*”, PhD thesis, Institut de Technologie royale (KTH), Suède, Mai 2000.
- [8] X. M. Margaret, “*La cognition : une introduction à la psychologie cognitive*”, traduction par Alain Brossard, De Boeck, Belgique, 2001.
- [9] T. W Malone, “Organizing information processing systems: parallels between human organizations and computer systems”, *Cognition, Computation and Cooperation*, 1990, p.56-86.
- [10] ET Docket N° 04-186, “The FCC’s Office of Engineering and Technology Releases Report On Tests of Prototype TV White Space DEVICES (Executive Summary)”, Octobre 2008.
- [11] I.F. Akyildiz, W-Y Lee, MC. Vuran & S. Mohanty, “A survey on spectrum management in cognitive radio networks”, *IEEE Communications Magazine*, 2008, vol. 46, pp. 40-48.
- [12] W. Ejaz, N. ul Hasan, S. Lee, H-S. Kim, “I3S: Intelligent spectrum sensing scheme for cognitive radio networks”, *Eurasip Journal on Wireless Communications and networking*, 2013.
- [13] F. Moghimi, R. Schober, R.K. Mallik, “Hybrid Coherent/Energy Detection for Cognitive Radio Networks”, *IEEE Transaction on wireless communications*, vol.10, n°5, Mai 2011, pp.1594-1605.

- [14] D.C Oh, Y-H. Lee, "Energy Detection Based Spectrum Sensing for Sensing Error Minimization in Cognitive Radio Networks", *International Journal of Communication Networks and Information Security*, vol. 1, no. 1, pp. 1-5, Avril 2009.
- [15] Z. Yaqin, L. Shuying, Z. Nan et W. Zhilu, "A Novel Energy Detection Algorithm for Spectrum Sensing in Cognitive Radio", *Information Technology Journal*, 2010, vol 9, pp. 1659-1664.
- [16] A. Bagwari, G-S. Tomar, "Improved Spectrum Sensing Technique usin Multiple Energy Detectors for Cognitive Radio Networks", *International Journal of Computer Applications*, 2013, vol. 62, n° 4.
- [17] S.S Kalamkar, A. Banerjee, "Improved Double Threshold Energy Detection for Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio", *Defense Science Journal*, 2013, vol.63, pp.34- 40.
- [18] A. Ghasemi et E.S. Sousa, "Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environment", *IEEE Symposia on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Network*, Novembre 2005, pp.131- 136.
- [19] M. E. Sahin, I. Guvenc et H. Arslan, "Uplink user signal separation for OFDMA-based cognitive radios" *EURASIP, Journal on Advances in Signal Processing*, n°3, Janvier 2010.
- [20] A. Bouzegzi, P. Ciblat et P. Jallon, "Matched Filter Based Algorithm for Blind Recognition of OFDM Systems", *IEEE VTC-Fall*, Septembre 2008, pp. 1-5.
- [21] S. Kapoor, S.V.R.K. Rao, et G.Singh, "Opportunistic Spectrum Sensing by Employing Matched Filter in Cognitive Radio Network", *International conference on Communication System and Network Technology (CSNT)*, Juin 2011, pp. 580-583.
- [22] S-A. Ghauri, I-M. Qureshi, M-F. Sohail, S. Alam, M-A. Ashraf, "Spectrum Sensing For Cognitive Radio Networks over Fading Channels", *International Journal of Computer & Electronics Research (IJCER)*, 2013, vol.2, n°1.
- [23] P. Madhusudhanan, J.G Restrepo, Y. Liu, K. Baker, "Modeling of Interference from Cooperative Cognitive Radios for Low Power Primary Users », *IEEE Telecommunication Conference (GLOBECOM)*, Décembre 2010, USA, pp. 1-6.
- [24] I-F. Akyldiz, B-F. Lo, R. Balakrishnan, "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey", *Journal Physical Communication*, 2011, vol.4, n°1, pp. 40-62.
- [25] K. Kalimuthu, R. Kumar, "A study analysis of cooperative spectrum senisng in cognitive radio networks", *International Conference on Communication and Electronics System Design*, 2013, vol. 8760.
- [26] A. Benslimane, A. Ali, A. Kobbane, T. Taleb, "A new Opportunistic MAC Layer Protocol for Cognitive IEEE 802.11-based Wireless Networks", *IEEE 20th Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2009)*, Tokyo, Septembre 2009, p. 2181-2158.
- [27] A. De Domenico, E. Calvanese Strinati, M.G Di Benedetto, "A Survey on MAC Strategies for Cognitive Radio Networks", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2012, vol. 14, n°1, pp.21-44.

- [28] X. Zhang, S. Hang, “CREAM-MAC: Cognitive Radio-Enabled Multi-Channel MAC Protocol Over Dynamic Spectrum Access Networks”, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, February 2011, vol. 5, n°1, pp.110-123.
- [29] K-C. Huang, X. Jing et D. Raychaudhuri, “MAC protocol adaptation in cognitive radio networks: an experimental study”, *International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, 2009, pp.1-6.
- [30] L. Ma, X. Han et C-C. Shen, “Dynamic open spectrum sharing MAC protocol for wireless ad hoc networks”, *IEEE DySPAN Symposia on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Network*, 2005, pp. 203-213.
- [31] Mo. Jeonghoon, H.-S.W. So, et J. Walrand, “Comparison of multi-channel MAC protocols”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, vol. 7, pp. 50-65.
- [32] H.B Salameh et M. Krunz, “Channel access protocols for multihop opportunistic networks: challenges and recent developments”, *IEEE Network*, 2009, vol. 23, pp. 14-19.
- [33] D. Carbric, S.M. Mishra, D. Willkomm, R. Brodersen et A. Wolisz, “A cognitive radio approach for usage of virtual unlicensed spectrum”, *IST Mobile and Wireless Communications Summit*, Juin 2005.
- [34] C. Cormio et K. Chowdhury, “An adaptive multiple rendezvous control channel for cognitive radio wireless ad hoc networks”, *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM)*, 2010, pp. 346–351.
- [35] L.A. DaSilva et I. Guerriero, “Sequence-based rendezvous for dynamic spectrum access”, *IEEE DySPAN*, 2008, pp. 1-7.
- [36] X. Zhang et H. Su, H, “CREAM-MAC: Cognitive radio-enabled multichannel MAC protocol over dynamic spectrum access networks”, *IEEE Journal on Selected Topics of Signal Processing*, 2011, vol. 5, pp. 110–123.
- [37] B. Wang, Y. Wu et K. J. R. Liu “Game theory for cognitive radio networks: An overview”, *Computer Networking*, vol. 54, n°14, Octobre 2010, pp. 2537-2561.
- [38] J. Rajasekharan, J. Eriksson, V. Koivunen, “Cooperative game-theoretic modeling for spectrum sensing in cognitive radios”, *Conference Record of the Forty Fourth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 2010, pp. 165-169.
- [39] W. Saad, H. Zhu, T. Basar, M. Debbah, A. Hjørungnes, “Coalition Formation Games for Collaborative Spectrum Sensing”, *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, Janvier 2011, pp.276-297.
- [40] J. Rajasekharan, J. Eriksson, V. Koivunen, “Cooperative Game-Theoretic Approach to Spectrum Sharing in Cognitive Radios”, *Computer Science and Game Theory*, 2011.
- [41] Z. Ji, K.J.R. Liu, “Dynamic spectrum sharing: a dynamic spectrum sharing: a game theoretical overview”, *IEEE Communications Magazine*, 2007, pp. 88–94.
- [42] M. Liang, Z. Qi, “An Improved Game-theoretic Spectrum Sharing in Cognitive Radio Systems”, *Third International Conference on Communications and Mobile Computing*, Avril 2011, pp. 270-273.
- [43] Q. Ni, R. Zhu, Z. Wu, Y. Sun, L. Zhou, B. Zhou, “Spectrum Allocation Based on game Theory in Cognitive Radio Networks”, *Journal of Networks*, Mars 2013, vol. 8, n°3, pp. 712-722.

- [44] O.-F. Rodriguez, S. Primak, V. Kontorovich, A. Shami, "A Game Théory Interpretation fo Multiple Access in Cognitive Radio Networks with Random Number of Secondary Users", *Computer Science and Game Theory*, Mai 2013.
- [45] Christian, S. Moh, I. Chung, J. lee, "Spectrum mobility in cognitive radio networks, *IEEE Communications Magazine*, 2012, vol. 50, n°6, pp.114-121.
- [46] V. Balogun, "Challenges of Spectrum handoff in Cognitive radio networks", *The pacific journal of Science and Technology*, 2010, vol.11, n°2.
- [47] Lertsinsrubeetavee, N. Malouch et S. Fdida, "Spectrum Handoff Strategies for Multiple Channels Cognitive Radio Network", *ACM CoNEXT Student Workshop*, 2010, n°20.
- [48] X. Xie, G. Yang, B. Ma, "Spectrum handoff decision algorithm with dynamic weights in cognitive radio networks", *Global Mobile Congress (GMC)*, 2011, pp. 1-6.
- [49] L. Giupponi, A-I. Perez-Neira, "Fuzzy-based Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks", *International conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, 2008.
- [50] D. Willkomm, J. Gross et A.Woliz, "Reliable link maintenance in cognitive radio systems", *IEEE DySPAN*, 2006, pp. 371 – 378.
- [51] C-W. Wang, L-C. Wang, "Analysis of Reactive Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks", *IEEE Journa on Selected Areas in Communications (JSAC)*, 2012, vol.30, n°10, pp.2016-2028.
- [52] L-C. Wang, C-W. Wang et K-T. Feng, "A queuing-theoretical framework for QoS-enhanced spectrum management in cognitive radio networks", *IEEE Wireless Communication* 2011, vol.18, n°6, pp.18-26.
- [53] Y. Song et J. Xie, "ProSpect: Aproactive Spectrum Handoff Framework For Cognitive Radio Ad Hoc Networks without Common Control Channel", *IEEE Transaction on Mobile Computing*, 2012, vol. 11, n°7, pp. 1127-1139.
- [54] J. Duan, Y. Li, "An optimal Spectrum Handoff Scheme for Cognitive radio Mobile Ad Hoc Networks", *Advances in Electrical and Computer Engineering Journal*, 2011, vol. 11, pp. 11-16.
- [55] J. Dhivya, T. Gayathri, R. Manjula, P. Saranya, S. Sathiyapriya, "A Proactive Spectrum Approach for Cognitive Radio Ad-Hoc Networks", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2013, vol. 2, n°1.
- [56] C-W. Wang, L-C. Wang, "Modeling and Analysis for Proactive-decision Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks", *IEEE International Conference on Communication (ICC)*, Juin 2009, pp. 1-6.
- [57] I.F. Akyildiz, J. Xie et S. Mohanty, "A survey of mobility management in next-generation all-IP-based wireless systems", *IEEE Wireless Communication*, 2004, pp. 16–28
- [58] X. Fu, W. Zhou, J. Xu, J. Song, "Extended mobility management challenges over cellular networks combined with cognitive radio by using multi-hop network", *8th ACIS international Conference on software engineering, artificial intelligence, networking and parallel/distributed computing (SNPD)*, Juillet 2007, pp. 683–688.
- [59] M. Kassar, B. Kervella, B., et G. Pujolle, "An overview of vertical handover decision strategies in heterogeneous wireless networks" *Computer Communications*, 2008, vol. 31, pp. 2607 – 2620.

- [60] Ahmed, “*Continuity of Service in Heterogeneous Wireless Networks with Multi-agent Systems*”, thèse de doctorat, Université de Technologie de Troyes, Octobre 2010.
- [61] Ahmed, L-M. Boulahia, D. Gaïti et R-R. Amoud, “Towards a Knowledge-based Intelligent Handover in Heterogeneous Wireless Networks”, *IEEE-LCN*, USA, 2010.
- [62] Abuhaija, K. Al-Begain, “An Algorithm for Multi Service Continuity in Multi Radio Access Cellular Networks”, *12th International Conference on Computer Modelling and Simulation*, Cambridge, Mars 2010, vol. 9, pp 558-566.
- [63] E.V. Belmega, S. Lasaulce, M. Debbah, “Decentralized handovers in cellular networks with cognitive terminals”, *3rd International Symposium On Communication, Control, and Signal Processing (ISCCSP)*, Malta, 2008, pp. 219-224.
- [64] J. Raiyn, “Toward cognitive radio handover management”, *Annual IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication (PIMRC)*, France, Septembre 2008, pp. 1-5.
- [65] J. W. Mwangoka, P. Marques, et J. Rodriguez, “Cognitive mobility management in heterogeneous networks,” *8th ACM international workshop on Mobility management and wireless access*, 2010, pp. 37–44.
- [66] I.F. Akyildiz, W. Y. Lee, et K. R. Chowdhury, “CRAHNs: Cognitive Radio Ad Hoc Networks,” *Ad Hoc Networks*, 2009.
- [67] Z. Damljanovic, “Mobility management strategies in heterogeneous cognitive radio networks”, *Journal of Network and Systems Management*, 2010, vol. 18, pp. 4-22.
- [68] L. De Nardis et M.-D.P. Guirao, “Mobility aware design of cognitive radio networks: challenges and opportunities”, *Cognitive Radio Oriented Wireless Network and opportunities*, 2010, pp. 1-5.
- [69] K. Chowdhury et M. Felice, “SEARCH: A Routing Protocol for Mobile Cognitive Radio Ad-Hoc Networks,” *Computer Communications*, 2009, vol. 32, n°18, pp. 1983–1997.
- [70] K.R Chowdhury, M. Di Felice, et I.F. Akyildiz, “Tp-crahn: a transport protocol for cognitive radio ad-hoc networks,” *IEEE INFOCOM*, 2009, pp. 2482–2490.
- [71] Al-Dulaimi, S. Al-Rubaye et J. Cosmas, “Adaptive congestion control for mobility in cognitive radio networks”, *Wireless Advanced*, 2011, pp. 273-277.
- [72] L. Zhang, K. Zeng, P. Mohapatra, “Opportunistic spectrum scheduling for mobile cognitive radio networks in white space”, *IEEE Wireles Communications and Networking Conference*, 2011, pp. 844-849.
- [73] T. Ishikawa, S. Hanaoka, M. Kataoka, M. Yano, S. Nisimura, “Basic simulation result of inter system handover for cognitive radio”, *FGCN*, 2007, pp.270–273.
- [74] I Karla, J. Bitó, L. Csurgai-Horváth, B. Bochow, U. Celentano, P. Grønsund, M. López-Benítez, R. Samano-Robles, “Cognitive Spectrum Portfolio Optimisation, Approaches and Exploitation”, *19th European Wireless Conference*, Guildford, UK, Mars 2013.
- [75] W-Y. Lee, I-F. Akyldiz, “Spectrum-Aware Mobility Management in Cognitive Radio Cellular Networks”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Avril 2012, vol.11, n°4, pp.529- 542.
- [76] S. Haykin, “Cognitive dynamic systems”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, vol. 94, pp. 1910–1911.

- [77] H. Bond et L. Gasser, “*Readings in Distributed Artificial Intelligence*”, Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, CA, 1988.
- [78] Michael Wooldridge, “*An Introduction to Multi-Agent Systems*”, Wiley and Sons Editor, West Sussex, England, 2002.
- [79] J. Ferber, “Multi-Agent System: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence”, Addison Wesley Longman, 1999.
- [80] Y. Demazeau, J.P. Muller, “*Decentralized Artificial Intelligence*”, Elsevier Science Publisher, pp. 3-10, 1991.
- [81] J.P. Briot et Y. Demazeau, “*Principes et architecture des systèmes multiagents*”, Collection IC2, Hermes-lavoisier, France, 2001.
- [82] M. Wooldridge et N.R. Jennings, “Intelligent agent: theory and practice”, *The knowledge Engineering Review*, Juin 1995, vol.10, n° 2, pp.115-152.
- [83] N.R. Jennings, “Commitments and conventions: The foundation of coordination in Multi-Agent Systems”, *The knowledge Engineering Review*, 1993, pp. 223-250.
- [84] O. Boissier, S. Gitton, P. Glize, “Caractéristiques des Systèmes et des Applications”, dans *Systèmes Multi-Agents*, vol. 29, pp. 25-54, Editions TEC & DOC, 2004.
- [85] Espinasse, S. Fournier, F. L. Gonçalves de Freitas, “Agent and ontology based information gathering on restricted web domains with AGATHE”, *ACM symposium on Applied Computing*, 2008.
- [86] T.W Malone, “Organizing information processing systems: parallels between human organizations and computer systems”, *Cognition, Computation and Cooperation*, pp.56-86, Ablex, 1990.
- [87] F.V. Martial, “Interactions among autonomous planning agents”, *1st European Workshop on Medelling Autonomous Agents in Multi- Agent Worlds*, Amsterdam, 1990.
- [88] R. Brooks, “A Robust Layered Control System for a Mobile Robot”, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1985, pp. 14-23.
- [89] H.R Barbara, “A Blackboard Architecture for Control”, *Artificial Intelligence*, Juillet 1985, vol. 6, n°3.
- [90] R.G Smith et R. Davis, “Frameworks for cooperation in distributed problem solving”, *IEEE Transaction on Systems Management and Cybernetics*, 1981, vol. 11, n°1, pp. 61-70.
- [91] W. Gruszczyk, H. Kwasnicka, “Coalition Formation in multi-agent systems- an evolutionary aproach”, *International Multiconference on Computer Science and Information Technology (IMCSIT)*, Octobre 2008, pp. 125-130.
- [92] Rahwan, S.D Ramchurn et N.R Jennings, “Argumentation-based negotiation”, *The Knowledge Engineering Review*, Décembre 2003, vol. 18, pp.343-375.
- [93] http://turing.cs.pub.ro/auf2/html/chapters/chapter5/chapter_5_5_1.html
- [94] G. Adomavicius, A. Gupta, “Toward comprehensive real-time bidder support in iterative combinational auctions”, *Information Systems Research*, 2005, vol. 16, n°2.
- [95] S.S. Manvi et P. Venkataram, “Applications of Agent Technology in Communications: A Review”, *Computer Communications Journal*, 2004, vol. 27, pp.1493-1508.

- [96] M. Li, R.S.H Istepanian, "3G network oriented mobile agents for intelligent diabetes management: a conceptual model", *4th International IEEE EMBS Special Topic Conference on Information Technology Applications in Biomedicine*, pp. 31-34, 2003.
- [97] Trigui, M. Esseghir et L. Merghem Boulahia, "On using Multi-Agent Systems in Cognitive Radio Networks: A survey", *International Journal of Wireless and Mobile Networks (IJWMN)*, 2012, vol.4, n°6.
- [98] Trigui, M. Esseghir et L. Merghem Boulahia, "Spectrum Access during Cognitive Radio Mobiles' Handoff," *International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC'11)*, Luxembourg, 19- 24 Juin 2011, pp 221-224.
- [99] Trigui, M. Esseghir et L. Merghem Boulahia, "Multi-Agent Systems Negotiation Approach for Handoff in Mobile Cognitive Radio Networks," *IEEE International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS'12)*, Istanbul, 7- 10 Mai 2012, pp 1-5.
- [100] E. Trigui, M. Esseghir et L. Merghem Boulahia, "A Mobility Schema for Cognitive Radio Networks," *12th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (MED-HOC-NET)* Ajaccio, Corsica, 24 - 26 Juin 2013.
- [101] E. Trigui, M. Esseghir et L. Merghem Boulahia, "Gestion dynamique du spectre entre terminaux radio cognitive mobile", *Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles (CFIP'11)*, Sainte Maxime, France, 10- 13 Mai 2011.
- [102] J. Xie, I. Howitt et A. Raja, "Cognitive radio resource management using multi-agent systems", *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, Janvier 2007, pp.1123-1127.
- [103] P. Ren, Y. Wang, Q. Du et J. Xu, "A survey on dynamic spectrum access protocols for distributed cognitive wireless networks", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012.
- [104] M. Pan, Y. Fang, "Bargaining based pairwise cooperative spectrum sensing for Cognitive Radio networks", *IEEE Military Communications Conference*, Novembre 2008, pp. 1-7.
- [105] Liu, A.B MacKenzie, B. Krishnamachari, "Bargaining to Improve Channel Sharing between Selfish Cognitive Radios", *IEEE Globecom*, Décembre 2009, pp. 1-7.
- [106] L. Qian, F. Ye, L. Gao, X. Gan, T. Chu, X. Tian, X. Wang, et M. Guizani, "Spectrum Trading in Cognitive Radio Networks: An Agent-Based Model under Demand Uncertainty", *IEEE Transactions on Communications*, 2011, vol. 59, n°11, pp. 3192-3203.
- [107] S. Vijay, R. Rao, V. Prasad, C. Yadati, et I.G Niemegeers, "Distributed heuristics for allocating spectrum in CR ad hoc networks", *IEEE Globecom*, 2010, pp. 1-6.
- [108] Y. Zhang, C. Lee, D. Niyato, et P. Wang, "Auction Approaches for Resource Allocation in Wireless Systems: A Survey", *IEEE Communications surveys & tutorials*, 2012.
- [109] D. Niyato et E. Hossain, "Competitive pricing for spectrum sharing in cognitive radio networks: Dynamic game, inefficiency of Nash equilibrium and collusion" *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, Janvier 2008, vol. 26, n°1, pp. 192-202.

- [110] Z. Yang, D. Niyato, P.Wang, E.Hossain, "Auction-based resource allocation in cognitive radio systems", *IEEE Communications Magazine*, 2012, vol. 50, n°11, pp. 108-120.
- [111] S Mohammadian, B. Abolhassan, "Auction-based Spectrum Sharing for Multiple Primary and Secondary Users in Cognitive Radio Networks", *IEEE Sarnoff Symposium*, Avril 2010, pp. 1-6.
- [112] G.S Kasbekar, S. Sarkar, "Spectrum auction framework for access allocation in cognitive radio networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Décembre 2010, vol.18, n°6, pp. 1841-1854.
- [113] X. Wang, Z. Li, P. Xu, Y.Xu, X. Gao, et H. Chen, "Spectrum sharing in cognitive Radio Networks- An Auction based Approach", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics - Special issue on game theory*, Juin 2010, vol. 40, n°3, pp. 587-596.
- [114] Y. Teng, Y. Zhang, C. Dai, F. Yang et M. Song, "Dynamic spectrum sharing through double auction mechanism in cognitive radio network", *IEEE Wireless Communication and Networking Conference (WCNC)*, Mars 2011, pp. 90-95.
- [115] L. Chen, S. Iellamo, M. Coupechoux, P. Godlewski, "An Auction Framework for Spectrum Allocation with Interference Constraint in Cognitive Radio Networks", *IEEE INFOCOM*, 2010, pp.1-9.
- [116] G. Wu, P. Ren, et C. Zhang, "A waiting-time auction based dynamic spectrum allocation algorithm in cognitive radio networks", *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, 2011, pp. 1-5.
- [117] Songl, X-L. Lin, "An auction-based MAC protocol for cognitive radio networks", *International Journal of Communication systems*, 2012, vol. 25, n° 12, pp. 1530–1549.
- [118] Y. Teng, F. Richard Yu, K. Han, Y. Wei, Y. Zhang, "Reinforcement-Learning-based Double auction Design for Dynamic Spectrum Access in Cognitive Radio Networks", *Wireless Personal Communications*, 2012.
- [119] V. Rodriguez, K. Moessner, et R. Tafazolli, "Auction driven dynamic spectrum allocation: optimal bidding, pricing and service priorities for multi-rate, multi-class CDMA", *IEEE PIMRC*, 2005, vol. 3, pp. 1850-1854.
- [120] H. Sartono, Y- H. Chew; W-H. Chin; C. Yuen, "Joint demand and supply auction pricing strategy in dynamic spectrum sharing", *IEEE 20th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*, 2009, pp.833-837.
- [121] Y. Xing, R. Chandramouli, et C. M. Cordeiro, "Price dynamics in competitive agile spectrum access markets", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, vol.25, n°3, pp. 613-C621.
- [122] Enxin Yao; Luxi Lu; Wei Jiang, "An efficient truthful double spectrum auction design for dynamic spectrum access", *6th International ICST Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM)*, 2011, pp.181-185.
- [123] G. Iosifidis, L. Gao, J. Huang, et L. Tassiulas, "An Iterative Double Auction Mechansim for Mobile Data Offloading", *11th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOPT)*, Mai 2013

- [124] Z. Chen et R-C Qiu, "Q-Learning Based Bidding Algorithm for Spectrum Auction in Cognitive Radio", *IEEE Southeastcon*, 2011, pp.409- 412.
- [125] A.Bourdena, G. Mastorakis "A Dynamic Spectrum Management Framework for Efficient TVWS Exploitation", *IEEE 17th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks*, 2012, pp. 51-55.
- [126] H.-B. Chang et K.-C. Chen, "Auction-based spectrum management of cognitive radio networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Mai 2010, vol. 59, n°4, pp. 1923-1935.
- [127] C. Kloeck, H. Jaekel, F. K. Jondral, "Multi agent Wireless System for Dynamic and Local Combined Pricing, allocation and Billing", *Journal of communication*, 2006, vol.1, n°1, pp. 48-59.
- [128] N. Christine, E. Nwonye, et O. Ekabua, "Spectrum Sharing and Spectrum Mobility in Cognitive Radio Networks using Intelligent Mobile Agents, *International Journal of Computer Applications*, Mai 2013, vol. 70, n°10.
- [129] C. Wu, K. Chowdhury, et M. D. Felice, "Spectrum management of cognitive radio using multi-agent reinforcement learning", *International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 2010.
- [130] Lunden, V. Koivunen, S.R Kulkarni, H.V Poor, "Reinforcement learning based distributed multiagent sensing policy for cognitive radio networks", *IEEE DySPAN*, Mai 2011, pp. 642-646.
- [131] Z. Chen, R.C. Qiu, "Cooperative spectrum sensing using Q-learning with experimental validation", *IEEE Southeastcon*, Mars 2011, pp. 405-408.
- [132] F. Fu et M. van der Schaar, "Dynamic Spectrum Sharing Using Learning for Delay-Sensitive Applications", *International Conference on Communication (ICC)*, 2008.
- [133] P. Venkatraman, B. Hamdaoui, B., et M. Guizani, "Opportunistic bandwidth sharing through reinforcement Learning", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, vol.59, n°6, pp. 3148- 3153.
- [134] H. Li, "Multiagent Q -Learning for Aloha-Like Spectrum Access in Cognitive Radio Systems", *EURASIP, Journal on Wireless Communications and Networking*, 2010.
- [135] H. Li, "Multi-agent Q-Learning of Channel Selection in Multi-user Cognitive Radio Systems: A Two by Two Case", *IEEE Conference on System, Management and Cybernetics*, Octobre 2009, pp. 1893-1898.
- [136] K-L-A Yau, P. Komisarczuk, et P.D. Teal, "Enhancing Network Performance in Distributed Cognitive Radio Networks using Single-agent and Multiagent Reinforcement Learning", *IEEE Local Computer Networks (LCN)*, Octobre 2010, pp. 152-159.
- [137] N. Abramson, "Development of the ALOHANET", *IEEE Transactions on Information Theory*, 1985, vol IT-31, pp 119-123.
- [138] C. Feng, W. Wang, et X. Jiang, "Cognitive Learning Based Spectrum Handoff for Cognitive Radio Networks", *International Journal of Computer and Communications Engineering*, 2012, vol. 1, n° 4.
- [139] Z. Chen, et R-C. Qiu, "Q-Learning Based Bidding Algorithm for Auction in Cognitive Radio", *IEEE Southeastcon*, Mars 2011, pp. 409-412.

- [140] Y. Teng, F-R. Yu, K. Han, Y. Wei, Y. Zhang, "Reinforcement-Learning-Based Double Auction Design for Dynamic Spectrum Access in Cognitive Radio Networks", *Wireless Personal Communications*, Mars 2013, vol. 69, n°2, pp 771-791.
- [141] N. Abji, A. Leon-Garçia, "An Auction-based Approach to Spectrum Allocation using Multi-agent Reinforcement Learning", *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2010, pp.2233-2238.
- [142] U. Mir, L. Merghem-Boulahia, et D. Gaïti, "COMAS: A Cooperative Multiagent Architecture for Spectrum Sharing," *EURASIP, Journal on Wireless Communications and Networking*, 2010, 15 pages.
- [143] U. Mir, "Utilization of Cooperative Multi-agent Systems for Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks", Thèse de doctorat, Université de technologie de troyes, 2011.
- [144] Ahmed, O. Sohaib, W. Hussain, "An Agent Based Architecture for Cognitive Spectrum Management", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2011.
- [145] Cao et H. Zheng, "Distributed spectrum allocation via local bargaining", *IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, Septembre 2005, pp. 475-486.
- [146] Y.B Reddy, C. Bullmaster, "Cross-Layer Design in Wireless Cognitive Networks", *International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (PDCAT)*, Décembre 2008, pp. 462-467.
- [147] G. Pongor, "OMNeT: Objective Modular network Testbed", *International Workshop on Medeling, Analysis and Simulation On Computer and Telecommunication Systems*, 1993, pp. 323-326.
- [148] Y. Zhang, "Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks: Opportunistic and Negotiated Situations", *IEEE International Conference on Communications, (ICC '09)*, Dresden 2009, pp. 1-6.
- [149] V. Conitzer, "Comparing multiagent systems research in combinatorial auctions and voting", *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, Avril 2010, vol. 58, n° 3-4, pp. 239-259.
- [150] E. Trigui, M. Esseghir et L. Merghem Boulahia, "Cognitive Radio Spectrum Assignment and Handoff Decision," *24th annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (IEEE PIMRC'13)*, London, UK, 8-11 Septembre 2013.
- [151] E. Trigui, M. Esseghir et L. Merghem Boulahia, "Spectrum Handoff Algorithm for Mobile Cognitive Radio Users based on agents' Negotiation", *9th IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (IEEE WiMob'13)*, Lyon, France, 7-9 Octobre 2013.
- [152] M.A Chalouf, F. Krief F., N.M. barek, T. LEMLOUMA, "Improvement of a Service Level Negotiation Protocol using Formal Verification", *IEEE symposium on Computers and Communications*, 2013.
- [153] Amraoui, B. Benmammar, F. Krief, F.T. Bendimerad, "Négotiations à base d'Enchères dans les Réseaux Radio Cognitive, *Colloque francophone sur l'ingénierie des protocoles (CFIP)*, 2012.

- [154] Amraoui, B. Benmammar, F. Krief, F.T. Bendimerad, "Auction-based Agent Negotiation in Cognitive Radio Ad Hoc Networks", *4th International Conference on Ad Hoc Networks (ADHOCNETS)*, 2012.
- [155] Amraoui, F.Z. Benidris, B. Benmammar, Krief F., F.T. Bendimerad, "Toward cognitive radio resource management based on multi-agent systems for improvement of real-time application performance", *IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS'12)*, 2012.
- [156] Abdelmoumen, I. Arfaoui, M. Frikha, T. Chahed, "On the Performance of MANETs under Different Mobility Patterns and Routing Protocols and Its Improvement Based on Fixed Relay Nodes", *IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS'12)*, 2012, pp. 1-5.
- [157] Blaszczyszcz et M-K. Karray, "Quality of Service in Wireless Cellular Networks Subject to Log-Normal Shadowing", *IEEE transaction on Communication*, 2013, vol 2, n°61, pp.781-791.
- [158] Tarhini, T. Chahed, "QoS-oriented resource allocation for streaming flows in IEEE802.16e Mobile WiMAX", *Telecommunication Systems*, 2012, vol. 1, n° 51, pp. 65-71
- [159] Ahmed, L. Merghem Boulahia et D. Gaiti", "An intelligent agent-based scheme for vertical handover management across heterogeneous networks", *Annals of Telecommunications*, 2011, vol. 66, n° 9-10, pp. 583-602.
- [160] S. Medina Perlaza, S. Lasaulce, M. Debbah, J. M. Chaufraay, "Game theory or dynamic spectrum sharing", *Cognitive Radio Networks: Architectures, Protocols and Standards*, Taylor & Francis Group, Auerbach Publications CRC Press, 2010, pp. 257-288.
- [161] Trigui, M. Esseghir et L. Merghem Boulahia, "NESAM : Negotiation based approach for Spectrum Access and Mobility management in cognitive radio networks," en cours de soumission.
- [162] D. Lekomtcevl, R. Maršálek, "Comparison of 802.11af and 802.22 standards – physical layer and cognitive functionality", *Electrotechnics magazine*, vol. 3, n° 2, Juin 2012.

ANNEXES

Annexe A: Algorithme de sélection utilisé par NESAM

ALGORITHME de sélection basé sur la fréquence et le PPS

DEBUT

List_PU_ //Les PUs ayant suffisamment de bandes libres qui ont répondu à la demande du TCM

PU_{pres} // Le PU présélectionné

PU_{sélectionné} // Le PU sélectionné

Résultat_Nego //Le résultat de la négociation

Sélection = faux // Variable booléenne qui indique si la sélection du PU est faite

NégDur = Faux // Variable booléenne indiquant s'il y a une négociation de la durée

Le TCM cherche si le PU_{sf} existe dans la liste List_PU

Si (Recherche (PU_{sf}) = 0) // Le PU_{sf} n'a pas suffisamment de bandes libres

Alors

PU_{pres} ← Le PU ayant le plus faible PPS

Sinon

PU_{pres} ← PU_{sf}

Fin Si

//Le TCM vérifie le PPS initialement proposé par le PU_{pres}

Tant que (Sélection = faux et taille(List_PU) !=0)

Faire

Si (PPS(PU_{pres}) ≤ PPS_{max}(TCM))

Alors

PU_{sélectionné} ← PU_{pres}

Sélection = vrai

Sinon

//Le TCM déclenche le mécanisme de négociation avec le PU_{pres}

Si (P_{initial}(PU_{pres}) > P_{max}(TCM))

Alors

Negociation_du_Prix()

Si (la négociation du prix est réussie)

Alors

Résultat_Nego = succès

Sinon

Negociation_de_Durée()

NegoDur= vrai

Fin si

Sinon

Negociation_de_Durée()

NegoDur= vrai

Fin Si

```
Si (NegoDur==vrai)
Alors
    si (la négociation de la durée est réussie)
        Alors
            Résultat_Nego = succès
        Sinon
            Résultat_Nego = échec
        Fin si
    Fin si

Si (Résultat_Nego == succès)
Alors
     $PU_{\text{sélectionné}} \leftarrow PU_{\text{pres}}$ 
    Sélection = vrai
Sinon
    Eliminer  $PU_{\text{pres}}$  de la List_PU
     $PU_{\text{pres}} \leftarrow$  Le PU suivant dans la liste ayant le PPS le plus faible
Fin si
Fin Si
Fin Tant que

Si (taille(List_PU_libre) == 0)
Alors
    Attendre ( $\Delta t$ )
    Algorithme AGS // exécution à nouveau de l'algorithme de gestion du spectre
Fin si
FIN
```

Annexe B : Deuxième variante de l'algorithme de sélection (basée sur le prix)

Nous définissons deux variantes de l'algorithme de sélection, au niveau de l'approche *NESAM*, selon les exigences des utilisateurs à radio cognitive :

- Exigence sur la fréquence, le prix et la durée (exigence sur le prix par seconde) : version présentée dans le chapitre IV ;
- Exigence sur la fréquence et le prix sans considération de la durée.

La première variante correspond à l'algorithme déjà présenté dans le chapitre IV, qui définit un *mécanisme de sélection* basé sur la fréquence et le prix par seconde. Cet algorithme peut être appliqué par les utilisateurs qui ont une contrainte de prix et de durée; ils ont donc un *prix par seconde maximal* à ne pas dépasser. Quant à la deuxième variante définit un *mécanisme de sélection basé sur la fréquence et le prix* seulement. Cet algorithme peut être appliqué par les utilisateurs qui ont une contrainte de prix à ne pas dépasser. Chacun de ces algorithmes définit un mécanisme de négociation propre à lui. Dans ce qui suit, nous présentons la deuxième variante de l'algorithme de sélection avec le mécanisme de négociation associé.

Le comportement du PU est le même pour les deux algorithmes de négociation alors que celui des TCMs change. D'une part, la négociation commence forcément par une proposition d'un nouveau prix. D'autre part, les nouvelles valeurs du prix et de la durée, P_{New} et D_{New} , que propose le TCM auront de nouvelles expressions.

Afin de mieux percevoir la différence entre les deux variantes d'algorithmes de négociation, nous présenterons à travers la figure B.1 le processus de négociation de la deuxième alternative basée sur le prix seulement, de façon simplifiée.

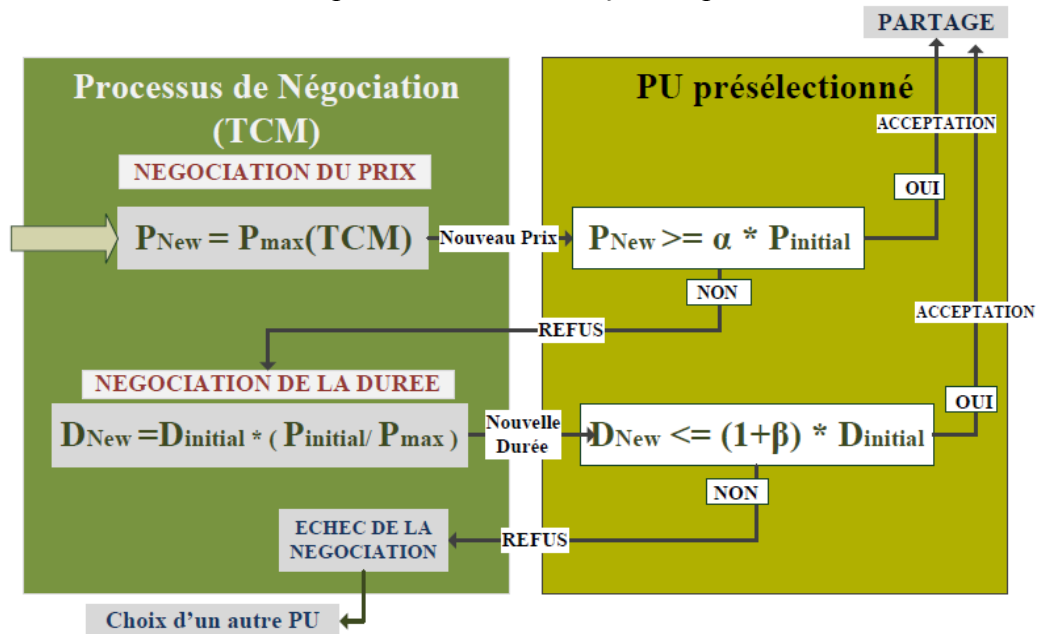


Figure B.1. Mécanisme de négociation basé sur le prix

En initiant la négociation du prix, le TCM propose un nouveau prix P_{New} égal au prix maximal P_{max} qu'il peut payer.

$$P_{New} = P_{max} \quad (B.1)$$

Si le nouveau prix P_{New} est au moins égal à α multiplié par le prix initialement proposé par le PU ($\alpha * P_{initial}$) alors le PU accepte cette nouvelle offre et partage son spectre avec ce TCM. Sinon, le PU refuse l'offre du TCM, qui négocie par la suite la durée. Prenons l'exemple suivant dont P_{max} du TCM et les paramètres du PU sont dressés dans le tableau B.1.

Tableau B.1: Valeurs initiales adoptées dans notre exemple

Paramètres du PU	Valeurs
$P_{initial}$	12 unités monétaires (um)
$D_{initial}$	450 unités de temps (ut)
α	0.7
β	0.8
P_{max} du TCM	9 um

Le PU propose un prix initial $P_{initial} = 12$ um (unités monétaires) au TCM ayant comme $P_{max} = 7$ um. Comme $P_{initial} > P_{max}$, le TCM propose au PU un nouveau prix P_{New} égal à 7 um. Le seuil du PU lors de la négociation du prix est supposé égal à 0.7 donc le PU refuse le nouveau prix proposé car il est inférieur à 70% de son prix initial ($P_{New} < \alpha * P_{initial}$ (AN : $7 < 8.4 = 0.7 * 12$)).

Puisque le PU a refusé le prix proposé par le TCM, ce dernier négocie la durée et propose ainsi une nouvelle durée D_{New} donnée par l'équation (2).

$$D_{New} = D_{initial} * \frac{P_{initial}}{P_{max}} \quad (B.2)$$

Dans ce processus de négociation, il est clair que le nouveau prix proposé P_{New} est toujours inférieur à $P_{initial}$ et la nouvelle durée proposée D_{New} est toujours supérieure à $D_{initial}$.

Le PU accepte ou refuse cette nouvelle durée selon la valeur de son seuil β relatif à la négociation de la durée. Si la nouvelle durée D_{New} ne dépasse pas $(1+\beta) * D_{initial}$, alors le PU accepte l'offre et partage son spectre avec le TCM. Autrement, la négociation échoue et le TCM doit trouver un autre PU prêt à partager son spectre. Le nouveau PU présélectionné sera le suivant à présenter le prix par seconde le plus intéressant.

Si nous revenons à notre exemple, nous remarquons que le TCM propose une nouvelle durée $D_{New} = 685,7$ ut (unité de temps) calculée par l'équation (3) (AN: $685,7 = 450 * (12 / 7)$). Comme le seuil β du PU est égal à 0.8, alors la négociation entre le TCM et le PU donne lieu à un accord. En effet, le PU a accepté la nouvelle durée D_{New} qui est inférieure à $(1+\beta) * D_{initial}$ (AN : $685,7 < 810 = 1,8 * 450$). Le partage entre le TCM et le PU s'effectue donc avec un prix égal à 12 um pour une durée égale à 685,7 ut.

ALGORITHME de sélection basé sur la fréquence et le prix

DEBUT

List_PU //Les PUs qui ont suffisamment de bandes libres

PU_{pres} // Le PU présélectionnéPU_{sélectionné} // Le PU sélectionné

Résultat_Nego //Le résultat de la négociation

Sélection = faux // Variable booléenne qui indique si la sélection du PU est faite

Le TCM cherche si le PU_{sf} existe dans la liste List_PU**Si (Recherche (PU_{sf}) = 0)** // Le PU_{sf} n'a pas suffisamment de bandes libres**Alors**PU_{pres} ← Le PU ayant le plus faible PPS**Sinon**PU_{pres} ← PU_{sf}**Fin Si****Tant que** (Sélection = faux et taille(List_PU) != 0)**faire**//Le TCM vérifie le prix $P_{initial}$ du PU présélectionné**Si** ($P_{initial}(PU_{pres}) \leq P_{max}(TCM)$)**Alors**PU_{sélectionné} ← PU_{pres}

Sélection = vrai

Sinon //Le TCM déclenche le mécanisme de négociation avec le PU_{pres}**Negociation_du_Prix()****Si** (la négociation du prix réussit)**Alors**

Résultat_Nego = succès

Sinon**Negociation_du_Durée()****Si** (la négociation de la durée réussit)**Alors**

Résultat_Nego = succès

Sinon

Résultat_Nego = échec

Fin si**Fin Si****Si** (Résultat_Nego == succès)**Alors**PU_{sélectionné} ← PU_{pres}

Sélection = vrai

Sinon // sélection d'un autre PUEliminer PU_{pres} de la List_PU_librePU_{prés} ← Le PU suivant ayant le PPS le plus faible**Fin si****Fin Si****Fin Tant que****Si** (taille(List_PU) == 0)**Alors****Attendre** (Δt)**Algorithme** AGS // exécution à nouveau de l'algorithme de gestion du spectre**Fin si****FIN**

Annexe C : Démonstrations**C.1 Démonstration 1** : P_{New} est inférieur à $P_{initial}$ **Cas 1** : $D_{fav} > D_{initial}$ P_{New} est inférieur à $P_{initial}$

$$P_{New} = D_{initial} * PPS_{max}$$

$$Or\ on\ a\ PPS = \frac{P_{initial}}{D_{initial}} \Rightarrow D_{initial} = \frac{P_{initial}}{PPS}$$

$$P_{New} = \frac{P_{initial}}{PPS} * PPS_{max}$$

$$P_{New} = \frac{PPS_{max}}{PPS} * P_{initial}$$

$$Or\ PPS_{max} < PPS \quad (Condition\ de\ déclenchement\ de\ la\ négociation)$$

$$\Rightarrow [P_{New} < P_{initial}]$$

Remarque : P_{New} inférieur ou égal à P_{max}

$$P_{New} = D_{initial} * PPS_{max}$$

$$P_{New} = D_{initial} * \frac{P_{max}}{D_{fav}}$$

$$P_{New} = \frac{D_{initial}}{D_{fav}} * P_{max}$$

$$Or\ on\ a\ D_{fav} > D_{initial}$$

$$\Rightarrow [P_{New} < P_{max}]$$

Cas 2 : $D_{fav} \leq D_{initial}$

$$Dans\ le\ cas\ où\ D_{fav} \leq D_{initial} \Rightarrow On\ a\ pris [P_{New} = P_{max}]$$

$$Or\ P_{initial} > P_{max} \quad (Condition\ de\ déclenchement\ de\ la\ négociation\ du\ prix)$$

$$\Rightarrow [P_{New} < P_{initial}]$$

C.2 Démonstration 2 : D_{New} est supérieur à $D_{initial}$

$$D_{New} = \frac{P_{initial}}{PPS_{max}}$$

Or on a $PPS_{max} < PPS$ (Condition de déclenchement de la négociation)

$$\Rightarrow PPS_{max} < \frac{P_{initial}}{D_{initial}}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{PPS_{max}} > \frac{D_{initial}}{P_{initial}} \quad \Rightarrow \quad \frac{P_{initial}}{PPS_{max}} > \frac{D_{initial}}{P_{initial}} * P_{initial}$$

$$\Rightarrow \frac{P_{initial}}{PPS_{max}} > D_{initial}$$

$$\Rightarrow [D_{New} > D_{initial}]$$

C.3 Démonstration 3 : Utilité des TCMs

Nous avons $U(TCM_i) = \frac{1}{N_{all}} \sum_{j=1}^{N_{all}} \left(\frac{PR_{min}(PU)}{P[i]_{payé}} * \frac{D[i]_{attribuée}}{DR_{max}(PU)} \right)$

$$\Rightarrow U(TCM_i) = \frac{1}{N_{all}} \sum_{j=1}^{N_{all}} \left(\frac{\frac{PR_{min}(PU)}{DR_{max}(PU)}}{\frac{P[i]_{payé}}{D[i]_{attribuée}}} \right)$$

Or $\frac{P[i]_{payé}}{D[i]_{attribuée}} = PPS_{bid}(TCM_i)$

et $\frac{PR_{min}(PU)}{DR_{max}(PU)} = Min(PPS_{réserve}(PU))$

$$\Rightarrow U(TCM_i) = \frac{1}{N_{all}} \sum_{j=1}^{N_{all}} \left(\frac{Min(PPS_{réserve}(PU))}{PPS_{bid}(TCM_i)} \right)$$

C4 Démonstration 4 : Utilité des PUs

Nous avons $U(PU_j) = \frac{1}{N_{partage}} \sum_{i=1}^{N_{partage}} \left(\frac{P[i]_{payé}}{P_{\max}(TCM)} * \frac{D_{\min}(TCM)}{D[i]_{attribuée}} \right)$

$$U(PU_j) = \frac{1}{N_{partage}} \sum_{i=1}^{N_{partage}} \frac{\frac{P[i]_{payé}}{D[i]_{attribuée}}}{\frac{P_{\max}(TCM)}{D_{\min}(TCM)}}$$

O pour le $i^{ème}$ partage $\frac{P[i]_{payé}}{D[i]_{attribuée}} = PPS_{bid}(TCM_W[i])$

et $\frac{P_{\max}(TCM)}{D_{\min}(TCM)} = PPS_{\max}(TCM)$

$$\Rightarrow U(PU_j) = \frac{1}{N_{partage}} \sum_{i=1}^{N_{partage}} \frac{PPS_{bid}(TCM_W[i])}{PPS_{\max}(TCM)}$$

Annexe D : Algorithme de fonctionnement du PU (pour l'approche LASMA)

ALGORITHME : Comportement du PU

DEBUTPartage = faux // *Le PU est en train de partager ses sous-bandes*BandesLibres = vrai // *Le PU dispose de sous-bandes libres*Vec = nul // *Vecteur des offres reçues (vecteur de PPS)* Γ // *Temps d'attente de réception des offres* $PPS_{réserve}$ // *Le PPS de réserve du PU* TCM_w // *Le TCM gagnant (sélectionné par le PU)* $S_{libres}(PU)$ // *Nombre de sous-bandes libres du PU* $S_{demandé}(TCM)$ // *Nombre de sous-bandes demandées par le TCM*ACK // *acquiescement du TCM***Répéter****Si** (BandesLibres == vrai)**Alors**Diffusion du message *CFA***Tant que** (Γ n'a pas expiré)**Alors****Si** (réception d'une offre)**Alors**

Insérer l'offre dans le vecteur d'offres Vec.

Fin Si**Fin tant que**// *Sélection du TCM gagnant***Si** (taille de Vec != 0)**Alors****Pour** $i = 1 \dots$ Taille de Vec**Si** (Vec[i] < $PPS_{réserve}$)**Alors**

Supprimer Vec[i]

Fin Si**Fin pour**

Trier Vec dans l'ordre croissant

 $TCM_w \leftarrow$ Le TCM proposant l'offre Vec[1]Envoyer un message *WINNER* au TCM_w **Fin Si****Si** (ACK == OK)**Alors**Partage $\leftarrow$ vrai // *partage de spectre* $S_{libres}(PU) \leftarrow S_{libres}(PU) - S_{demandé}(TCM_w)$ **Si** ($S_{libres}(PU) \neq 0$)**Alors**BandesLibres $\leftarrow$ vrai**Sinon**BandesLibres $\leftarrow$ faux**Fin Si****Sinon** // *Le TCM est en train de partager une autre bande*Partage $\leftarrow$ faux**Fin Si****Fin Si****Jusqu'à** (Partage == vrai et BandesLibres == faux)**FIN**

5.13 Annexe E : Algorithme de fonctionnement du TCM (pour l'approche LASMA)

ALGORITHME : Comportement du TCM

DEBUT

HO_Var = vrai // Le TCM est en train de changer de zones (phase de handover)

En_Partage = vrai // Le TCM est en train de partager le spectre avec un PU

$\eta_A(PU_i) = 0$ // Nombre d'appels d'offres reçus de la part du même PU_i

$S_{demandé}(TCM)$ // Nombre de sous-bandes demandées par le TCM

$PPS_{initial}$ // L'offre initial (PPS) du TCM

PPS_{bid} // L'offre effectif du TCM

PPS_{max} // Le PPS maximal qui peut être proposé par un TCM

Ψ // Paramètre d'apprentissage

Si (HO_Var == vrai)

Alors

En_Partage $\leftarrow$ faux

Fin Si

Si ((En_Partage == faux) et réception du message CFA)

Alors

Si ($S_{libres}(PU_i) \geq S_{demandé}(TCM)$)

Alors

$PPS_{bid} \leftarrow PPS_{initial}(TCM)$

// Apprentissage

$\eta_A(PU_i) \leftarrow \eta_A(PU_i) + 1$

Si ($\eta_A(PU_i) > 1$)

Alors

$PPS_{bid} \leftarrow PPS_{initial}(TCM) + \eta_A(PU_i) * \Psi$

Si ($PPS_{bid} > PPS_{max}$)

Alors

$PPS_{bid} \leftarrow PPS_{max}$

Fin Si

Fin Si

// Fin de l'apprentissage

Envoie de l'offre (PPS_{bid}) du TCM

Fin Si

Fin Si

Si (réception du message *WINNER*)

Alors

Si (En_Partage == faux)

Alors // Le TCM répond par un acquittement positif

ACK $\leftarrow$ OK et envoi du message ACK

$\eta_A(PU_i) \leftarrow 0$

Handover Spectral

En_Partage $\leftarrow$ vrai

Sinon // Le TCM répond par un acquittement négatif

ACK $\leftarrow$ NO et envoi du message ACK

Fin Si

Si (la durée attribuée expire)

Alors

En_Partage $\leftarrow$ faux

Fin Si

FIN

Emna TRIGUI

Doctorat : Réseaux, Connaissances et Organisations

Année 2013

Gestion multi-agents du spectre pour des terminaux mobiles à radio cognitive

Cette thèse s'intéresse aux concepts de mobilité et de gestion du spectre dans les réseaux à radio cognitive. Ainsi, nous avons proposé deux approches décentralisées basées sur les systèmes multi-agents (SMA). Nous avons, tout d'abord, intégré des agents au sein des utilisateurs secondaires (n'ayant pas de licence pour l'accès au spectre) et des utilisateurs primaires (disposant d'une licence) et nous avons défini leurs comportements au moment du handover.

Notre première solution *NESAM* propose un mécanisme de négociation entre les agents permettant aux utilisateurs secondaires de se voir allouer une bande de spectre avec un bon rapport prix par durée d'allocation. Nous avons, par ailleurs, proposé une deuxième solution *LASMA* qui se base sur l'enchère combinée avec de l'apprentissage pour assurer une gestion efficace du spectre ainsi qu'une gestion de la mobilité des utilisateurs à radio cognitive. Nos algorithmes prennent en compte les préférences des utilisateurs, comme la fréquence spectrale, le prix et la durée ainsi que les contraintes de l'environnement spectral telles que les bandes de fréquences disponibles.

Nos propositions assurent une exploitation importante des ressources spectrales tout en diminuant le nombre de handovers spectraux. De plus, nos algorithmes offrent un handover spectral transparent et sans interruption lors des déplacements des utilisateurs. Nous avons prouvé également que nos solutions permettent de satisfaire les besoins des utilisateurs et d'améliorer leur utilité.

Mots clés : radio cognitive - gestion des ressources radio - intelligence artificielle répartie - négociations - ventes aux enchères – transfert intercellulaire.

Multi-agent Spectrum Management for Mobiles Cognitive Radio Terminals

In this thesis, we are interested in mobile cognitive radio networks while ensuring an efficient spectrum sharing and seamless handover at the same time. Hence, we propose two decentralized approaches based on multi-agent systems. We first deployed agents on each primary (licensed) and secondary (unlicensed cognitive radio) users, respectively. Besides, we define agents' behaviors during the handover process.

Our proposal *NESAM* defines a novel negotiation mechanism between agents to allow secondary users assigning the appropriate spectrum band giving a good price for the use duration. We have also proposed a second solution *LASMA* using the learning based auctions. Our algorithms take into account users' requirements such as spectrum frequency, price and duration as well as environment's constraints such as available resources.

Our proposals improve the overall spectrum utilization and minimize the number of spectrum handovers when users move from one network to another one. This proves that our algorithms ensure efficient spectrum allocation and enable seamless handover during user's mobility. Besides, we proved that our approaches guarantee users' satisfaction and improve their utility.

Keywords: cognitive radio networks - radio resource management - distributed artificial intelligence - negotiations - auctions - roaming.