



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCCEN

THÈSE LMD

Présentée à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT D'INFORMATIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT

Spécialité: *Intelligence Artificielle et Ingénierie des Connaissances*

Par :

Mme BENIDRIS Fatima Zohra

Sur le thème

Gestion intelligente de spectre et de routage dans un contexte radio cognitive par apprentissage

Soutenue publiquement le 13 juin 2016 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mr BENDIMERAD Fethi Tarik	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mr BENMAMMAR Badr	MCA	Université de Tlemcen	Directeur de thèse
Mr BELALEM Ghalem	Professeur	Université d'Oran 1	Examineur
Mr FARAOUN Kamel Mohamed	Professeur	UDL – Sidi Bel Abbès	Examineur
Mr BOUKLI HACENE Sofiane	MCA	UDL – Sidi Bel Abbès	Examineur
Mr LEHSAINI Mohamed	MCA	Université de Tlemcen	Examineur

*Laboratoire de Télécommunications de Tlemcen (LTT)
BP 230, 13000 Tlemcen - Algérie*

Remerciements

Ces quelques lignes ne pourront jamais exprimer la reconnaissance que j'éprouve envers tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué par leurs conseils, leurs encouragements ou leurs amitiés à l'aboutissement de ce travail.

J'adresse mes plus vifs remerciements à mon encadreur de thèse Mr. Benmammar Badr pour la qualité de son encadrement, pour ses conseils constructifs et son appui tout au long de ce projet.

Je remercie particulièrement mes chers parents, grâce à dieu et eux, j'atteins aujourd'hui un objectif qui m'est très cher.

Je remercie chaleureusement mon mari pour son précieux soutien et son aide sans faille tout au long de la préparation de ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude à mes sœurs et frères pour leur encouragement et tout leur apport qui n'était pas moindre.

Je ne saurais omettre d'adresser mes sincères remerciements à Mr Bendimerad Fethi Tarik et Mme Merghem Leila 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 récente évolution de la technologie sans fil suit un rythme effréné dans notre société moderne. Cette croissance explosive des services sans fil engendre une forte demande en termes de spectre radio, suscitant ainsi une pénurie de la ressource spectrale. La radio cognitive est apparue comme un nouveau paradigme pour améliorer l'utilisation du spectre radio en permettant d'y accéder de manière opportuniste. Cependant, la mise en œuvre du concept cognitif soulève des défis uniques en raison de leur coexistence avec les réseaux primaires ainsi que les diverses exigences de qualité de service.

C'est dans ce contexte que les fonctions de la gestion de spectre sont nécessaires pour le bon fonctionnement de la radio cognitive afin d'éviter les collisions et les interférences et maximiser l'utilisation du spectre. Par ailleurs, la vertu dynamique de ce type de réseau pose de nouveaux défis techniques sur la conception de son algorithme de routage d'où la nécessité de concevoir de nouveaux protocoles de routage appropriés à cet environnement cognitif.

L'objectif de cette thèse de doctorat est de proposer de nouvelles solutions aux problèmes de gestion de spectre et de routage dans les réseaux de radio cognitive. En effet, la première solution se focalise sur la gestion intelligente de spectre où l'idée de coopération multi-agents entre les utilisateurs est mise en place dans un réseau de radio cognitive. Ce dernier est décomposé en clusters en utilisant une technique de regroupement par apprentissage. En outre, la deuxième solution qui s'intéresse au problème de routage se base également sur le clustering par la proposition d'un protocole de routage qui se comporte d'une manière réactive ou proactive selon les informations acquises par les cluster-heads. Les résultats de simulation obtenus assurent la satisfaction des utilisateurs radio cognitive et prouvent la pertinence et la performance de nos approches.

Mots-clés : Radio cognitive, Gestion de spectre, Protocole de routage, Système multi-agent, Clustering, Intelligence artificielle.

Abstract

The recent evolution of wireless technology follows a frenetic pace in our modern society. This explosive growth of wireless services generates a high demand in terms of radio spectrum, thereby creating a shortage of spectrum resources. The cognitive radio has emerged as a new paradigm for improving the use of the radio spectrum by allowing access opportunistically. However, the implementation of cognitive concept raises unique challenges because of their coexistence with the primary networks and the various quality-of-services requirements.

In this context, the functions of spectrum management are necessary for the proper operation of cognitive radio to avoid collisions and interference and maximize the use of the spectrum. Furthermore, the dynamic virtue of this type of network poses new technical challenges for the design of its routing algorithm; hence the need to design appropriate new routing protocols in this cognitive environment.

The objective of this thesis is to propose new solutions to the management of spectrum and routing in cognitive radio networks. Indeed, the first solution focuses on the intelligent management of the spectrum where the idea of multi-agent cooperation between users is implemented in a cognitive radio network which is divided into clusters using a clustering technique based on learning. Additionally, the second solution that focuses on the routing issue is also based on clustering by the proposal of a hierarchical routing protocol that behaves in a reactive or proactive manner according to information acquired by cluster - heads. The obtained simulation results ensure the satisfaction of cognitive radio users and prove the relevance and performance of our approaches.

Key-words: Cognitive radio, Spectrum management, Routing protocol, Multi-agent system, Clustering, Artificial intelligence.

ملخص

التطورات الاخيرة التي عرفتها التكنولوجيا اللاسلكية تتبع ايقاعا متسارعا في مجتمعنا المعاصر. هذا النمو الهائل للخدمات اللاسلكية يولد ارتفاع الطلب من حيث الطيف الترددي مما يخلق نقصا في موارد الطيف. وقد برز الراديو المعرفي كنموذج جديد لتحسين استخدام الطيف الترددي من خلال استعماله بطريقة نفعية. ومع ذلك، فإن تنفيذ مفهوم الراديو المعرفي يثير تحديات فريدة من نوعها بسبب تعايشهم مع الشبكات الرئيسية ومختلف متطلبات جودة الخدمة. وفي هذا السياق فان وظائف تسيير الطيف ضرورية لتحسين عمل الراديو المعرفي من اجل تجنب التصادم والتداخلات وتحقيق الاستفادة القصوى من الطيف. وعلاوة على ذلك، في ظل ديناميكية هذا النوع من الشبكات تظهر تحديات تقنية جديدة لتصميم خوارزمية التوجيه الخاص به، ومن هنا جاءت الحاجة لتصميم بروتوكولات توجيه جديدة مناسبة لهذه البيئة المعرفية.

الهدف من هذه الرسالة هو اقتراح حلول جديدة لتسيير الطيف والتوجيه في شبكات الراديو المعرفي. في الواقع، يركز الحل الأول على التسيير الذكي للطيف الذي يتم فيه تنفيذ فكرة التعاون متعدد الوكلاء بين المستخدمين في شبكة الراديو المعرفي التي تنقسم إلى مجموعات باستخدام تقنية التجمع التعليمي. بالإضافة إلى ذلك، يستند الحل الثاني أيضا على المجموعات لحل مسألة التوجيه باقتراح بروتوكول التوجيه الذي يتصرف بطريقة رد الفعل أو بطريقة استباقية وفقا للمعلومات التي تحصل عليها رؤساء المجموعات. نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها تضمن ارضاء مستخدمي الراديو المعرفي وثبتت أهمية وفعالية حلولنا المقترحة.

الكلمات الرئيسية : الراديو المعرفي، تسيير الطيف، بروتوكول التوجيه، نظام متعدد الوكلاء، التجمع، الذكاء الاصطناعي.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	ii
Abstract	iii
ملخص	iv
Table des matières	v
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xi
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Réseau de radio cognitive	5
1.1 Introduction	6
1.2 Radio cognitive	6
1.2.1 Historique	6
1.2.2 Définition	6
1.2.3 Avantages de la radio cognitive.....	8
1.3 Architecture de la radio cognitive.....	8
1.4 Cycle de cognition.....	9
1.5 Architecture des réseaux de radio cognitive	11
1.5.1 Composants du réseau	11
1.5.2 Hétérogénéité du spectre	13
1.5.3 Hétérogénéité du réseau	13
1.6 Fonctions de la RC pour la gestion du spectre.....	14
1.6.1 Description des fonctions	15
1.6.1.1 Détection de spectre	15
1.6.1.2 Décision du spectre.....	16
1.6.1.3 Partage du spectre.....	19
1.6.1.4 Mobilité du spectre	20
1.6.2 Niveau d'implémentation des fonctions au modèle OSI.....	22
1.7 Domaines d'application de la radio cognitive.....	23

1.7.1 Réseaux sans fil de prochaine génération	23
1.7.2 Coexistence de différentes technologies sans fil.....	24
1.7.3 Réseaux d'urgence	24
1.7.4 Réseaux pour les systèmes de santé.....	24
1.7.5 Réseaux militaires	25
1.8 Conclusion	25
Chapitre 2 : Gestion de spectre dans les réseaux de radio cognitive	26
2.1 Introduction.....	27
2.2 Classifications du partage de spectre dans les RRC.....	27
2.2.1 Classification basée sur l'architecture	28
2.2.2 Classification basée sur le comportement d'allocation	28
2.2.3 Classification basée sur la technologie d'accès au spectre.....	29
2.2.4 Classification basée sur la portée du réseau	30
2.5 Les techniques d'accès au spectre	31
2.5.1 Théorie des jeux	31
2.5.2 Contrôle d'accès au canal (MAC)	32
2.5.3 Négociation locale et enchères	33
2.5.4 Réseaux de neurones	33
2.5.5 Modèle de Markov caché (HMM)	34
2.5.6 Algorithmes génétiques	34
2.5.7 Systèmes multi-agents	35
2.6 Utilisation des SMA pour la gestion du spectre dans le contexte de la RC.....	35
2.6.1 Evolution de l'intelligence artificielle distribuée vers les SMA.....	35
2.6.2 Concept d'agent.....	36
2.6.3 Système multi-agent	36
2.6.4 Mode d'interaction entre les agents	37
2.6.5 Agent Vs radio cognitive.....	38
2.6.6 Application des SMA dans les RRC.....	39
2.7 Conclusion	41
Chapitre 3 : Routage dans les réseaux de radio cognitive	42
3.1 Introduction.....	43
3.2 Généralité sur le routage.....	43
3.3 Métriques de routage	45
3.4 Types de routage	46

3.4.1 Routage proactif	46
3.4.2 Routage réactif	46
3.4.3 Routage hybride	47
3.5 Hiérarchisation d'un réseau par le clustering.....	48
3.6 Les protocoles non hiérarchiques	49
3.6.1 DSDV (Destination Sequenced Distance Vector).....	49
3.6.2 OLSR (Optimized Link State Routing)	50
3.6.3 AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector)	51
3.6.4 DSR (Dynamic Source Routing)	52
3.7 Protocoles de routage hiérarchiques	53
3.7.1 CGSR (Clusterhead Gateway Switch Routing)	53
3.7.2 HSR (Hierarchical State Routing)	53
3.7.3 ZRP (Zone Routing Protocol).....	54
3.8 Description du problème de routage dans les RRC	54
3.9 Défis de routage dans les RRC	55
3.10 Classification des protocoles de routage dans les RRC	57
3.10.1 Routage conscient de l'activité des PU.....	57
3.10.2 Routage basé sur la localisation.....	58
3.10.3 Routage basé sur le clustering	58
3.10.4 Routage multi-chemin	58
3.10.5 Routage basé sur l'apprentissage par renforcement	58
3.10.6 Routage basé sur la mobilité.....	58
3.11 Protocoles de routage dans les RRC	59
3.12 Conclusion	65
Chapitre 4 : Gestion de spectre en utilisant les systèmes multi-agents et le clustering	66
4.1 Introduction.....	67
4.2 Scénario considéré.....	67
4.3 Approche multi-agents basée sur l'algorithme de clustering K-means++.....	68
4.3.1 Regroupement des nœuds en utilisant l'apprentissage.....	69
4.3.2 Architecture interne du cluster des SU	71
4.3.3 Architecture interne du cluster des PU	72
4.3.4 Modèle d'allocation de spectre.....	73
4.3.5 Algorithmes d'allocation de spectre	74
4.4 Approche globale pour l'allocation des bandes licenciées et non licenciées	79

4.4.1 Coopération intra-cluster	81
4.4.2 Coopération inter-cluster	84
4.4.3 Exemple illustratif	85
4.5 Evaluation des performances	86
4.5.2 Comparaison entre les différents algorithmes proposés	91
4.5.3 Comparaison avec d'autres approches	94
4.6 Conclusion	97
Chapitre 5 : Protocole de routage basé sur le clustering	99
5.1 Introduction	100
5.2 Contexte	100
5.3 Protocole de routage proposé	101
5.3.1 Découverte de la route	101
5.3.2 La formation de la route	104
5.3.3 La maintenance de la route	105
5.3.4 Un exemple explicatif	106
5.4 Evaluation des performances de l'approche de routage proposée	107
5.4.1 Résultats obtenus	108
5.5 Conclusion	111
Conclusion générale	112
Liste des acronymes	115
Bibliographie	117

Liste des figures

Figure 1.1 Schéma de la radio cognitive	9
Figure 1.2 Cycle de cognition.....	10
Figure 1.3 L'architecture du réseau de radio cognitive.....	11
Figure 1.4 L'accès dynamique au spectre.....	13
Figure 1.5 Les fonctions de la gestion spectrale.	14
Figure 1.6 Structure de la détection de spectre dans un RRC.	15
Figure 1.7 Structure de la décision de spectre dans un RRC.....	17
Figure 1.8 Structure de partage de spectre dans un RRC.....	19
Figure 1.9 Structure de la mobilité dans un RRC	21
Figure 1.10 Modules RC et leur adjonction aux couches du modèle OSI.....	23
Figure 2.1 Classification de partage du spectre dans le RRC.....	27
Figure 2.2 Partage de spectre coopératif et non-coopératif.....	29
Figure 2.3 Partage du spectre pour les différentes technologies d'accès au spectre.....	30
Figure 2.4 Partage de spectre intra-réseau et inter-réseau dans le RRC.....	31
Figure 2.5 Classification des types d'interactions dans un SMA	38
Figure 3.1 Le chemin utilisé dans le routage entre la source et la destination.....	44
Figure 3.2 Un simple réseau ad hoc constitué de trois unités mobiles.....	44
Figure 3.3 Classification des protocoles de routage Ad Hoc.	47
Figure 3.4 Topologie d'un réseau de clusters	48
Figure 3.5 Inondation du réseau	51
Figure 3.6 Recherche de route dans AODV.	52
Figure 3.7 Classification des protocoles de routage dans les RRC.	57
Figure 4.1 Le partage de spectre licencié.....	67
Figure 4.2 Allocation coopérative de spectre basée sur le clustering.....	69
Figure 4.3 Cluster des SU.....	71
Figure 4.4 Cluster des PU.....	72
Figure 4.5 Modèle d'allocation de spectre.....	74
Figure 4.6 Allocation coopérative du spectre non licencié.	81
Figure 4.7 Fonctionnement de l'agent SU-leader.	82
Figure 4.8 Lancement des agents assistants.....	82
Figure 4.9 Fonctionnement de l'agent de détection.	83
Figure 4.10 Fonctionnement des agents dans le cluster des SU.....	84
Figure 4.11 L'utilisation du spectre.....	88
Figure 4.12 Coopération entre les SU et les PU.....	89

Figure 4.13 Utilité des PU et des SU.....	90
Figure 4.14 Collision par rapport aux canaux non licenciés.	91
Figure 4.15 Taux d'allocation avec succès.	92
Figure 4.16 Impact des PU sur l'allocation du spectre.	93
Figure 4.17 Consommation d'énergie.....	94
Figure 4.18 Comparaison en termes de temps de réponse.	95
Figure 4.19 Comparaison en termes d'allocation de spectre.....	96
Figure 4.20 Comparaison en termes de coût de communication.....	97
Figure 5.1 Réseau de radio cognitive.....	100
Figure 5.2 Diffusion des paquets RREQ.....	102
Figure 5.3 Elimination des paquets RREQ.	103
Figure 5.4 Organigramme de la découverte de route.	103
Figure 5.5 Sélection de la route.	104
Figure 5.6 La route établie entre la source et la destination.	104
Figure 5.7 Formation de la route.	105
Figure 5.8 Exemple de routage dans un RRC.....	106
Figure 5.9 Maintenance de la route.	107
Figure 5.10 Nombre Moyen des RREQ diffusés dans le réseau.	108
Figure 5.11 Nombre moyen des RREP diffusés dans le réseau.	109
Figure 5.12 Temps moyen de réponse.	110
Figure 5.13 Taux moyen de satisfaction des SU.....	111

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Agents cognitifs vs réactifs.....	36
Tableau 2.2 Comparaison entre un agent et une radio cognitive.	38
Tableau 3.1 Avantages et inconvénients des protocoles de routages dans les RRC.	63
Tableau 4.1 Signification des acronymes.	75
Tableau 4.2 Propositions des PU.....	85
Tableau 4.3 Demandes des SU.....	85
Tableau 4.4 Allocation de spectre.	86
Tableau 4.5 Paramètres de simulation.....	87

Introduction générale

1. Contexte

La récente évolution de la technologie sans fil est marquée par l'apparition de nouveaux appareils intelligents capables d'offrir des débits plus élevés et des services innovants pour une variété d'applications de communication. L'augmentation exponentielle de ces appareils sans fil et de leur utilisation entraîne une forte demande en termes de ressources spectrales qui sont devenus de plus en plus rares. Ces ressources spectrales peuvent être licenciées ou non licenciées, le spectre licencié est utilisé pour des services spécifiques tandis que le spectre sans licence tel que les bandes ISM (Industrielles, Scientifiques et Médicales) est disponible gratuitement pour les services sans fil et les besoins de la recherche.

Selon une étude faite par la commission fédérale des communications (FCC) en 2002, l'utilisation du spectre n'est pas uniforme: les bandes sous licence sont sous-exploitées pendant que les bandes ISM sont surchargées. Ce rapport indique également que l'utilisation moyenne des bandes sous licence est de 15-85% [1]. La partie non utilisée du spectre sous licence est connue comme un espace blanc. Cette utilisation inefficace du spectre est due à la politique statique de l'allocation du spectre adoptée par les gouvernements à travers le monde, où le spectre sans fil est attribué aux utilisateurs licenciés à long terme pour des grandes régions géographiques.

Pour résoudre ce problème, la radio cognitive (RC) est apparue comme une nouvelle technologie qui allie le domaine de télécommunication et l'intelligence artificielle et qui permet d'exploiter le spectre existant de manière opportuniste et efficace. En effet, il est possible de profiter des espaces blancs existants dans le spectre pour augmenter le nombre d'utilisateurs et pour mieux répartir les ressources disponibles dans les systèmes sans fil de futures générations grâce à la faculté d'écouter et de s'adapter à l'environnement.

L'introduction du principe de la RC dans le monde des réseaux sans fil exige une conception d'un réseau composé de plusieurs appareils intelligents en se basant sur un ensemble de règles et de protocoles d'interaction entre les nœuds dans le réseau. Par ailleurs, les réseaux de radio cognitive (RRC) doivent pouvoir coexister pour rendre les systèmes de la RC pratiques, ce qui peut générer des interférences aux autres utilisateurs. Cependant, la mise en œuvre du concept cognitif nécessite des études approfondies sur les principales fonctions de cette nouvelle technologie comme la détection des ressources spectrales, la décision d'accès au spectre, le partage des bandes non utilisées et la mobilité du spectre.

Au cours de ces dernières années, la RC est devenue un domaine de recherche très actif et plusieurs recherches sont reposées sur un ensemble de problématique à résoudre qui visent principalement à améliorer l'exploitation du spectre licenciés et non licenciés et à la répartition dynamique des fréquences entre les terminaux RC en prenant en compte les exigences des utilisateurs de la RC et les conditions du partage. Par ailleurs, la vertu

dynamique de ce type de réseau pose de nouveaux défis techniques sur la conception de son algorithme de routage. En outre, l'utilisation des protocoles de routage traditionnels des réseaux ad hoc directement dans les RRC entraîne de mauvaises performances en termes de débit, de délai, et de probabilité de perte de paquets d'où la nécessité de concevoir de nouveaux protocoles de routage appropriés à l'environnement des RRC.

2. Contributions

Dans cette thèse et afin de résoudre ces problématiques, nous avons modélisé d'une manière intelligente le RRC afin d'optimiser ses fonctionnalités comme la gestion des ressources spectrales et le routage. Notre première contribution dans ce contexte se focalise sur la gestion du spectre licencié et non licencié où l'idée de coopération multi-agents entre les utilisateurs est mise en place dans un réseau décomposé en clusters en utilisant une technique de regroupement par apprentissage (K-means++). En effet, chaque nœud dans le réseau est équipé d'un agent et ces agents sont regroupés en clusters qui sont gérés par des cluster-heads. Cependant, il existe deux types de coopération : l'une est une coopération intra-cluster pour l'allocation du spectre qui se fait par une simple demande d'un nœud à son cluster-head et l'autre est une coopération inter-cluster entre les cluster-heads des différents clusters dans le réseau pour se mettre d'accord sur le partage du spectre disponible. En effet, la technique de clustering est également une solution clé au problème de routage pour cela notre deuxième contribution se base essentiellement sur le clustering pour la gestion de routage dans les RRC. En outre, le protocole de routage que nous avons proposé est un protocole basé sur le clustering qui compte sur les cluster-heads dans les différentes phases de routage (découverte, formation et maintenance de la route).

Dans notre première solution destinée à la gestion du spectre, nous avons établi les contributions suivantes :

- La résolution coopérative par l'introduction des SMA dans les RRC afin d'éviter les problèmes d'interférences et de collisions entre les utilisateurs et augmenter leurs utilités en termes de quantité de spectre à partager, prix et durée de partage.
- L'utilisation du clustering afin d'améliorer la gestion du spectre et minimiser le coût de la communication et de la consommation d'énergie dans le réseau.
- L'attribution du processus d'allocation du spectre aux clusters-head en proposant un algorithme d'allocation qui prend en compte la priorité des demandes selon certains critères.
- L'intégration de deux agents assistants pour le cluster-head : un agent de détection du spectre et un agent d'allocation du spectre afin d'alléger la charge du cluster-head.

Pour la deuxième solution proposée aux problèmes de routage dans les RRC, nous avons établi les contributions suivantes :

- La décomposition du réseau par la méthode de regroupement des nœuds par apprentissage (k-means++) pour minimiser le nombre des paquets envoyés dans le réseau.
- La proposition d'un nouveau protocole de routage basé sur le clustering qui peut interagir d'une manière réactive et proactive à la fois.
- Le traitement du problème de congestion de la diffusion ainsi que les boucles de routage dans les RRC en introduisant un seuil de diffusion dans l'algorithme de découverte de la route.
- L'amélioration de la phase de formation de la route en attribuant au cluster-head la tâche de sélection des nœuds relais qui peuvent garantir la qualité du lien.
- La maintenance de la route en étudiant les différents cas qui peuvent affecter les liens de la route.

En outre, nous avons travaillé sur la réalisation des contributions citées ci-dessus et nous avons effectué des différentes simulations pour valider nos algorithmes. Les résultats obtenus sont satisfaisants et compétitifs avec ceux trouvés dans la littérature. Finalement, nous pouvons assurer que nos solutions proposées dans le cadre de cette thèse sont originales et faciles à mettre en œuvre dans les RRC.

3. Organisation du rapport

Ce rapport de thèse est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présentons le concept de la RC ainsi que ses différentes composantes et fonctionnalités. Ensuite, nous introduisons l'architecture des RRC avec ses différents éléments. Nous poursuivons par une étude détaillée sur les fonctions de la RC pour la gestion de spectre et leurs défis de recherche. A la fin de ce chapitre, nous exposons les différents domaines d'application de la RC.

Dans le deuxième chapitre, nous commençons par une étude sur le partage de spectre et les différentes classifications proposées. Par la suite, un état de l'art sur les différentes techniques existantes pour le partage de spectre est présenté. Enfin nous consacrons une section sur la technique des SMA en présentant le concept multi-agents, ses caractéristiques et les travaux existants dans la littérature pour la résolution des problématiques liées au partage de spectre dans le contexte des RRC.

Dans le troisième chapitre, nous présentons des généralités sur le routage, les métriques et les protocoles de routages les plus connus dans les réseaux Ad hoc. Ensuite, nous détaillons le principe du clustering pour la hiérarchisation d'un réseau ainsi que les différents protocoles

existants. Enfin, nous abordons le problème de routage dans les RRC et les solutions proposées dans la littérature.

Le quatrième chapitre est dédié à la description de notre solution que nous avons proposée pour une gestion intelligente et efficace du spectre. Dans un premier temps, nous exposons le scénario que nous avons considéré et nous formulons nos problèmes qui motivent nos propositions. Puis, nous présentons notre approche multi-agents basée sur le clustering pour l'allocation du spectre licencié en détaillant la méthode de regroupement par apprentissage utilisée pour la formation des clusters et en expliquant l'architecture interne des clusters et les tâches affectées pour chaque agent dans le cluster. Nous exposons également les différents algorithmes que nous avons proposés de les intégrer dans le processus d'allocation du spectre pour une meilleure gestion de ce dernier. Ensuite, nous présentons une approche globale qui prend en compte l'allocation des bandes licenciées et non licenciées en même temps. Nous ajoutons à l'occasion des agents assistants au cluster-head pour traiter le problème de collision dans le cadre des bandes non licenciées. Le fonctionnement de cette approche est expliqué par un exemple illustratif. A la fin, nous décrivons les résultats de l'évaluation des performances de nos contributions par simulation.

Le dernier chapitre, quant à lui est consacré à la présentation de notre approche de routage dans les RRC. Nous décrivons le contexte et le protocole proposé ainsi que ses différentes étapes qui seront illustrées par un exemple explicatif. Ensuite, nous évaluons par simulation les performances du protocole proposé et nous le comparons avec le protocole AODV.

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

Chapitre 1 : Réseau de radio cognitive

Sommaire

1.1 Introduction.....	Erreur ! Signet non défini.
1.2 Radio cognitive	Erreur ! Signet non défini.
1.2.1 Historique.....	Erreur ! Signet non défini.
1.2.2 Définition	Erreur ! Signet non défini.
1.2.3 Avantages de la radio cognitive.....	Erreur ! Signet non défini.
1.3 Architecture de la radio cognitive.....	Erreur ! Signet non défini.
1.4 Cycle de cognition.....	Erreur ! Signet non défini.
1.5 Architecture des réseaux de radio cognitive	Erreur ! Signet non défini.
1.5.1 Composants du réseau	Erreur ! Signet non défini.
1.5.2 Hétérogénéité du spectre	Erreur ! Signet non défini.
1.5.3 Hétérogénéité du réseau	Erreur ! Signet non défini.
1.6 Fonctions de la RC pour la gestion du spectre.....	Erreur ! Signet non défini.
1.6.1 Description des fonctions	Erreur ! Signet non défini.
1.6.1.1 Détection de spectre	Erreur ! Signet non défini.
1.6.1.2 Décision du spectre.....	Erreur ! Signet non défini.
1.6.1.3 Partage du spectre.....	Erreur ! Signet non défini.9
1.6.1.4 Mobilité du spectre	Erreur ! Signet non défini.
1.6.2 Niveau d'implémentation des fonctions au modèle OSI.....	Erreur ! Signet non défini.
1.7 Domaines d'application de la radio cognitive.....	Erreur ! Signet non défini.
1.7.1 Réseaux sans fil de prochaine génération	Erreur ! Signet non défini.
1.7.2 Coexistence de différentes technologies sans fil.....	Erreur ! Signet non défini.
1.7.3 Réseaux d'urgence	Erreur ! Signet non défini.
1.7.4 Réseaux pour les systèmes de santé.....	Erreur ! Signet non défini.
1.7.5 Réseaux militaires	Erreur ! Signet non défini.
1.8 Conclusion	Erreur ! Signet non défini.

1.1 Introduction

Il est aujourd'hui largement reconnu qu'une grande partie du spectre radio est inutilisée ce qui conduit à une sous-utilisation des ressources en termes de fréquences. Pour résoudre ce problème, la radio cognitive est apparue comme une nouvelle technologie dans le domaine de télécommunication qui permet d'exploiter le spectre existant de manière opportuniste et efficace. En effet, il est possible de profiter des espaces blancs existants dans le spectre pour augmenter le nombre d'utilisateurs et pour mieux répartir les ressources disponibles dans les systèmes sans fil de futures générations grâce à la faculté d'écouter et de s'adapter à l'environnement. Cependant, les RRC imposent des défis uniques en raison de leur coexistence avec les réseaux primaires ainsi que les diverses exigences de qualité de service. C'est dans ce contexte que les fonctions de la gestion de spectre sont nécessaires pour le bon fonctionnement de la RC afin d'éviter les collisions et les interférences et augmenter l'utilisation du spectre. Nous commencerons ce premier chapitre par la présentation du concept de la radio cognitive ainsi que ses différentes composantes et fonctionnalités. Ensuite, nous introduisons l'architecture de RRC avec ses différents éléments. Nous poursuivrons par une étude détaillée sur les fonctions de la RC pour la gestion de spectre et leurs défis de recherche. A la fin de ce chapitre, nous allons exposer les différents domaines d'application de la RC.

1.2 Radio cognitive

1.2.1 Historique

Le concept de radio cognitive a été introduit par Joseph Mitola III, lors d'un séminaire à l'institut royal de technologie en Suède (KTH) en 1998, publié plus tard dans un article de Mitola et Gerald Q. Maguire, Jr. en 1999 [2].

Connu comme le « Père de la radio logicielle ». Dr. Mitola est l'un des auteurs les plus cités dans le domaine. Mitola combine son expérience de la radio logicielle ainsi que sa passion pour l'apprentissage automatique et l'intelligence artificielle (IA) pour mettre en place la technologie de la radio.

1.2.2 Définition

La définition officielle de la RC est exprimée par Mitola dans sa thèse de Doctorat, comme étant [3]:

The term cognitive radio identifies the point at which wireless personal digital assistants (PDAs) and the related networks are sufficiently computationally intelligent about radio resources and related computer-to-computer communications to:

(a) Detect user communications needs as a function of use context, and

(b) To provide radio resources and wireless services most appropriate to those needs¹

Après cette définition, plusieurs auteurs ont essayé de définir la RC différemment. La définition donnée par la FCC [4] considère la radio cognitive comme une radio qui peut changer les paramètres de son émetteur sur la base des interactions avec l'environnement dans lequel elle opère. L'union internationale de télécommunication (ITU) [5] qui est l'organisme de réglementation internationale a défini la RC comme suit : Un système de radio employant une technologie qui lui permet d'obtenir la connaissance de son environnement opérationnel et géographique, les politiques établies et son état interne; d'ajuster dynamiquement et de manière autonome ses paramètres et ses protocoles opérationnels en fonction de sa connaissance obtenue afin d'atteindre des objectifs prédéfinis; et d'apprendre à partir des résultats obtenus. D'après Akyildiz [6] la radio cognitive est la technologie clé qui permettra aux réseaux de nouvelle génération d'utiliser et de partager le spectre de manière opportuniste. Selon Haykin [7], 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.

Actuellement des efforts sont investis pour aboutir à une définition ferme et précise. Ainsi, par exemple le SDR Forum² et le groupe de travail P1900 de l'IEEE ont approuvé en Novembre 2007 [8] ces définitions :

- a) Une radio intelligente est une radio dans laquelle les systèmes de communications sont conscients de leur environnement et état interne, et peuvent prendre des décisions quant à leur mode de fonctionnement radio en se basant sur ces informations et objectifs prédéfinis. Les informations issues de l'environnement peuvent comprendre ou pas des informations de localisation relatives aux systèmes de communication".
- b) La radio intelligente (comme définie en (a)) utilise la radio logicielle restreinte, la radio adaptative ainsi que d'autres technologies pour ajuster automatiquement son fonctionnement afin d'atteindre les objectifs désirés".

Ces définitions, bien que perfectibles, regroupent les éléments essentiels d'une radio intelligente. Afin de mieux comprendre le principe de la radio cognitive, nous allons présenter plus de détails sur son architecture et son cycle de cognition dans les sections suivantes.

¹ Nous avons pris la décision de ne pas traduire cette définition pour qu'elle garde toute son intégrité et tout son sens.

² Le SDR Forum a été fondé en 1996 par Wayne Bonser de l'AFRL (Air Force Rome Labs) dans le but d'élaborer des normes industrielles du matériel et du logiciel des technologies SDR. Actuellement, le SDR Forum comprend de nombreux groupes de travail menant des travaux de recherche dans les applications de la radio intelligente et l'efficacité du spectre.

1.2.3 Avantages de la radio cognitive

Le but principal de l'utilisation d'une radio cognitive par rapport à une radio primitive est dû aux avantages suivants [9]:

- ✓ La radio cognitive apportera des solutions aux problèmes liés aux allocations fixes des fréquences. Toutes les fréquences se trouvent alors utilisées, ce qui augmente l'utilisation du spectre.
- ✓ La radio cognitive, par sa capacité à modifier au cours d'une communication ses caractéristiques : fréquence, puissances du signal, contribuera à améliorer les performances globales du système en assurant en permanence des performances optimales en fonction de l'environnement et de la position.
- ✓ La radio cognitive facilitera aussi l'interopérabilité entre les différents réseaux et standards de télécommunication actuels.

La radio cognitive utilise le spectre disponible de manière efficace, ce qui résout le problème de la rareté du spectre.

1.3 Architecture de la radio cognitive

La Radio cognitive assemble deux composantes avec des particularités et des fonctionnalités distinctes. La première partie symbolisée sur la figure 1.1 par la radio logicielle, est plus connue sous le terme de Software Defined Radio (SDR). C'est le composant matériel et logiciel doté des capacités d'auto-configuration, d'auto-programmation et d'auto-adaptation. Il réalise les traitements relatifs au filtrage, à la décimation, à la démodulation et au décodage du signal entre autres. Le second composant est consacré au développement de modules, symboles de l'intelligence (moteurs de l'intelligence). Les moteurs d'analyse, de mesure, de raisonnement ou encore de prise de décision tels que présentés à la figure 1.1, constituent des exemples de fonctionnalités implémentées par les systèmes radio cognitive. L'intérêt d'une présentation aussi détaillée de ces propriétés est de démontrer toute la maturité de la radio cognitive à supporter la complexité et la diversité des flux engendrés par le domaine de la santé [10].

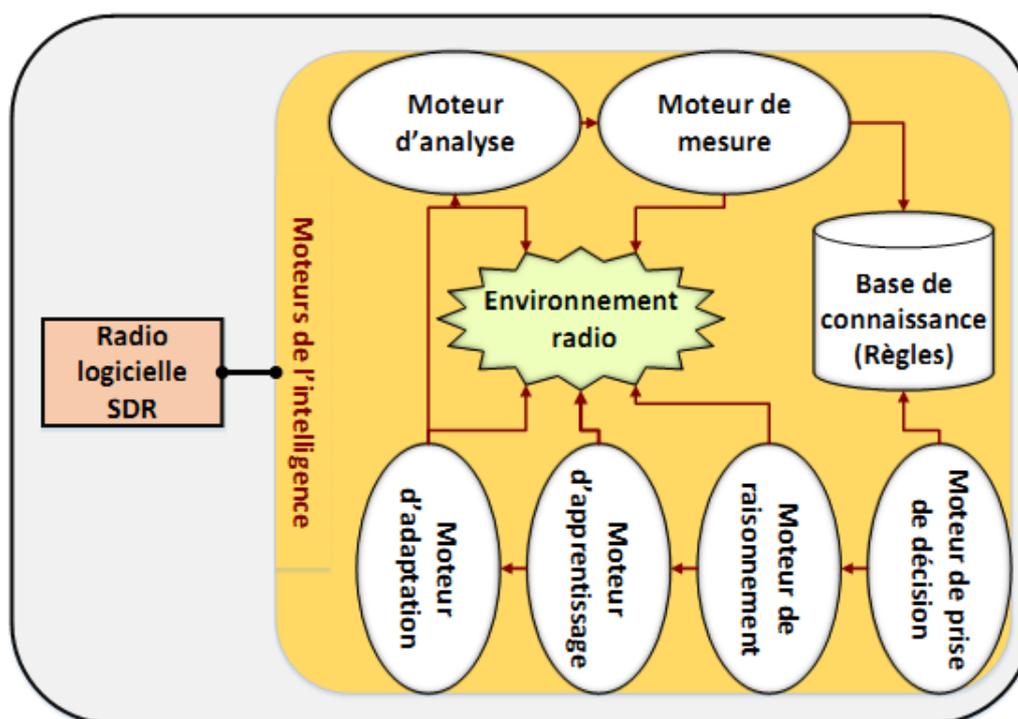


Figure 1.1 Schéma de la radio cognitive [10].

La connaissance et l'aptitude à prendre conscience de son environnement constituent particulièrement des facteurs pouvant simplifier la réalisation du suivi en tout lieu avec une prise en compte des contraintes inhérentes. La mise en œuvre de l'ensemble de ces propriétés prometteuses découle du développement et de l'implémentation d'un ensemble de modules dont certains font l'objet d'explicitation pour une plus grande compréhension.

1.4 Cycle de cognition

La radio cognitive interagit avec son environnement au fil du temps pour déterminer les valeurs idéales des paramètres de communications. Afin de réaliser cette interaction continue dans le temps, la radio cognitive sera employée selon un cycle de cognition qui a été initialement décrit par des activités fondamentales pour empêcher l'interruption de la communication, ou pour améliorer la qualité de la transmission (voir la figure 1.2). Les différentes étapes du cycle cognitif [11] sont les suivantes :

- **Observation** : La RC surveille les bandes spectrales qui sont à sa portée pour détecter les trous spectraux, qui sont des bandes de fréquences non utilisées par les utilisateurs licenciés.
- **Orientation** : Les trous spectraux sont analysés pour déterminer ceux qui offrent le meilleur service et réagir immédiatement, si nécessaire.
- **Planification** : La radio cognitive doit identifier les actions alternatives à prendre, elle commence par identifier l'emplacement des différents émetteurs puis sélectionner les

paramètres d'opération appropriés telles que la fréquence et la puissance permise à cette position.

- **Décision** : Décider entre les actions candidates, en choisissant la meilleure d'entre elles. La RC commence par déterminer le débit nécessaire pour le transfert des données, le mode de transmission adéquat et la bande passante de transmission. Ensuite, la bande de spectre appropriée est choisie à partir des caractéristiques du spectre et des besoins de l'utilisateur.
- **Action** : Agir sur l'environnement en effectuant, par exemple, des modifications au niveau de la fréquence radio.
- **Apprentissage automatique** : Enfin, c'est l'activité d'apprentissage qui s'appuie sur l'observation et le résultat des décisions pour améliorer le fonctionnement de la radio. Ces collectes de connaissances seront exploitées dans les futures activités d'orientation pour produire une décision plus efficace.

Dans [7] et selon Haykin, toutes ces capacités fonctionnelles peuvent être résumées en deux principales caractéristiques que doit avoir une radio cognitive :

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

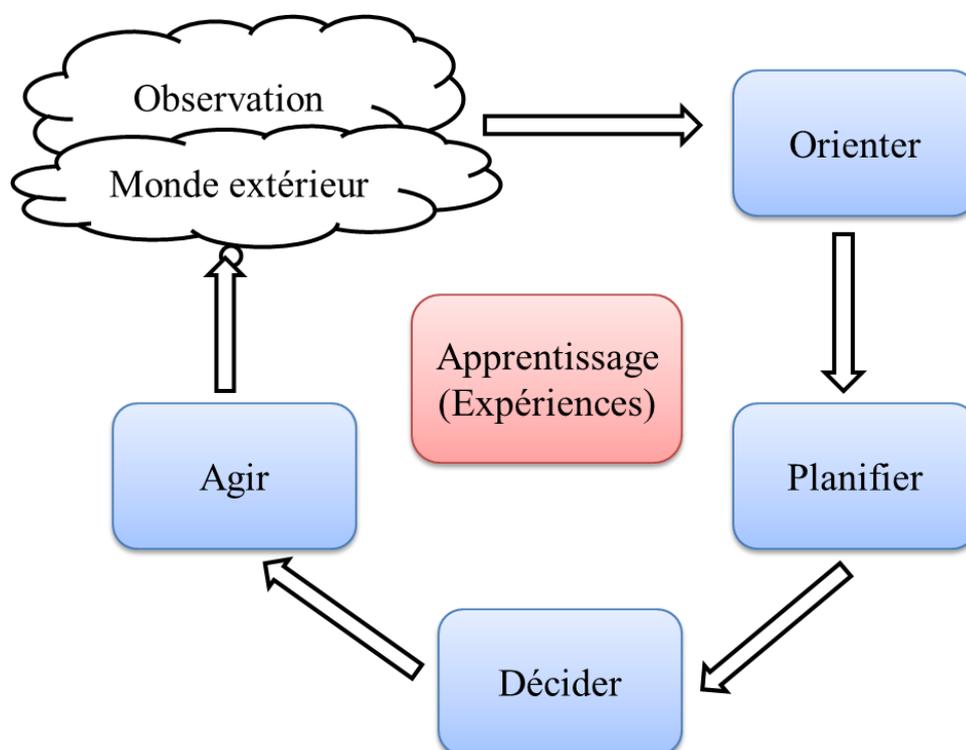


Figure 1.2 Cycle de cognition.

1.5 Architecture des réseaux de radio cognitive

Une description complète de l'architecture d'un RRC est essentielle pour le développement de protocoles de communication qui répondent aux défis du spectre dynamiques. L'architecture du RRC est présentée dans la figure 1.3.

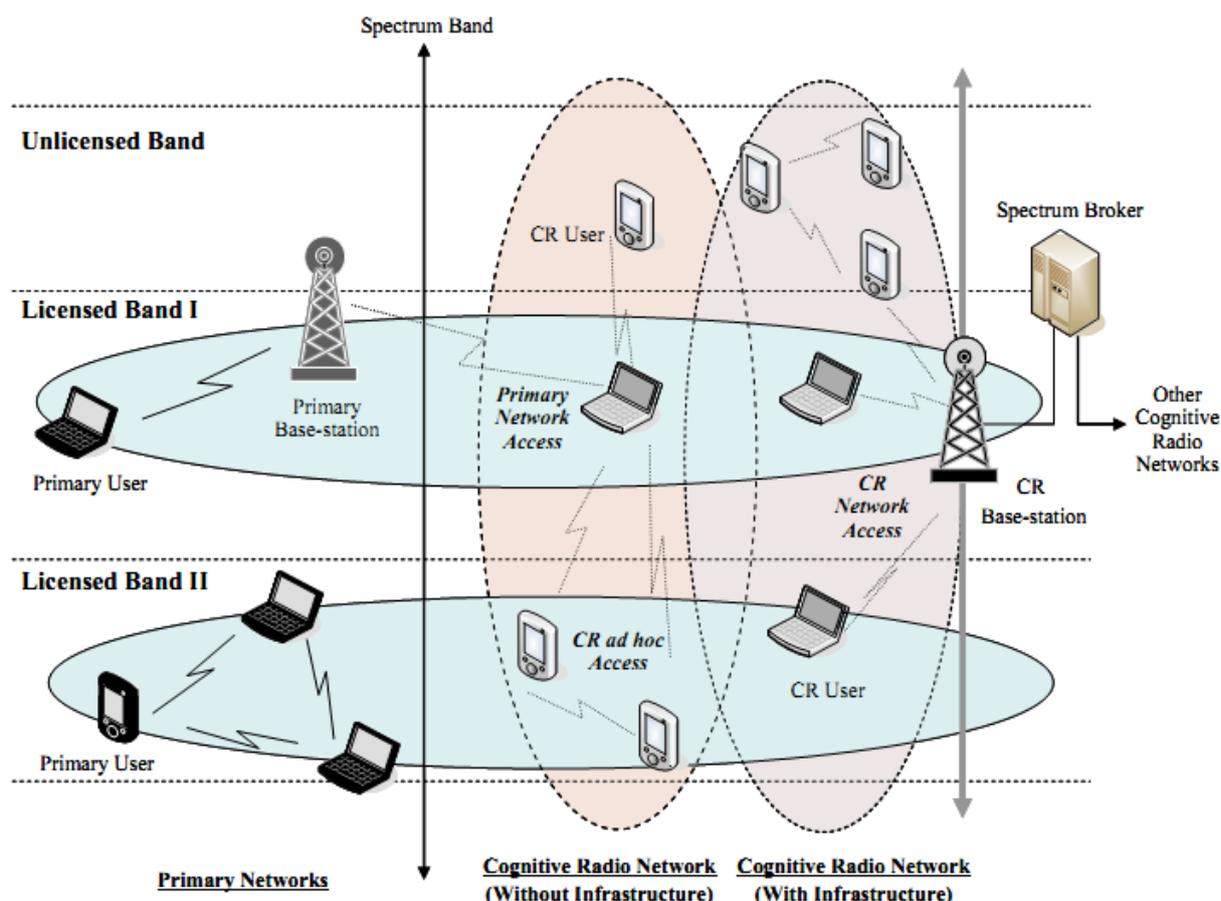


Figure 1.3 L'architecture du réseau de radio cognitive [6].

1.5.1 Composants du réseau

Les composants de l'architecture d'un RRC peuvent être décomposés en deux groupes de base [6]: un réseau primaire et un réseau secondaire.

a) Réseau primaire

Il dispose d'une licence qui lui permet d'accéder à certaines bandes spectrales. Cette licence est fournie par des organismes gouvernementaux telle la FCC aux Etats-Unis et le CRTC (Canadian Radio television and Telecommunications Commission) au Canada. Parmi les réseaux primaires existants on peut citer les réseaux cellulaires et les réseaux de diffusion TV qui sont un bon exemple de réseaux primaires dans lesquels les bandes spectrales sont propriétaires. Dans le réseau primaire, on peut également trouver des stations de base (BS)

primaires si le réseau est avec infrastructure. Ces BS primaires assurent le contrôle des activités des utilisateurs secondaires et primaires.

b) Réseau secondaire

C'est un réseau qui n'a pas de licence pour opérer sur la bande spectrale. Les réseaux secondaires sont déployés en mode infrastructure ou en mode ad-hoc, comme le montre la figure 1.3. Le réseau de radio cognitive avec infrastructures possède une entité de réseau centrale, comme un point d'accès dans les réseaux locaux sans fil (LAN) ou une station de base dans les réseaux cellulaires. Par contre, dans les réseaux de radio cognitive ad hoc, aucune entité centrale n'est présente. Un réseau de radio cognitive peut contenir aussi un courtier spectral « broker » qui se charge de distribuer les ressources spectrales entre les différents réseaux secondaires.

Ainsi, nous pouvons distinguer deux principaux types d'acteurs dans un RRC : des utilisateurs secondaires et des utilisateurs primaires.

- **Utilisateur Primaire (PU)** : c'est l'utilisateur qui détient une licence d'exploitation pour opérer dans une bande de fréquences bien spécifique. Il est donc prioritaire pour l'utilisation de cette bande de spectre.
- **Utilisateur Secondaire (SU)** : c'est l'utilisateur radio cognitive qui ne possède pas de licence pour accéder aux ressources spectrales et souhaite utiliser les parties libres du spectre.

c) Principe

La figure 1.4 met en évidence l'état d'occupation du spectre à un instant donné justifiant ainsi la présence de portions de bande de fréquences (trous) accessibles aux utilisateurs secondaires. Cependant, le principe se résume en une utilisation dynamique du spectre libre par les SU qui peuvent occuper ces trous de spectre durant l'absence des PU tout en traitant efficacement les interférences et les libérer³ dès lors qu'un PU manifeste un besoin de communication. Les SU peuvent également continuer à utiliser ce canal sous réserve d'obtention de l'accord du PU.

³ Se déplacer vers un autre canal ou atténuer ses paramètres de communication

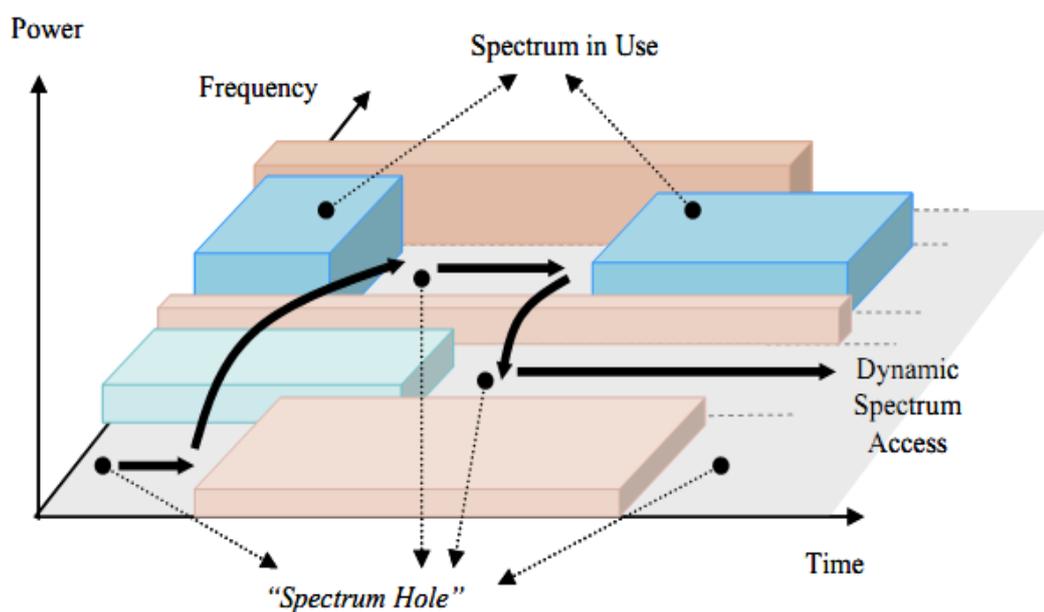


Figure 1.4 L'accès dynamique au spectre [15].

1.5.2 Hétérogénéité du spectre

Les SU sont capables d'accéder à la fois aux bandes licenciées du spectre utilisés par les PU et les bandes non licenciées du spectre via la technologie d'accès à large bande. Cependant, deux types d'opérations sont distingués pour le RRC [12] :

- *L'exploitation des bandes licenciées*: La bande licenciée est principalement utilisée par le réseau primaire. Dans ce cas, les RRC sont principalement concentrés sur la détection des PU. La capacité du canal dépend de l'interférence aux PU voisins. En outre, si les PU apparaissent dans la bande de fréquences occupée par les SU, ces derniers doivent quitter cette bande de spectre et passer à une autre bande disponible immédiatement.
- *L'exploitation des bandes non licenciées*: En l'absence des PU, les SU ont le même droit pour accéder au spectre. Par conséquent, les SU ont besoin de méthodes de partage du spectre sophistiquées afin de concourir pour la bande non licenciée.

1.5.3 Hétérogénéité du réseau

Comme il est montré dans la figure 1.3, les utilisateurs secondaires ont la possibilité d'effectuer trois types différents d'accès au spectre [12]:

- *L'accès au réseau de radio cognitive*: Les SU peuvent accéder à leur propre station de base, sur la bande de fréquences licenciée et non licenciée. Parce que toutes les interactions se produisent à l'intérieur du RRC, leur politique de partage du spectre peut être indépendante de celle du réseau primaire.
- *L'accès ad hoc au réseau de radio cognitive*: les SU peuvent communiquer avec d'autres SU à travers une connexion ad hoc sur la bande licenciée et non licenciée.

- *L'accès au réseau primaire:* Les SU peuvent également accéder à la station de base primaire à travers la bande licenciée. Contrairement à d'autres types d'accès, les SU nécessitent un protocole de contrôle d'accès au support (MAC) adaptatif, qui permet le roaming sur plusieurs réseaux primaires avec différentes technologies d'accès.

Selon l'architecture de RRC représentée dans la figure 1.3, différentes fonctions sont nécessaires pour le fonctionnement de la radio cognitive. Un aperçu sur ces fonctions et leur niveau d'implémentation au modèle OSI sont fournis dans la prochaine section.

1.6 Fonctions de la RC pour la gestion du spectre

Les principales fonctions de la radio cognitive pour la gestion de spectre sont présentées dans la figure 1.5. La détection de spectre fournie aux SU une liste des bandes inutilisées dans le spectre pour qu'ils puissent choisir le canal le plus approprié à ses besoins. Une fois la décision est prise, les SU accèdent au spectre pour partager les canaux appropriés et commencer leurs communications. Si le PU revient pour utiliser ces canaux, les SU doivent libérer ces parties de spectre en effectuant un handover spectral pour un nouveau partage après avoir une nouvelle détection du spectre. Une description plus en détail du rôle de ces fonctions, simplifiera leur compréhension [13].

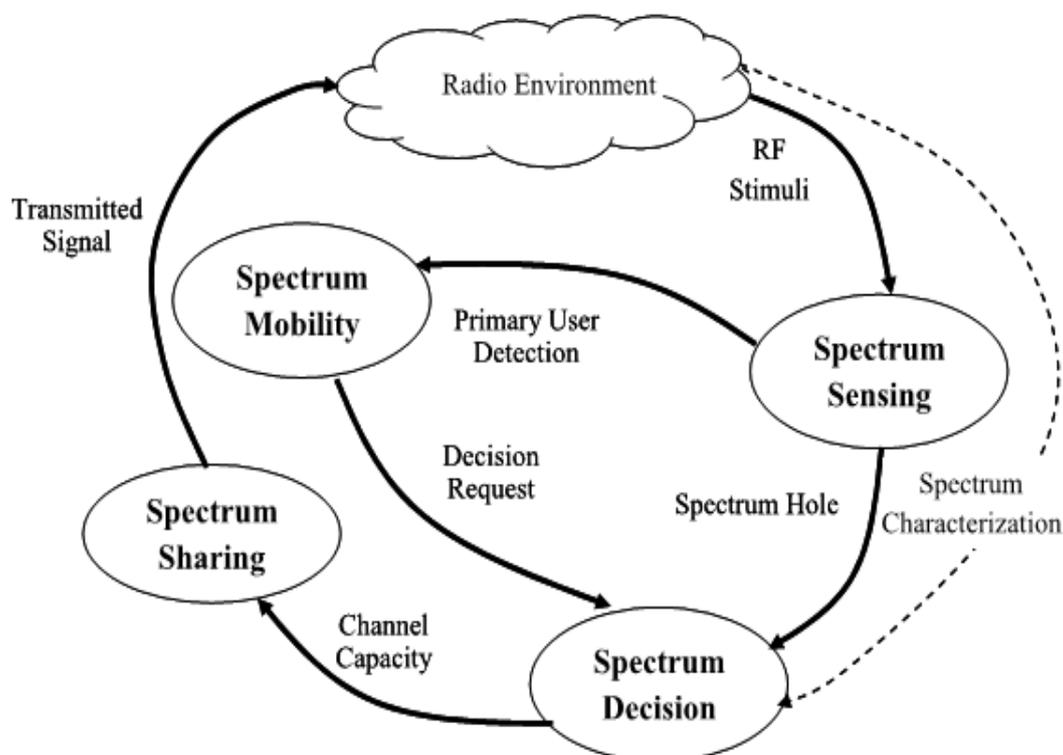


Figure 1.5 Les fonctions de la gestion spectrale [15].

1.6.1 Description des fonctions

Dans cette section, nous allons détailler le rôle des fonctions de la RC pour la gestion de spectre en décrivant leurs fonctionnalités de base et en révélant leurs défis [7] [14] [15].

1.6.1.1 Détection de spectre

a) Fonctionnalité de base

Le SU est conçu pour être conscient et sensible aux changements dans son environnement, ce qui rend la détection de spectre une condition importante pour la réalisation de RRC. Un SU peut allouer seulement une partie inutilisée du spectre donc il devrait surveiller les bandes de fréquences disponibles, capturer leurs informations, puis détecter les trous de spectre sans causer des interférences avec le réseau primaire. Ceci peut être réalisé par une capacité de détection en temps réel pour détecter les faibles signaux primaires dans une plage large de spectre. Comme le montre la figure 1.6, le RRC nécessite les fonctionnalités suivantes pour la détection de spectre :

- *La détection d'émetteur primaire* : Elle est basée sur la détection d'un signal faible d'un émetteur primaire à travers les observations locales de SU. Trois régimes sont généralement utilisés pour la détection de l'émetteur: la détection de filtre adapté, la détection de l'énergie, et la détection de caractéristique.
- *La détection coopérative* : Elle est le moyen le plus efficace pour détecter les trous de spectre est de détecter les PU qui reçoivent des données au sein de la gamme de communication d'un SU.
- *La gestion de la température d'interférence* : Dans cette méthode le PU est détecté à la base des interférences RF. Récemment, un nouveau modèle pour mesurer les interférences est désigné par la température de l'interférence, a été introduit par la FCC. Ce modèle limite les interférences au niveau du récepteur grâce à une limite de température d'interférence, qui est la quantité de la nouvelle interférence du récepteur pourrait tolérer.

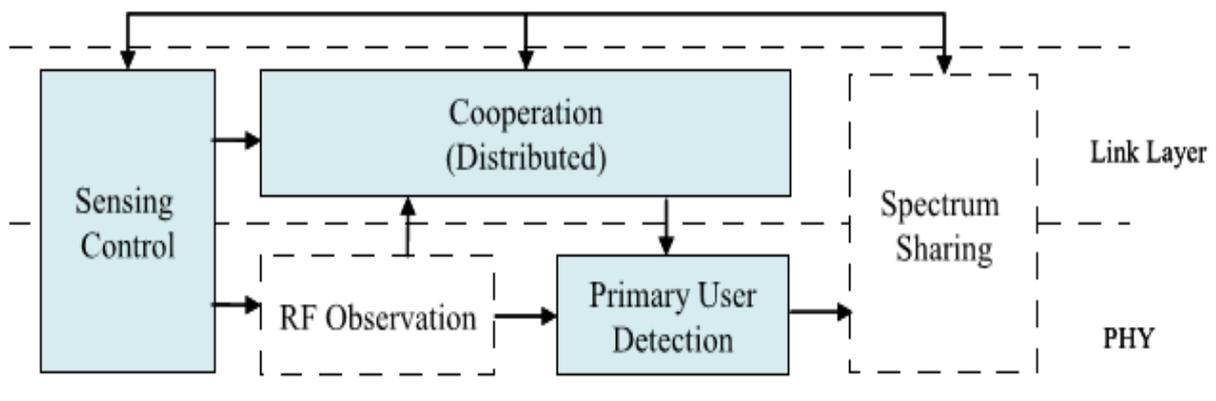


Figure 1.6 Structure de la détection de spectre dans un RRC [14].

b) Défis de recherche

Les principaux défis de la détection de spectre sont :

- *La mesure de la température d'interférence* : En raison de l'absence d'interactions entre les RRC et les réseaux primaires, généralement un SU ne peut pas connaître la localisation précise des récepteurs primaires. Ainsi, de nouvelles techniques sont nécessaires pour mesurer ou estimer la température de l'interférence aux PU voisins.
- *La détection de spectre dans un réseau multi-utilisateurs* : il est difficile de détecter les trous de spectre et d'estimer les interférences dans un environnement multi-utilisateur, consistant de multiples utilisateurs secondaires et primaires. Ainsi, les fonctions de détection de spectre devraient être développées en tenant compte de l'environnement multi-utilisateur.
- *L'efficacité de spectre*: La détection ne peut pas être effectuée pendant la transmission de paquets. Cependant, les SU devraient cesser d'émettre lors du processus de la détection, ce qui diminue l'efficacité du spectre. Pour cette raison, l'équilibre entre l'efficacité du spectre et la précision de détection est un problème important. En outre, puisque le temps de détection affecte directement la qualité de transmission, des nouveaux algorithmes de détection de spectre doivent être développés de telle sorte que le temps de détection est minimisé pour une précision de détection donnée.

1.6.1.2 Décision du spectre

a) Fonctionnalité de base

La décision du spectre est une phase primordiale dans le RRC pour choisir le canal le plus approprié au besoin de l'utilisateur parmi la liste des informations extraites lors de la phase de détection de spectre inutilisé. La décision est motivée par les caractéristiques du canal et le comportement des utilisateurs licenciés. Plusieurs critères peuvent être considérés pour la prise de décision comme la QoS demandée par l'application, le besoin de l'utilisateur en bande passante, etc. La décision du spectre doit être en temps réel au rythme des informations récoltées vu que l'environnement radio cognitive évolue rapidement au fil du temps et il subit des changements fréquents. L'ensemble des décisions prises dans cette phase seront mémorisés pour les exploiter dans les futures activités d'orientation pour produire une décision plus efficace en faisant appel à des méthodes de l'IA, pour augmenter la rapidité et réduire la complexité afin d'apporter des réponses en temps réel. La figure 1.7 représente les principales fonctionnalités nécessaires à la décision de spectre, qui sont les suivantes :

- *Caractérisation du spectre*: elle est basée sur l'observation, les utilisateurs RC déterminent non seulement les caractéristiques de chaque spectre disponible, mais aussi son modèle d'activité de PU.
- *Sélection du spectre*: L'utilisateur RC trouve la meilleure bande de fréquences pour satisfaire les exigences de qualité de service de l'utilisateur.

- *Reconfiguration*: Les utilisateurs RC reconfigurent le protocole de communication ainsi que le matériel de communication selon les exigences de l'environnement de la radio et de qualité de service de l'utilisateur.

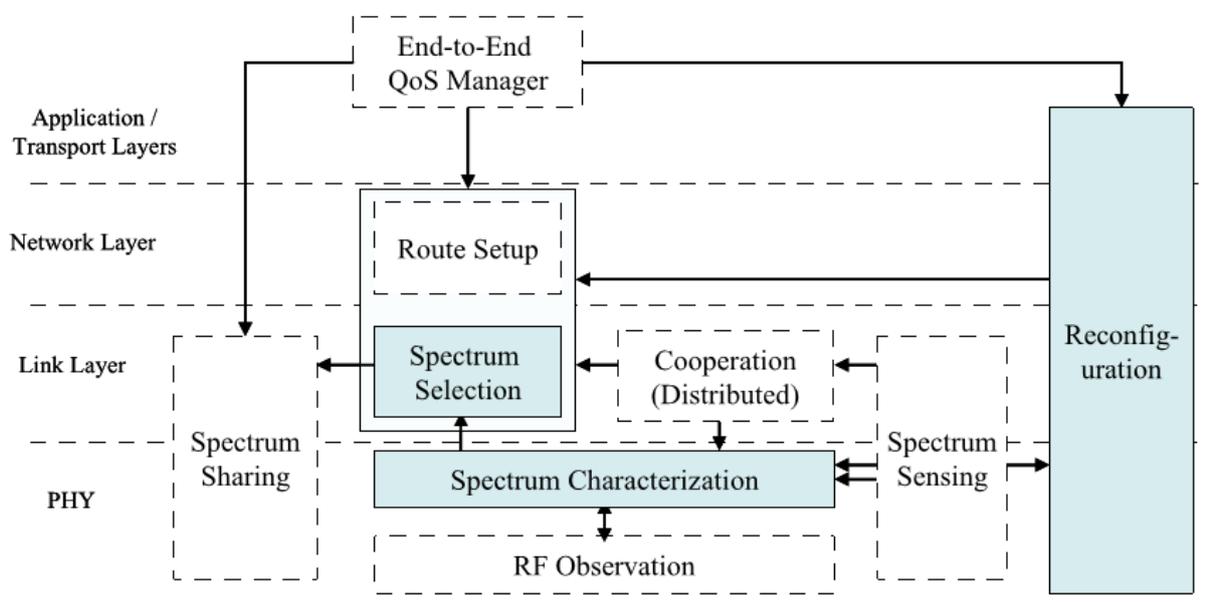


Figure 1.7 Structure de la décision de spectre dans un RRC [14].

b) Caractéristiques de canal pour la prise de décision

La décision de spectre dans les RRC est étroitement liée aux caractéristiques de canal qui varient au fil du temps. Chaque trou du spectre devrait être caractérisé en considérant l'environnement radio variant dans le temps et les paramètres de spectre, comme la fréquence de fonctionnement et de bande passante. Donc, il est essentiel de définir les paramètres qui peuvent représenter une bande de spectre particulière comme suit:

- *L'interférence* : Certaines bandes de fréquences sont plus encombrées par rapport à d'autres. Par conséquent, la bande de fréquences utilisée détermine les caractéristiques d'interférence du canal. A partir de la quantité de l'interférence au niveau du récepteur primaire, la puissance admissible de SU peut être dérivée, qui est utilisé pour l'estimation de la capacité du canal.
- *Perte de Chemin*: La perte de chemin augmente avec l'augmentation de la fréquence de fonctionnement. Par conséquent, si la puissance d'émission d'un SU reste la même, alors sa plage de transmission diminue à des fréquences plus élevées. De même, si la puissance d'émission est augmentée pour compenser la perte de chemin, alors il en résulte une interférence plus élevée pour les autres utilisateurs.
- *L'erreur de liaison sans fil*: Selon le schéma de modulation et le niveau d'interférence de la bande de spectre, le taux d'erreur des canaux change.
- *Le délai de la couche de liaison* : Pour remédier à la perte de lien, l'erreur de liaison sans fil et les interférences, des différents types de protocoles de couche de liaison sont

requis à des différentes bandes de fréquences. Cela produit des différents délais de la couche de liaison.

- *Le temps d'exploitation* : Les activités des PU peuvent affecter la qualité de canal dans les RRC. Le temps d'exploitation se réfère à la durée attendue qu'un SU puisse occuper une bande licencié avant de se faire interrompre. Il est évident que plus le temps d'exploitation soit grand, la qualité serait meilleure. La mobilité fréquente du spectre peut diminuer le temps d'exploitation, donc les précédents modèles statistiques de handover doivent être considérés lors de la conception des RRC avec un grand temps d'exploitation attendu.

Il est souhaitable d'identifier les bandes de fréquences qui combinent tous les paramètres de caractérisation décrites précédemment pour une décision du spectre précise. Cependant, une analyse complète et la modélisation du spectre dans les RRC n'a pas encore été développée.

c) Défis de recherche

Les principaux défis de la décision de spectre sont :

- *Modélisation de l'activité de PU* : Plusieurs recherches actuelles sur la détection du spectre sont basées sur le simple modèle « ON-OFF » pour les activités PU, qui ne peut pas capturer les diverses caractéristiques de tous les réseaux primaires existants. Ce modèle inexact pour les réseaux primaires conduit à une influence négative sur la détection du spectre résultant soit un faible accès opportunistes au spectre ou des interférences élevées aux réseaux primaires. Certains modèles empiriques sur les activités de PU ne sont pas réalisables dans des situations de calcul pratiques. Ainsi, le défi est de développer des modèles d'activité de PU plus pratiques en tenant compte des caractéristiques des technologies d'accès, ainsi que les types de trafic.
- *Décision de spectre et le cadre de reconfiguration* : Une fois que les bandes de fréquences disponibles se caractérisent, la bande le spectre la plus appropriée devrait être choisie en tenant compte les exigences de QoS et les caractéristiques de spectre. Toutefois, en fonction des paramètres de transmission reconfigurables tels que le type de modulation, le système de contrôle d'erreur et le protocole de communication, ces caractéristiques spectrales changent de façon significative. Parfois, avec la reconfiguration seulement, les utilisateurs RC peuvent maintenir la qualité de la session en cours. Par conséquent, il existe un besoin pour joindre la décision de spectre et le cadre reconfiguration pour trouver la combinaison optimale de la bande de fréquences et le paramètre de la configuration en fonction des applications avec les différentes exigences de QoS.

1.6.1.3 Partage du spectre

a) Fonctionnalité de base

La nature de partage du canal sans fil nécessite la coordination des tentatives de transmission entre les SU. À cet égard, le partage du spectre fournit la capacité de maintenir la qualité de service aux SU sans causer des interférences aux PU en coordonnant l'accès multiple des SU ainsi que l'allocation des ressources de communication adaptative aux changements de l'environnement radio. La figure 1.8 représente les blocs fonctionnels pour le partage du spectre dans les RRC. Contrairement à la décision du spectre, le partage du spectre se concentre principalement sur la gestion des ressources dans le même spectre avec les fonctionnalités suivantes:

- *Allocation des ressources:* En se basant sur les résultats de contrôle de la qualité de service, les SU sélectionnent les canaux appropriés (l'allocation de canal) et ajustent leur puissance d'émission (contrôle de puissance) pour atteindre les exigences de qualité de service ainsi que l'équité des ressources. En particulier dans le contrôle de puissance, les résultats de détection doivent être considérés afin de ne pas violer les contraintes d'interférence.
- *Accès au spectre:* Il permet à plusieurs SU de partager les ressources du spectre en déterminant qui va accéder au canal ou quand un utilisateur peut accéder au canal.

Une fois une bande de fréquence appropriée est sélectionnée dans la décision du spectre, des canaux de communication dans ce spectre doivent être attribués à un SU lors de la détermination de sa puissance d'émission afin d'éviter l'interférence sur le réseau primaire (l'allocation des ressources). Ensuite, le SU décide quand le spectre devrait être accessible pour éviter les collisions avec d'autres utilisateurs (l'accès au spectre).

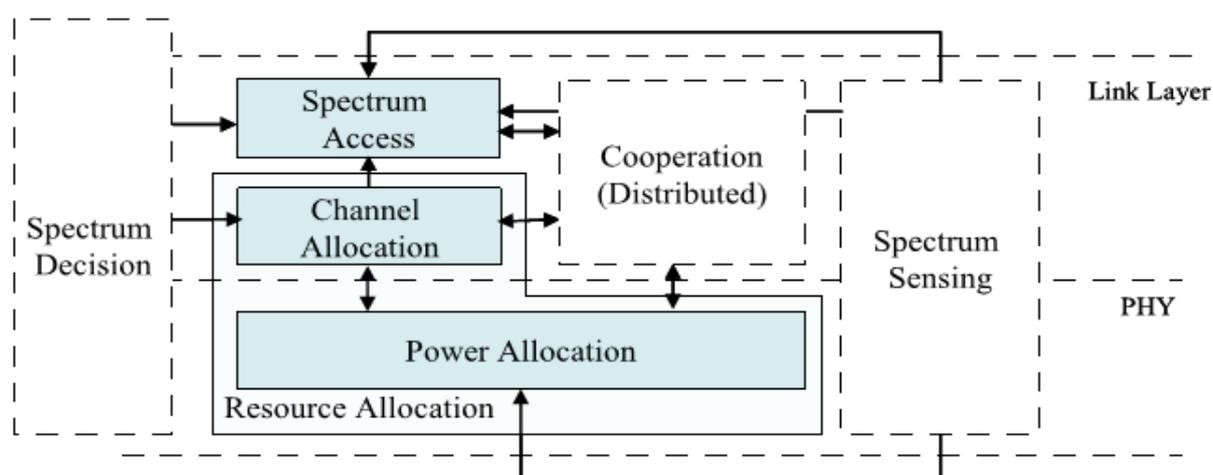


Figure 1.8 Structure de partage de spectre dans un RRC [14].

b) Défis de recherche

Il existe plusieurs travaux de recherche sur la réalisation d'un partage efficace et transparent de spectre dans le RRC :

- *Le canal de contrôle commun* : Le canal de contrôle commun (CCC) facilite de nombreuses fonctionnalités de partage du spectre. Cependant, puisqu'un canal doit être libéré lorsque l'utilisateur choisit un canal primaire, la mise en œuvre d'un CCC fixe est infaisable. Par ailleurs, dans les RRC un canal commun à tous les utilisateurs dépend fortement de la topologie et les changements au fil du temps. En conséquence, soit les techniques d'atténuation de CCC doivent être conçues ou bien les CCC locales doivent être exploitées pour les clusters de nœuds.
- *La portée radio dynamique* : Due à l'interdépendance entre la portée de la radio et de la fréquence de fonctionnement, les voisins d'un nœud peuvent changer selon les variations de fréquence de fonctionnement. Jusqu'ici, il n'y a pas de travail qui aborde cet important défi dans les RRC.
- *L'unité de spectre* : Presque toutes les techniques de décision et de partage de spectre considèrent le canal comme l'unité de base de spectre. Par conséquent, la définition d'un canal en tant qu'unité de spectre est cruciale dans le développement d'algorithmes.
- *L'information sur la localisation* : Une hypothèse importante dans les travaux existants est que les utilisateurs secondaires connaissent la localisation et la puissance de transmission des PU de sorte que les calculs d'interférence peuvent être effectués facilement. Cependant, une telle hypothèse ne peut pas toujours être valide dans les RRC.

1.6.1.4 Mobilité du spectre

a) Fonctionnalité de base

Dans les RRC, la mobilité de spectre se produit lors la détection d'un utilisateur primaire dans une partie spécifique du spectre. Dans ce cas, les SU doivent libérer immédiatement la bande de fréquence et poursuivre leurs communications dans une autre bande libre du spectre. Cependant, une commutation de la transmission courante à une nouvelle route ou une nouvelle bande de fréquences est nécessaire avec un minimum dégradation de la qualité. Cela nécessite la collaboration avec la détection du spectre, la découverte des voisins dans la couche de liaison, et les protocoles de routage. Une condition importante des protocoles de gestion de mobilité est l'information sur la durée de processus de mobilité spectrale. Cette information peut être fournie par l'algorithme de détection.

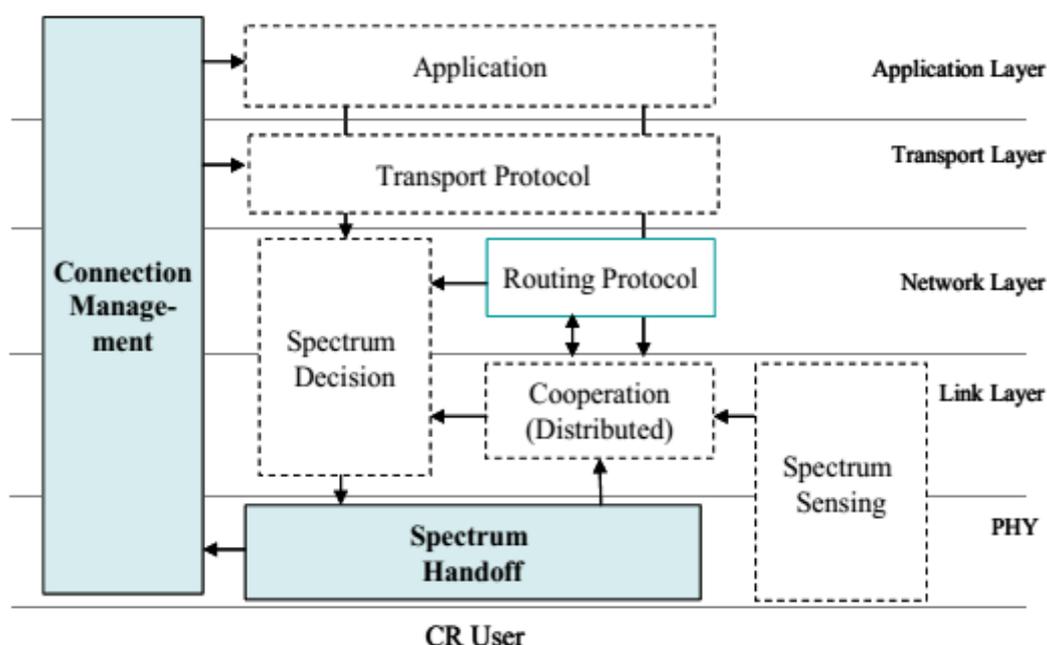


Figure 1.9 Structure de la mobilité dans un RRC [14].

Dans ce qui suit, les principales fonctions nécessaires pour la mobilité du spectre dans le RRC ad hoc seront décrites (voir figure 1.9) :

- *Handover* : Le SU commute la bande de spectre physiquement et reconfigure les paramètres de communication (par exemple la fréquence de fonctionnement, le type de modulation).
- *Gestion de connexion*: Le SU maintient la QoS ou minimise la dégradation de la qualité lors de la commutation de spectre en interagissant avec les protocoles nécessaires.

b) Défis de recherches

Les problèmes de recherche de la mobilité du spectre dans les RRC sont les suivants:

- *La mobilité du spectre dans le domaine temporel*: Les RRC s'adaptent au spectre sans fil en fonction des bandes disponibles. Vu que ces canaux disponibles changent avec le temps, la qualité de service ne peut pas être garantie dans cet environnement.
- *La mobilité du spectre dans l'espace*: Les bandes disponibles changent aussi quand un utilisateur se déplace d'un endroit à un autre. Par conséquent, l'allocation continue du spectre est un défi majeur.

Plusieurs recherches ont considéré que la fonction de partage de spectre est le cœur de la gestion de spectre. Dans la section suivante, nous allons mettre en évidence les différentes classifications existantes pour le partage de spectre pour mieux comprendre notre approche proposée.

1.6.2 Niveau d'implémentation des fonctions au modèle OSI

Le modèle OSI (Open Systems Interconnection) comprend théoriquement sept couches empilées ayant chacune un rôle précis. La radio cognitive introduit de nouveaux concepts (détection, mobilité spectrale) qui se rattachent aux différents niveaux des couches protocolaires du modèle OSI comme il est illustré dans la figure 1.10. Cependant, pour les besoins de détection de bandes libres, le module de détection (Spectrum Sensing) est implémenté au niveau de la couche Physique du modèle de référence. La fonction de la mobilité de spectre (Spectrum handoff), pour être efficace, s'étend sur les couches allant du niveau Physique à la couche Transport. Le module de synchronisation des accès au canal appelé module de partage du spectre (Spectrum sharing) est associé aux couches Liaison et Physique et enfin le module de prise de Décision (Spectrum decision) couvre les couches Liaison et Réseau. Par conséquent, les différents modules de la figure 1.10 sont donc ajoutés à divers niveaux selon le besoin à satisfaire (détection, partage, mobilité). Le besoin de communication une fois exprimé par les applications, déclenche l'activité des différents modules de la radio cognitive et cette activité se concentre autour du module de prise de décision. Ainsi, le module de prise de décision qui est mis à contribution à partir de la couche Réseau et qui reçoit les informations d'initiation de la communication du niveau supérieur (couches Application et Transport), s'appuie sur le module de détection (couche Physique) afin de proposer le canal appropriée pour la transmission. La notification des changements de bande de fréquence lorsque les caractéristiques de la bande occupée l'exigent est également mise en exergue avec les liaisons établies principalement entre les modules de détection, mobilité et prise de décision. Par ailleurs, dans cette configuration, il est important de noter par exemple que les besoins des applications sont évalués au niveau applicatif afin de prendre en compte les aspects qualité de service de bout-en-bout qui incombent à la couche transport. De plus, on note une possibilité de contrôle inter-couche de l'efficacité énergétique au niveau de l'ensemble de la pile protocolaire [11].

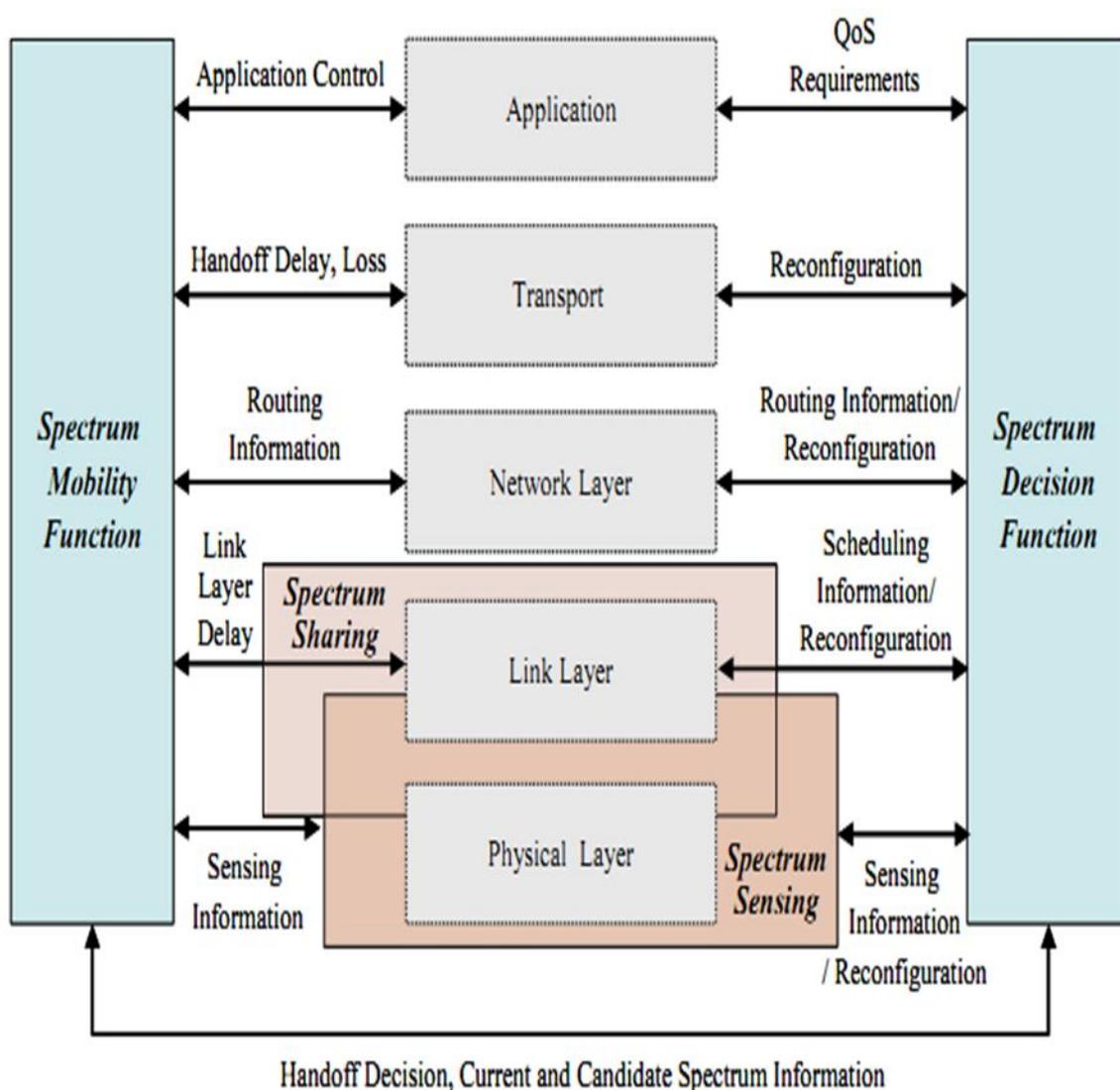


Figure 1.10 Modules RC et leur adjonction aux couches du modèle OSI [6].

1.7 Domaines d'application de la radio cognitive

Le concept de la radio cognitive peut être appliqué à une variété de scénarios de communication sans fil, nous allons décrire quelques-uns [16]:

1.7.1 Réseaux sans fil de prochaine génération

La radio cognitive devrait être une technologie clé pour la prochaine génération de réseaux sans fil hétérogènes. La radio cognitive fournira des renseignements intelligents à la fois pour l'utilisateur et pour le fournisseur d'équipements. Pour l'utilisateur, un dispositif mobile avec des interfaces d'air multiples (WiFi, WiMAX, cellulaires) peut observer l'état des réseaux d'accès sans fil (la qualité de transmission, débit, délai) et prendre une décision sur la

sélection de l'accès au réseau pour communiquer avec. Pour le fournisseur, les ressources radio de plusieurs réseaux peuvent être optimisées pour l'ensemble des utilisateurs de mobiles et de leurs exigences de QoS.

1.7.2 Coexistence de différentes technologies sans fil

Les nouvelles technologies sans fil (IEEE 802.22) sont en cours d'élaboration pour la réutilisation des fréquences radio allouées à d'autres services sans fil (service TV). La radio cognitive est une solution qui fournit la coexistence de ces différentes technologies et services sans fil. Par exemple, IEEE 802.22, basée sur les utilisateurs WRAN peut utiliser efficacement la bande TV quand il n'y a pas d'utilisation du téléviseur à proximité ou quand une station de télévision ne diffuse pas.

1.7.3 Réseaux d'urgence

Les réseaux d'urgence donnent à un usager en difficulté, une population ou aux services de secours la possibilité d'établir des communications. La mise en place de ces réseaux pourrait résulter du déclenchement d'une catastrophe naturelle qui conduirait à un dysfonctionnement total ou partiel des réseaux traditionnels. Elle pourrait être aussi motivée par la volonté d'extension des postes d'appel d'urgence créés autour de l'environnement ou des axes routiers. Dans les deux cas de figure, la RC pourrait jouer un rôle essentiel. Grâce au caractère flexible de ses modules, un équipement RC sera capable d'explorer une large gamme de technologie (bandes GSM, WiFi, TV), de détecter des bandes afin de réaliser ses communications. La capacité à parcourir différentes technologies augmente considérablement les possibilités de communication.

1.7.4 Réseaux pour les systèmes de santé

La sécurité dans les réseaux de capteurs médicaux, la protection des personnes face aux effets des ondes électromagnétiques constituent des problématiques additionnelles auxquelles la RC pourrait apporter des réponses. A défaut de la cryptographie qui semble coûteuse pour les réseaux de capteurs médicaux, les changements de bande de fréquence supportés par la RC pourraient aider à endiguer certaines formes d'attaques à l'image des écoutes du type « man in the middle ». D'autre part, même si les effets des ondes électromagnétiques sur la santé n'ont pas encore été clairement démontrés, il est tout de même judicieux d'adopter des mécanismes pouvant limiter les expositions à ces radiofréquences. L'impact des ondes radio sur la personne, pourrait ainsi être réduit grâce au module de prise de décision RC. En effet, avec la connaissance de son environnement, un équipement doté des capacités RC est à mesure d'adopter des stratégies telles que l'adaptation automatique de la puissance de transmission, le changement de canal ou encore l'arrêt temporaire de toute diffusion d'onde.

1.7.5 Réseaux militaires

L'armée américaine à travers l'importance des moyens consacrés à la recherche et au développement de cette technologie, atteste du potentiel de la RC, dont le déploiement s'accorderait avec leurs besoins de communications militaires innovantes. Ainsi, les RRC déployés dans les zones de combat pourront aider à l'évitement des écoutes, à déjouer les interceptions de communication et donc à limiter l'espionnage de guerre. En outre, lorsque certaines fréquences sont brouillées, le dispositif RC peut activer le sondage afin de trouver des bandes de fréquence d'accès de rechange. En somme, la RC dans le domaine militaire constitue probablement un moyen pour la détection d'éventuelles intrusions qui permet de lutter contre le piratage grâce à ses fonctions d'intelligence.

1.8 Conclusion

La radio cognitive n'est pas une seule pièce de l'appareil. C'est une technologie qui peut incorporer des éléments répartis dans un réseau. Elle offre de grandes promesses pour l'amélioration de l'efficacité du système, l'utilisation du spectre, des applications plus efficaces, la réduction des interférences, une amélioration du service et de réduire la complexité d'utilisation pour les utilisateurs.

Dans le chapitre suivant, nous allons parler sur la gestion de spectre dans les réseaux de radio cognitive en présentant les classifications de partage de spectre existantes et les différents techniques d'accès au spectre.

Chapitre 2 : Gestion de spectre dans les réseaux de radio cognitive

Sommaire

2.1 Introduction.....	Erreur ! Signet non défini.
2.2 Classifications du partage de spectre dans les RRC.....	Erreur ! Signet non défini.
2.2.1 Classification basée sur l'architecture	Erreur ! Signet non défini.
2.2.2 Classification basée sur le comportement d'allocation	Erreur ! Signet non défini.
2.2.3 Classification basée sur la technologie d'accès au spectre.....	Erreur ! Signet non défini.
2.2.4 Classification basée sur la portée du réseau.....	Erreur ! Signet non défini.
2.5 Les techniques d'accès au spectre	Erreur ! Signet non défini.
2.5.1 Théorie des jeux	Erreur ! Signet non défini.
2.5.2 Contrôle d'accès au canal (MAC)	Erreur ! Signet non défini.
2.5.3 Négociation locale et enchères	Erreur ! Signet non défini.
2.5.4 Réseaux de neurones	Erreur ! Signet non défini.
2.5.5 Modèle de Markov caché (HMM).....	Erreur ! Signet non défini.
2.5.6 Algorithmes génétiques	Erreur ! Signet non défini.
2.5.7 Systèmes multi-agents	Erreur ! Signet non défini.
2.6 Utilisation des SMA pour la gestion du spectre dans le contexte de la RC.....	Erreur ! Signet non défini.
2.6.1 Evolution de l'intelligence artificielle distribuée vers les SMA.....	Erreur ! Signet non défini.
2.6.2 Concept d'agent.....	Erreur ! Signet non défini.
2.6.3 Système multi-agent	Erreur ! Signet non défini.
2.6.4 Mode d'interaction entre les agents	Erreur ! Signet non défini.
2.6.5 Agent Vs radio cognitive.....	Erreur ! Signet non défini.
2.6.6 Application des SMA dans les RRC.....	Erreur ! Signet non défini.
2.7 Conclusion	Erreur ! Signet non défini.

2.1 Introduction

Les futures architectures de RRC devraient être scalables et assez coopératives, afin de fournir les meilleures solutions possibles pour s'adapter aux applications actuelles. Cependant, le terminal radio cognitif devra assurer une gestion efficace des ressources disponibles dans le spectre afin d'éviter les interférences et d'améliorer la QoS. Le but principal est d'augmenter l'utilisation du spectre par l'utilisation des systèmes d'accès plus efficaces. Différentes techniques sont proposées dans la littérature pour produire des solutions efficaces pour chacune des fonctions de gestion de spectre et plus précisément pour le partage de spectre (accès\allocatoin).

Nous allons commencer ce chapitre par une étude sur le partage de spectre et les différentes classifications proposées. Par la suite, un état de l'art sur les différentes techniques existantes pour le partage de spectre sera présenté. Enfin nous allons consacrer une section sur la technique des SMA en présentant le concept multi-agents, ses caractéristiques et les travaux existants dans la littérature pour la résolution des problématiques liées au partage de spectre dans le contexte d'un réseau de radio cognitive.

2.2 Classifications du partage de spectre dans les RRC

Le partage de spectre est l'une des principales fonctions de la gestion du spectre (voir la section 1.6). Les travaux existant sur le partage du spectre dans les RRC peuvent être principalement classés par quatre aspects comme il est montré dans la figure 2.1: l'architecture, le comportement d'allocation du spectre, l'accès au spectre, et la portée [12].

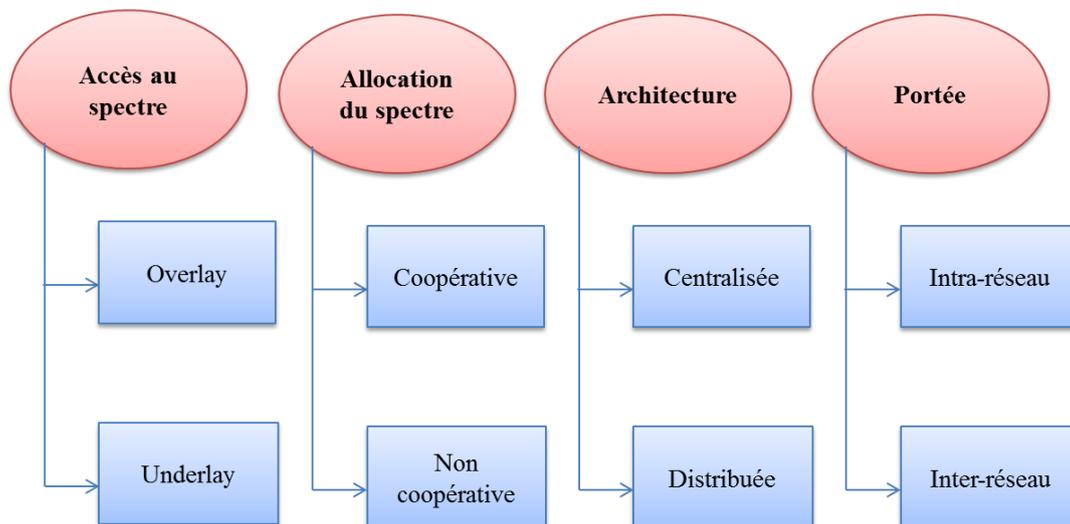


Figure 2.1 Classification de partage du spectre dans le RRC.

2.2.1 Classification basée sur l'architecture

L'architecture peut être centralisée ou distribuée [17] :

- *Partage de spectre centralisé* : Les procédures d'allocation et d'accès au spectre sont contrôlées par une entité centrale. En outre, l'entité centrale peut louer le spectre aux utilisateurs dans une région géographique limitée pour une période de temps spécifique.
- *Partage de spectre distribué* : L'allocation et l'accès au spectre sont basées sur les politiques locales (ou éventuellement globales) qui sont effectuées par chaque nœud de façon distributive. Les solutions distribuées sont également utilisés entre les différents réseaux tels qu'une BS qui participe avec son brouilleur selon les besoins de QoS de ses utilisateurs pour allouer une partie du spectre.

2.2.2 Classification basée sur le comportement d'allocation

Le partage de spectre peut être coopératif ou non coopératif. Lorsque plusieurs utilisateurs (à la fois primaires et secondaires) sont dans le système, leur préférence va influencer sur la décision du spectre [18]. Dans un environnement non-coopératif, chaque utilisateur a son propre objectif, tandis que dans un environnement coopératif, tous les utilisateurs peuvent collaborer pour atteindre un seul objectif. Par exemple, plusieurs utilisateurs secondaires peuvent entrer en compétition les uns avec les autres pour partager un spectre radio (par exemple, O1, O2, O3, O4 dans la figure 2.2) de sorte que leur débit individuel soit maximisé. Au cours de cette concurrence entre les utilisateurs secondaires, tous veillent à ce que l'interférence causée à l'utilisateur primaire est maintenue en dessous de la limite de température de brouillage correspondante. La théorie des jeux est l'outil le plus approprié pour obtenir la solution d'équilibre pour le problème du spectre dans un tel scénario.

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

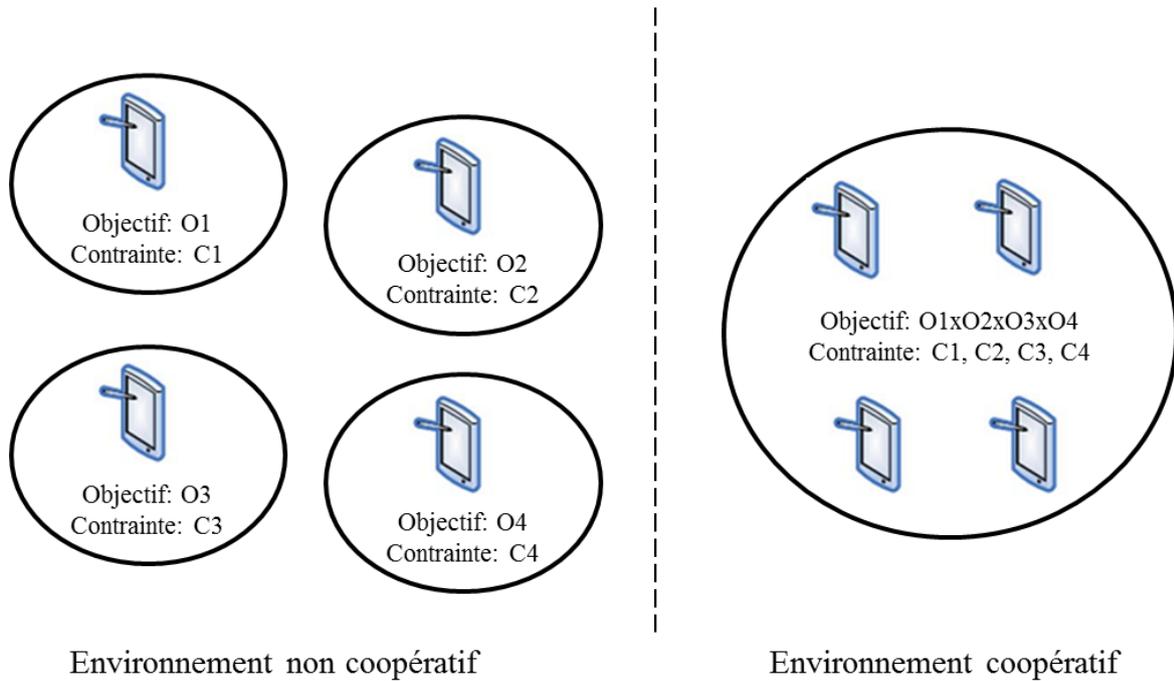


Figure 2.2 Partage de spectre coopératif et non-coopératif.

2.2.3 Classification basée sur la technologie d'accès au spectre

Différentes stratégies pour les environnements radio cognitive sont définies selon la technologie d'accès utilisée par les SU [19]. Les trois stratégies sont illustrées dans la figure 2.3.

- *Le partage de spectre « interweave »* : elle consiste à utiliser les espaces blancs du spectre qui ne sont pas utilisés par le système primaire pour établir des communications secondaires.
- *Le partage de spectre « Underlay »* : cette approche consiste à garantir toujours des transmissions secondaires en-dessous d'une valeur seuil de la température d'interférence tolérée par les récepteurs primaires⁴.
- *Le partage de spectre « Overlay »* : elle consiste à établir une coopération limitée entre les usagers secondaires et les usagers primaires afin d'améliorer la transmission primaire.

⁴ La température d'interférence est une mesure de bruit et de niveau de puissance d'interférence au niveau du récepteur.

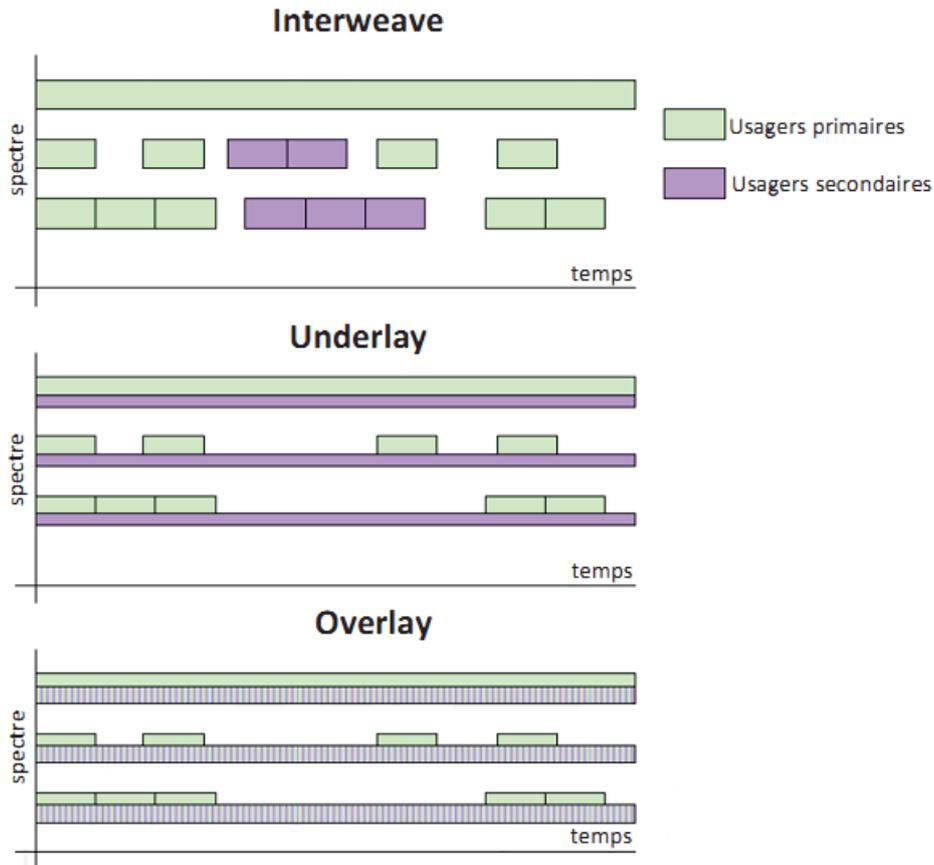


Figure 2.3 Partage du spectre pour les différentes technologies d'accès au spectre [6].

2.2.4 Classification basée sur la portée du réseau

Enfin, les techniques de partage du spectre sont généralement basées sur deux types de solutions [12]: le partage du spectre à l'intérieur de RRC « partage de spectre intra-réseau » et entre plusieurs RRC coexistant «partage de spectre inter-réseau » (voir la figure 2.4).

- *Partage de spectre intra-réseau* : Ces solutions se concentrent sur l'allocation du spectre entre les entités d'un RRC. Cependant, les SU essaient d'accéder au spectre disponible sans causer des interférences aux PU. Le partage du spectre Intra-réseau pose des problèmes qui ne sont pas considérés précédemment dans les systèmes de communication sans fil.
- *Partage de spectre inter-réseau* : Ces solutions se concentrent sur l'allocation du spectre entre plusieurs systèmes radio cognitive. Jusqu'à présent, les solutions de partage du spectre inter-réseau offrent une vue plus large du concept de partage du spectre en incluant certaines politiques de l'opérateur.

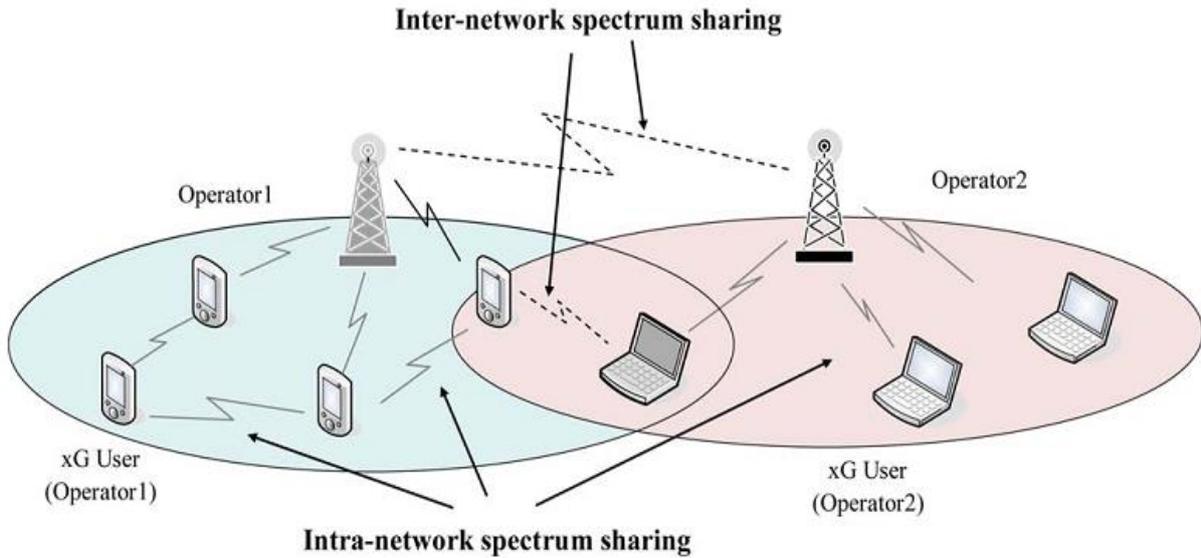


Figure 2.4 Partage de spectre intra-réseau et inter-réseau dans le RRC [12].

2.5 Les techniques d'accès au spectre

Il existe plusieurs techniques qui contribuent à la flexibilité dans les RRC. Ces techniques permettent en général de modéliser l'environnement radio en déterminant les variables et en élaborant les règles et les stratégies qui mènent à la gestion de spectre. Parmi ces techniques nous citons : la théorie des jeux, le contrôle d'accès au canal et les enchères. Nous citons aussi des techniques très connus de l'IA qui ont été utilisés pour améliorer les services de la radio cognitive tel que : les réseaux de neurones, le modèle de Markov caché, les algorithmes génétiques et les systèmes multi-agents

2.5.1 Théorie des jeux

La théorie des jeux est un outil idéal pour l'analyse des interactions dans un système intelligent où plusieurs entités sont porteuses de caractéristiques qui les affectent mutuellement [20]. Le cycle de la cognition étant une représentation d'un système intelligent, la théorie des jeux lui fournit des outils mathématiques pour améliorer et analyser les interactions des terminaux radio cognitive. Le concept de la théorie des jeux a été largement utilisé pour la gestion du spectre dans le contexte de la radio cognitive, où les PU et SU participant à un jeu et se comportent rationnellement à choisir les stratégies qui maximisent leurs gains individuels. Dans [21], les auteurs s'appuient sur la théorie des jeux pour résoudre le problème d'accès multiple au spectre dans les RRC. 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. Dans [22], le problème de partage dynamique du spectre est posé où plusieurs SU sont concurrents pour la demande d'accès au spectre. Cette situation non coopérative est formulée comme un jeu de marché avec une fonction de revenu dépendante des exigences et des besoins. Un scénario de partage du spectre dans les bandes non licenciées en utilisant la théorie des jeux est exposée dans [23]. Les auteurs illustrent le processus de

réalisation de l'équilibre de Nash⁵ en faisant varier les différents schémas de modulation et de puissance de transmission des utilisateurs non-coopératifs qui partagent le même spectre.

Dans les jeux non-coopératifs, chaque joueur se concentre sur la maximisation de son profit individuel sans tenir compte des autres, montrant des comportements égoïstes. En conséquence, afin de permettre aux joueurs de travailler en interdépendance, certains jeux coopératifs sont proposés dans la littérature [24] [25] envisageant l'utilisation de la théorie des jeux coopératifs pour réduire la puissance d'émission des SU afin d'éviter de générer des interférences aux transmissions des PU. Dans ce type de jeux, le PU loue son spectre au SU pour une période de temps précise et le SU essaye d'effectuer ses transmissions durant cette période.

2.5.2 Contrôle d'accès au canal (MAC)

L'accès au spectre peut être considéré comme un problème similaire au problème traditionnel de MAC où plusieurs utilisateurs tentent d'accéder en même temps au même canal. Différentes solutions basées sur MAC ont été développées récemment pour l'accès dynamique au spectre, où chaque utilisateur doit se coordonner son accès au spectre avec ses voisins pour éviter les interférences. A titre d'exemple, dans [26] [27] les protocoles centralisés ont été proposés pour coordonner l'accès au spectre où l'utilisation d'un protocole MAC distribué dans un RRC sans contrôle centralisé permet à chaque SU d'accéder individuellement au spectre. Un système inter-couche distribué pour l'allocation de spectre a été présenté dans [28]. Il fournit un cadre d'optimisation basé sur un processus de décision de Markov partiellement observable, sans aucun aperçu sur la conception, l'implémentation et la performance du protocole. Dans [29], le protocole CRNMAC (Cognitive Radio Network MAC) a été présenté, il optimise la puissance multicanal et l'attribution de débit en supposant un masque de puissance donnée sur les transmissions radio cognitive. La méthode de détermination d'un masque de puissance approprié demeure une question ouverte. Le protocole DDMAC (Distance-Dependent MAC) de partage de spectre dans [30] tente de maximiser le débit à travers un nouvel algorithme probabiliste d'attribution de canal qui exploite la dépendance entre le modèle d'atténuation de signal et la distance de transmission tout en considérant les conditions de trafic en vigueur et les interférences. ASMAC (Ad hoc Secondary system MAC) [31] est aussi un protocole de partage de spectre dans les RRC coexistant avec le réseau GSM. Les SU sélectionnent les canaux en fonction des échanges de contrôle de RRC et les informations de diffusion GSM. La coordination explicite avec les réseaux primaires est nécessaire. Dans [32], les auteurs ont développé un protocole MAC pour la gestion de spectre. Ce protocole permet l'accès opportuniste et le partage des espaces blancs disponibles dans le spectre TV en allouant de manière adaptative le spectre entre les utilisateurs en lice.

⁵ L'équilibre de Nash consiste en une combinaison de choix stratégiques où chaque acteur cherche à anticiper correctement les choix des autres en théorie des jeux

2.5.3 Négociation locale et enchères

La négociation locale est une technique où les utilisateurs arrivent à un accord mutuel sur la vente et l'achat de leurs biens, leurs ressources et leurs services, en formant de petits groupes de négociation. Les ventes aux enchères sont également basées sur le concept de la vente et l'achat des biens où tous les utilisateurs sont invités à présenter leurs offres au gestionnaire centralisé. Le gestionnaire alloue ensuite les ressources d'une manière qui maximise l'utilité de chaque utilisateur. L'utilisation de la négociation locale et les enchères pour l'allocation dynamique du spectre utilisant les enchères est devenue une approche prometteuse dans les RRC qui permet aux SU de louer des bandes inutilisées par les PU afin de maximiser l'utilisation du spectre. Dans [33], deux différentes stratégies de négociation sont présentées, y compris la négociation un-à-un, une stratégie pour l'échange de canal entre deux voisins et la négociation d'un acheteur-multi-vendeurs, une stratégie de négociation entre plusieurs acheteurs et vendeurs. Chaque SU veut améliorer son utilisation du spectre, pour cela il commence par la négociation un-à-un et si aucun canal n'est trouvé, le SU peut diffuser une demande à plusieurs SU, indiquant que son état actuel d'utilisation de canal est inférieur à un seuil. Les auteurs dans [34] présentent une solution où les SU ne négocient pas avec les PU, plutôt ils interagissent avec les points d'accès pour la location du spectre. Cela réduit la charge des PU tant qu'ils continuent d'ignorer la négociation. Une approche coopérative différente appelée DSAP (Dynamic Spectrum Access Protocol) est présentée dans [27]. Cette approche est basée sur le concept du serveur centralisé qui est le responsable de la location de spectre aux SU dans une petite région géographique. Le serveur maintient également une vue globale des conditions de canal du réseau à travers une série d'échanges des informations fréquents avec ses clients (les SU). Cependant, le serveur centralisé peut devenir un énorme goulot d'étranglement dans différentes conditions de réseau et ne peut pas optimiser la fonction d'utilité globale du réseau.

2.5.4 Réseaux de neurones

Le réseau de neurones artificiels (ANN) sont un ensemble de fonctions non linéaires avec des paramètres ajustables pour donner des sorties désirées [35]. Différents types de ANN sont séparés par leurs configurations réseau et les méthodes de formation, permettant une multitude d'applications. Toutefois, ils sont tous composés de neurones interconnectés pour former un réseau. Chaque neurone artificiel produit habituellement une seule valeur de sortie en accumulant les entrées d'autres neurones. Il existe différents types de ANN disponibles dans la littérature, les plus communs et applicables à la RC sont: perceptron multicouche linéaire, perceptron multicouche non-linéaire et réseaux à fonctions radiales de base. Plusieurs travaux ont adopté le ANN dans les RRC. Le ANN a été appliqué pour la détection du spectre [36], et ils ont été utilisés pour l'adaptation des paramètres radio de la RC [37]. Son utilisation a été également proposée pour caractériser les performances en temps réel de communication réalisables entre les SU. En outre, le ANN a été utilisé pour la classification des modèles dans une transmission basée sur des modèles pour la RC [38] [39].

2.5.5 Modèle de Markov caché (HMM)

C'est un modèle statistique pratique et soluble mathématiquement pour décrire et analyser le comportement dynamique d'un phénomène complexe aléatoire [40] qui peut être modélisé comme un processus de Markov avec des états observables et non observables. Un HMM peut être utilisé comme un processus d'observation du moteur de cognition pour reconnaître ou classer les stimuli reçus et peut atteindre la conscience. En outre, étant donné qu'il peut reproduire les séquences de formation, il peut être utilisé pour la prédiction. Par ailleurs, l'apprentissage peut être réalisé en créant de nouveaux modèles. La modélisation de l'interaction entre les SU et les PU pour l'accès au spectre peut être efficacement effectuée en utilisant les chaînes de Markov [41]. Les modèles CTMC (Continuous Time Markov Chain) atteignent un bon compromis entre l'équité et l'efficacité. Le modèle de Markov est présenté dans [42] où l'algorithme de sélection d'un canal aléatoire est donné en fonction de plusieurs arrangements de M canaux à N utilisateurs et la probabilité d'utilisation de canal est dérivée. Un modèle similaire de Markov a été utilisé dans [43] pour analyser la performance de la QoS. Le processus d'accès au spectre a été aussi modélisé dans un temps continu par les chaînes de Markov. CTMC a été utilisé dans [44] pour capturer les interactions entre les SU et les PU. Un autre modèle CTMC basé sur l'allocation optimale de spectre a été proposé dans [45] pour diminuer la probabilité d'interruption forcée des SU.

2.5.6 Algorithmes génétiques

Ce sont des algorithmes d'optimisation stochastique fondés sur les mécanismes de la génétique (lois de Mendel) et le principe fondamental de sélection naturelle élaboré par Charles Darwin [46]. Le principe est de simuler l'évolution d'une population d'individus divers pendant une certaine succession d'itérations appelées générations, jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit vérifié. Pour passer d'une génération à une autre, la population est soumise à des opérateurs de sélection. L'utilisation des algorithmes génétiques dans la radio cognitive peut fournir un critère pour accueillir les SU dans la partie appropriée du spectre en interagissant avec l'environnement radio dynamique à temps réel. Dans [47], les auteurs ont proposé un algorithme génétique adaptatif qui adapte les paramètres de croisement et de mutation au moteur de raisonnement dans la radio cognitive pour obtenir les configurations de radio optimales. Cette méthode assure un meilleur contrôle des paramètres de l'algorithme et l'amélioration de la performance. Plusieurs approches ont été présentées dans [48] qui sont destinées à améliorer le temps de convergence et les résultats de l'optimisation de l'utilisation du spectre en fonction de l'algorithme génétique, y compris la technique d'adaptation de population, la quantification de variable, l'adaptation de variable et l'algorithme génétique multi-objective. Dans l'article [49], le modèle d'allocation de spectre basé sur l'algorithme génétique est analysé afin d'éviter les problèmes de contraintes d'interférences qui existent dans le modèle génétique de l'allocation de spectre pour les réseaux de radio cognitive. L'article [50] est aussi basé sur l'utilisation des algorithmes génétiques pour le modèle d'allocation de spectre et soulève un nouvel algorithme génétique amélioré. Cet algorithme ajuste de façon adaptative la probabilité de croisement et de mutation pour les maintenir toujours dans l'état approprié. Il fournit plus de l'égalité des chances de la compétition

individuelle par des mesures hiérarchiques, qui peut effectivement éviter la convergence prématuré à une solution optimale locale.

2.5.7 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 : l'un est coopératif et l'autre est compétitif. 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. 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 [51] [52].

En raison de notre choix qui s'appuie sur les techniques multi-agents pour la résolution de notre problématique de partage de spectre dans les réseaux de RC, la section suivante sera consacrée à la description des solutions utilisant les techniques multi-agents dans le contexte de la radio cognitive.

2.6 Utilisation des SMA pour la gestion du spectre dans le contexte de la RC

L'idée principale de l'utilisation des SMA dans le contexte des RRC est de gérer de manière équitable et décentralisée des ressources radio partagées entre les utilisateurs, afin d'améliorer l'exploitation générale des ressources spectrales. Nous allons présenter dans cette section le concept multi-agent et son utilisation dans les RRC.

2.6.1 Evolution de l'intelligence artificielle distribuée vers les SMA

Contrairement à l'approche centralisée de l'IA, l'IAD (Intelligence Artificielle Distribuée) vise la distribution de l'expertise sur un ensemble de composants qui communiquent pour atteindre un objectif global (élaboration d'un diagnostic, résolution d'un problème, etc.). Cette approche nécessite la division du problème en sous-problèmes. Mais cette hypothèse n'est pas toujours réaliste car beaucoup de problèmes ne peuvent être partitionnés de cette manière.

Une extension des systèmes d'IAD est proposée: les composants doivent être capables de raisonner sur les connaissances et les capacités des autres dans le but d'une coopération effective. Pour ce faire, ils doivent être dotés de capacités de perception et d'action sur leur environnement et doivent posséder une certaine autonomie de comportement, on parle alors d'agents⁶ et par conséquent de systèmes multi-agents [53].

⁶ La terminologie dans le domaine n'est pas encore clairement définie par la communauté IAD, et le terme agent reste encore un terme générique.

Les systèmes multi-agents se caractérisent alors par l'autonomie et l'intelligence des composants impliqués. Toutefois, un agent ne dispose pas d'une vision globale de son environnement.

2.6.2 Concept d'agent

Dans la littérature, on trouve une multitude de définitions d'agents. Elles se ressemblent toutes, mais différentes selon le type d'application pour laquelle est conçu l'agent. À titre d'exemple, voici l'une des premières définitions de l'agent dûe à Ferber [54] : « Un agent est une entité autonome, réelle ou abstraite, qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui, dans un univers multiagent, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et des interactions avec les autres agents ». Selon Demazeau [55], l'agent représente «une entité intelligente, agissant rationnellement et intentionnellement, en fonction de ses buts propres et de l'état actuel de sa connaissance». Quant à Wooldrige et Jennings [56], ils considèrent la définition suivante d'un agent «un agent est un système informatique, situé dans un environnement, qui agit d'une façon autonome et flexible pour atteindre les objectifs pour lesquels il a été conçu».

Il existe deux grandes familles d'agents : les agents réactifs et les agents cognitifs. Le tableau 2.1 résume les différences entre les deux catégories.

Tableau 2.1 Agents cognitifs vs réactifs.

<i>Systemes d'agents cognitifs</i>	<i>Systemes d'agents réactifs</i>
Représentation explicite de l'environnement	Pas de représentation explicite
Peut tenir compte de son passé	Pas de mémoire de son historique
Agents complexes	Fonctionnement stimulus/réponse
Petit nombre d'agents	Grand nombre d'agents

2.6.3 Système multi-agent

Le système multi-agents est considéré comme un système distribué composé d'un certain nombre d'entités autonomes (les agents) [57], qui travaillent selon les modes complexes d'interaction, pour réaliser leurs propres buts et atteindre l'objectif global désiré. Les agents peuvent interagir en communiquant directement entre eux ou par l'intermédiaire d'un autre agent ou en agissant sur leur environnement.

Un SMA est généralement caractérisé par [58] :

- **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.

2.6.4 Mode d'interaction entre les agents

Le simple fait de placer un ensemble d'agents dans un même environnement n'est pas suffisant pour définir un SMA. Les différents agents doivent être en mesure d'interagir et de se comprendre mutuellement afin de pouvoir se coordonner et éventuellement coopérer. L'étude des mécanismes d'interaction est donc primordiale dans la conception d'un SMA. D'après la définition de la FIPA (Foundation of Intelligent Physical Agent)⁷, 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. L'interaction entre les agents peut apparaître sous différentes formes. La figure 2.5 présente la classification ainsi que le type de communication et les techniques multi-agents relatives à chaque classe d'interaction [59].

- 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.

L'interaction comprend l'action sur le monde ainsi que la communication entre les agents du système. Un agent exploite ses capacités dans l'environnement pour émettre un message vers un ou plusieurs agents désignés dans l'environnement. Il existe deux modes de communication dans la littérature : (1) la communication indirecte qui se fait par transmission

⁷ www.fipa.org

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.

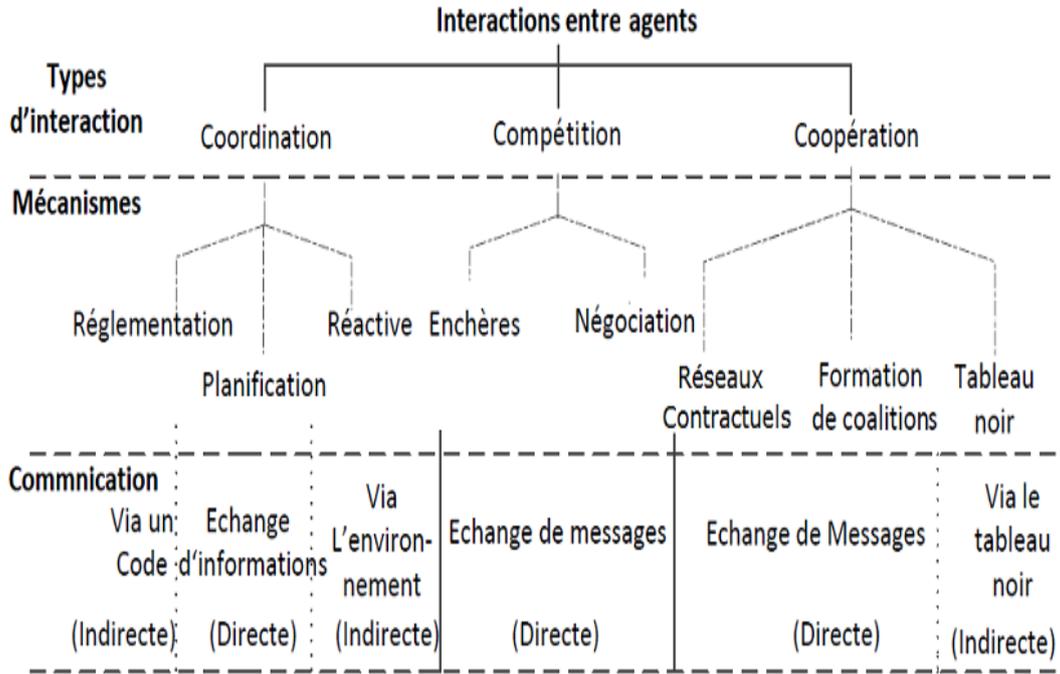


Figure 2.5 Classification des types d'interactions dans un SMA [59].

2.6.5 Agent Vs radio cognitive

Il existe une forte similitude entre un agent et un nœud à radio cognitive ce qui a poussé les chercheurs à utiliser cet outil dans les recherches liées à la radio cognitive. Le tableau 2.2 donne une comparaison entre ces deux concepts, ce qui montre bien que les SMA sont très adaptés pour résoudre les problèmes de la RC [60].

Tableau 2.2 Comparaison entre un agent et une radio cognitive.

Agent	Radio cognitive
Conscient de son environnement via des observations passées.	interagit avec son environnement radio afin de s'y adapter, d'y détecter les fréquences libres et de les exploiter.
Un agent a des compétences qui lui permettent d'atteindre, généralement, ses buts.	Le terminal RC aura suffisamment de capacités et d'informations lui permettant de gérer efficacement les ressources radio dont il a besoin.
Interaction par coopération.	Interaction avec l'environnement.
Autonome	Autonome
Travailler ensemble pour atteindre des objectifs individuels et partagés.	Travailler ensemble pour un accès efficace du spectre.

2.6.6 Application des SMA dans les RRC

Les systèmes multi-agents ont déjà été appliqués pour le partage des ressources dans différents réseaux et applications sans fil actuels. Une des nouvelles contributions des SMA est leur utilisation dans les RRC. Ces contributions ont eu recours à des mécanismes compétitifs et coopératifs pour résoudre le problème d'accès au spectre. Dans ce qui suit, nous citons quelques solutions multi-agents dans le domaine de la RC qui ont été présentés dans la littérature :

Dans [61], un nouveau cercle de cognition basé sur un système multi-agent est proposé, il considère l'interaction entre les utilisateurs cognitifs de l'environnement sans fil. Avec l'aide de la technique typique Q-learning, le problème de contrôle de puissance est modélisé comme le processus de jeu de Markov et il est étudié dans le cadre de nouveau cercle de cognition. Les résultats des simulations montrent que l'algorithme présenté peut effectivement garantir l'équité entre les utilisateurs.

Dans [62], les auteurs ont proposé des solutions basées sur un SMA pour atteindre le partage dynamique du spectre licencié et non licencié. Une approche coopérative est présentée où des nœuds RC embarqués avec des agents sont capables d'effectuer le partage du spectre en échangeant une série de messages avec les appareils voisins sous licence. Puis l'activation du partage non autorisé du spectre entre les utilisateurs RC dont les solutions proposées peuvent atteindre de bonnes performances tout en conservant la distribution équitable du spectre.

Un SMA basé sur la stratégie de partage du spectre est proposée dans [63], en considérant un SMA coopératif, dans lequel les agents sont déployés sur les appareils des utilisateurs primaires et secondaires. Le mécanisme de coopération développé est similaire à ce du protocole de réseau contractuel (CNP), dans lequel l'agent individuel de SU doit envoyer des messages aux agents appropriés des PU voisins en cas de besoin et, ultérieurement, les agents liés aux PU devraient répondre à ces agents afin de rendre un accord de partage du spectre. Les agents SU devraient prendre leurs décisions en fonction de la quantité de spectre, le temps et le prix proposé par les agents PU et devrait commencer le partage du spectre à chaque fois qu'ils trouvent une offre adaptée. Puis, après avoir utilisé le spectre désiré, les agents SU devrait payer le prix convenu pour les agents PU.

Une autre proposition pour la gestion du spectre basée sur des agents coopératifs a été présentée dans [64]. 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 PU. 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.

Dans [65], la gestion coopérative des ressources radio pour plusieurs réseaux de radio cognitive dans les environnements d'interférence est étudiée. L'objectif de cette recherche est de gérer les ressources radio partagées équitablement entre les multiples réseaux non-

coopératifs de radio cognitive pour optimiser la performance globale. Une approche basée sur les systèmes multi-agents est proposée pour réaliser l'échange d'information et de la distribution de décision entre plusieurs RRC de manière distribuée.

Une approche multi-agents basée sur un modèle de négociation est proposée dans [66] 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.

Dans [67], un modèle Aloha-like d'accès au spectre sans négociation est considéré pour le système radio cognitive multi-utilisateur et multi-canal. Afin d'éviter les collisions encourus par le manque de coordination, chaque utilisateur secondaire apprend à sélectionner les canaux en fonction de son expérience. L'apprentissage multi-agent par renforcement est appliqué dans le cadre du Q-learning en considérant d'autres utilisateurs secondaires comme une partie de l'environnement. Les résultats numériques montrent que les utilisateurs secondaires peuvent apprendre à éviter les collisions rapidement.

L'article [68] a proposé un algorithme d'apprentissage multi-agent qui est appliqué pour optimiser l'allocation des ressources en ligne dans les réseaux de cluster. L'apprentissage est distribué à chaque groupe, en utilisant les informations locales uniquement et sans accès à la récompense du système global. Le papier [69] a introduit l'approche d'apprentissage multi-agent par renforcement pour gestion du spectre. Cette approche utilise des fonctions de valeur pour évaluer l'opportunité de choisir les différents paramètres de transmission, et permet une affectation efficace des spectres et puissance de transmission en maximisant la récompense à long terme.

Dans [70], les auteurs proposent un nouveau système multi-agents intelligents pour la gestion des ressources radio, qui est auto-organisé et distribué pour assurer la coexistence des technologies d'accès multi-radio. La ressource radio est gérée par un macro-contrôle et le système de gestion en utilisant les facteurs de contrôle et le mécanisme de validation, au lieu du micro-contrôle pour les utilisateurs individuels. L'objectif est d'augmenter l'efficacité d'utilisation des ressources radio, de maximiser la capacité du système et répondre aux exigences QoS de différents services.

Le travail fait dans [71] propose un système multi-agents qui adopte des agents mobiles comme une technologie pour la distribution des tâches, la collecte des résultats et la gestion des ressources dans des systèmes distribués à grande échelle. Une nouvelle approche basée sur les agents pour la collecte des résultats à partir des éléments du système réparti est présenté. La technique de l'intelligence artificielle basée sur les agents intelligents donne au système un comportement proactif.

Pour résumer, l'utilisation des SMA est prometteuse dans le contexte de RRC où les problèmes d'allocation de spectre peuvent être adressés d'une manière coopérative.

2.7 Conclusion

Le partage de spectre est une problématique majeure dans les RRC qui nécessite le bon fonctionnement de la RC et l'utilisation des techniques qui sont en mesure d'affronter les défis d'accès et d'allocation du spectre. Dans ce chapitre, nous avons mis l'accent sur la fonction de partage de spectre et les différentes techniques d'accès au spectre. Les caractéristiques des SMA et la similitude qui existe entre un agent et un nœud radio cognitive ont été la motivation pour plusieurs recherches au sein des RRC dont notre approche pour la gestion de spectre. Pour cela, nous avons défini les concepts fondamentaux des SMA et nous avons fourni des exemples de travaux existants dans la littérature.

Le chapitre suivant sera consacré à la présentation de principe de routage dans les RRC et les différents protocoles proposés dans la littérature.

Chapitre 3 : Routage dans les réseaux de radio cognitive

Sommaire

3.1 Introduction.....	Erreur ! Signet non défini.
3.2 Généralité sur le routage.....	Erreur ! Signet non défini.
3.3 Métriques de routage.....	Erreur ! Signet non défini.
3.4 Types de routage.....	Erreur ! Signet non défini.
3.4.1 Routage proactif.....	Erreur ! Signet non défini.
3.4.2 Routage réactif.....	Erreur ! Signet non défini.
3.4.3 Routage hybride.....	Erreur ! Signet non défini.
3.5 Hiérarchisation d'un réseau par le clustering.....	Erreur ! Signet non défini.
3.6 Les protocoles non hiérarchiques.....	Erreur ! Signet non défini.
3.6.1 DSDV (Destination Sequenced Distance Vector).....	Erreur ! Signet non défini.
3.6.2 OLSR (Optimized Link State Routing).....	Erreur ! Signet non défini.
3.6.3 AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector).....	Erreur ! Signet non défini.
3.6.4 DSR (Dynamic Source Routing).....	Erreur ! Signet non défini.
3.7 Protocoles de routage hiérarchiques.....	Erreur ! Signet non défini.
3.7.1 CGSR (Clusterhead Gateway Switch Routing).....	Erreur ! Signet non défini.
3.7.2 HSR (Hierarchical State Routing).....	Erreur ! Signet non défini.
3.7.3 ZRP (Zone Routing Protocol).....	Erreur ! Signet non défini.
3.8 Description du problème de routage dans les RRC.....	Erreur ! Signet non défini.
3.9 Défis de routage dans les RRC.....	Erreur ! Signet non défini.
3.10 Classification des protocoles de routage dans les RRC.....	Erreur ! Signet non défini.
3.10.1 Routage conscient de l'activité des PU.....	Erreur ! Signet non défini.
3.10.2 Routage basé sur la localisation.....	Erreur ! Signet non défini.
3.10.3 Routage basé sur le clustering.....	Erreur ! Signet non défini.
3.10.4 Routage multi-chemin.....	Erreur ! Signet non défini.
3.10.5 Routage basé sur l'apprentissage par renforcement.....	Erreur ! Signet non défini.
3.10.6 Routage basé sur la mobilité.....	Erreur ! Signet non défini.
3.11 Protocoles de routage dans les RRC.....	Erreur ! Signet non défini.
3.12 Conclusion.....	Erreur ! Signet non défini.

3.1 Introduction

La radio cognitive est considérée comme une technologie clé pour améliorer l'utilisation globale du spectre par les transmissions opportunistes sur les liens émetteur-récepteur radio cognitive. Cependant, les nœuds RC devraient former un RRC afin que les messages puissent être transmis de la source à la destination, au-dessus d'un certain nombre de liens opportunistes. Par ailleurs, la vertu dynamique de ce réseau pose de nouveaux défis techniques sur la conception de son algorithme de routage.

L'utilisation des protocoles de routage traditionnels des réseaux ad hoc directement dans les RRC entraîne de mauvaises performances en termes de débit, de délai, et de probabilité de perte de paquets d'où la nécessité de concevoir de nouveaux protocoles de routage appropriés à l'environnement de RRC.

Dans ce chapitre, nous commençons par présenter des généralités sur le routage, les métriques et les protocoles de routages les plus connus dans les réseaux Ad hoc. Ensuite, nous allons détailler le principe de clustering pour la hiérarchisation d'un réseau ainsi que les protocoles hiérarchiques et non hiérarchiques existants. Enfin, nous allons aborder le problème de routage dans les RRC et les solutions proposées dans la littérature.

3.2 Généralité sur le routage

Le routage est une méthode d'acheminement des informations à la bonne destination à travers un réseau de connexion donné. Le problème de routage consiste à déterminer un acheminement optimal des paquets à travers le réseau au sens d'un certain critère de performance. Le problème consiste à trouver l'investissement de moindre coût en capacités nominales et de réserves qui assure le routage du trafic nominal et garantir sa survivabilité en cas de n'importe quelle panne de lien ou de nœud [72]. Par exemple si on suppose que les coûts des liens sont identiques, le chemin indiqué dans la figure 3.1 est le chemin optimal reliant la station source et la station destination. Une bonne stratégie de routage utilise ce chemin dans le transfert des données entre les deux stations.

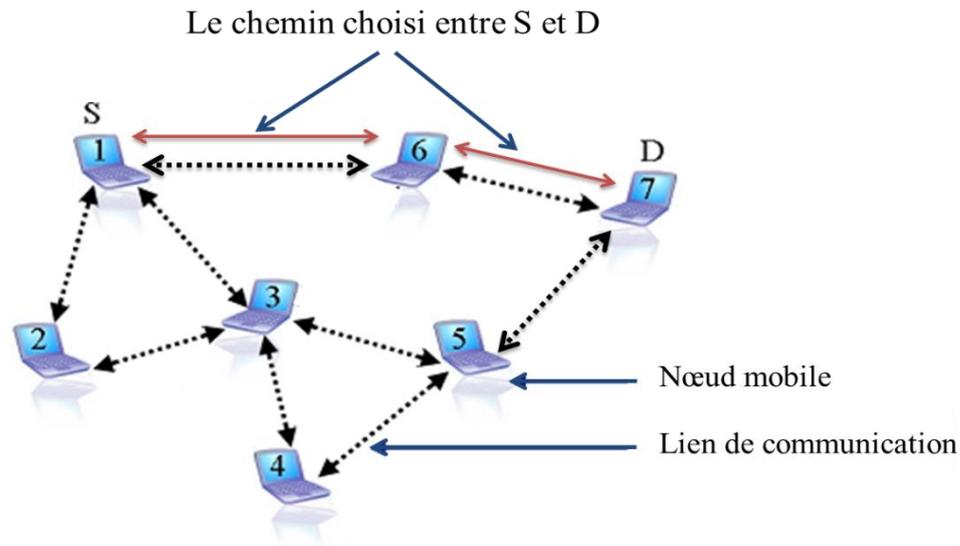


Figure 3.1 Le chemin utilisé dans le routage entre la source et la destination.

Dans certain cas où le nœud source et le nœud de destination se trouvent dans la même portée de communication, aucun protocole de routage n'est initié car le routage est évident ce qu'on appelle envoi direct ou à un seul saut mais ce cas est généralement rare dans les réseaux avec des contraintes plus fortes d'énergie, de capacité, de calcul et de stockage où chaque nœud est susceptible d'être mis à contribution pour participer au routage et pour retransmettre les paquets d'un nœud qui n'est pas en mesure d'atteindre sa destination directement ; tout nœud joue ainsi le rôle de routeur afin d'assurer la connectivité du réseau.

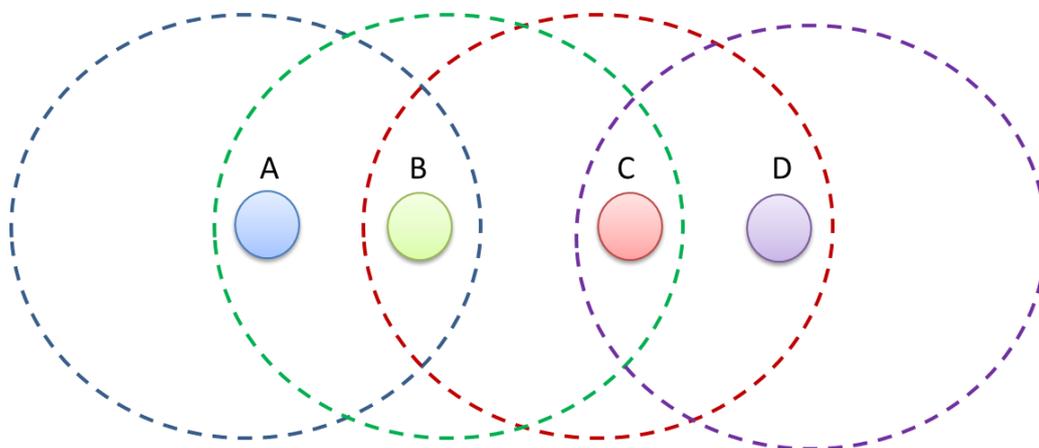


Figure 3.2 Un simple réseau ad hoc constitué de quatre unités mobiles.

Dans l'exemple précédent, le nœud A n'est pas dans la même portée de communication du nœud D (indiquée par le cercle d'origine D dans la figure 3.2) et vice versa. Donc pour transmettre des paquets du nœud A au nœud D, les services des nœuds B et C sont utilisés dans l'envoi des paquets, puisque ces nœuds contiennent dans leurs portée de communication les nœuds A et D, cette technique est appelée routage multi-sauts. Dans la pratique, le problème de routage est plus compliqué à cause de la non-uniformité de la transmission sans fil et de la possibilité du déplacement imprévisible de tous les nœuds concernés par le routage

dans les réseaux de télécommunication mobile tel que le réseau Ad-Hoc. De ce fait, de nouveaux protocoles de routage ont dû être développés. Pour être réellement opérationnel dans un environnement mobile, le protocole de routage prend en compte trois phases :

- 1) *L'échange d'information de routage*: Quand un nœud source veut transmettre un message à un autre nœud dans le réseau, il doit connaître suffisamment d'éléments sur la topologie du réseau pour choisir un chemin atteignant le nœud de destination. Les informations de routage sont obtenues grâce à la quantité d'informations échangées entre les nœuds qui donne une vue plus ou moins précise de la topologie du réseau.
- 2) *La construction de la route* : Après la phase de dissémination des informations de routage, le protocole de routage peut sélectionner un chemin parmi l'ensemble obtenu en fonction de certains critères (plus court, plus rapide, moins congestionné, absence de boucle de routage, etc.). Enfin, le nœud source transmet son message dans le chemin choisi pour atteindre sa destination.
- 3) *La maintenance de la route* : Les protocoles de routage doivent tenir en compte le changement de la topologie des réseaux mobiles qui affecte directement le routage des paquets entre les nœuds qui sont en déplacement. De ce fait, une route doit éviter de rester longtemps interrompue, car les paquets ne pourraient atteindre leur destination.

3.3 Métriques de routage

Les métriques de routage sont des valeurs généralement appelée *coûts* ou *poids* calculées selon un ou plusieurs paramètres tels que le nombre de saut, le taux de perte, la bande passante etc. Généralement plus la métrique est petite, plus le lien/route est de bonne qualité. La métrique d'une route est le cumul (addition, multiplication, moyenne etc.) des métriques des liens qui composent cette route.

Dans un réseau, plusieurs paramètres peuvent influencer sur le routage. Il est donc important de prendre en considération le maximum de métriques possible. Les métriques peuvent prendre en compte la capacité des liens, le nombre de saut, le délai, la diversité des canaux, le taux de perte, l'interférence etc. Les composants peuvent être combinés les uns aux autres selon les besoins du protocole. On peut aussi donner plus de poids à une des composantes dans l'établissement de la métrique. Le fait de combiner plusieurs paramètres augmente les probabilités d'avoir des métriques précises qui correspondent à la qualité du lien ou de la route [73].

Une métrique doit pouvoir quantifier de manière précise l'état du réseau pour que le protocole de routage puisse choisir les routes les plus adéquates en tout temps. Il existe principalement trois méthodes pour obtenir ces informations :

Les méthodes dites actives consistent à injecter périodiquement des paquets de contrôle dans le réseau et récupérer les informations utiles telles que le taux de perte, le délai, la puissance de réception etc. L'avantage est que les mesures sont relativement précises, les inconvénients sont que : 1) les paquets de contrôle sont différents du trafic réel (taille des paquets, débit) et ne reflètent pas toujours la réalité; 2) l'envoi périodique de paquets

consomment des ressources notamment la bande passante qui peut créer une surcharge du réseau (overhead). Les métriques telles que ETX (Expected Transmission Count) [74], ETT (Expected Transmission Time) [75] utilisent une méthode active en injectant périodiquement des paquets de contrôle.

Les méthodes dites passives utilisent le trafic courant pour effectuer ces mesures. Cette méthode évite la surcharge inutile du réseau. L'inconvénient est que les mesures ne peuvent se faire qu'en présence de suffisamment de trafic ce qui d'avance ne peut pas être garanti. L'hétérogénéité du trafic aussi peut fausser les mesures.

Les méthodes dites hybrides utilisent en même temps les méthodes passives et actives. Si le trafic est suffisant les mesures sont faites grâce à une méthode passive, sinon on utilise les paquets de contrôle pour faire les mesures. Ces méthodes regroupent les avantages des deux types de méthodes. EAR (Efficient and Accurate link-quality monitoR) [76] est un exemple de protocole qui utilise une méthode de mesure hybride

3.4 Types de routage

L'objectif primordial de toute stratégie de routage est de mettre en œuvre une bonne gestion d'acheminement qui soit robuste et efficace. Selon la manière dont les nœuds établissent les chemins, trois types de routage sont distingués : le routage réactif, le routage proactif et le routage hybride.

3.4.1 Routage proactif

Le routage proactif se base sur l'établissement de routes à l'avance ce qui offre de bonnes performances en terme de temps de réponse. Les nœuds mettent à jour périodiquement les données de routage de façon à obtenir en permanence le plus court chemin (calculé en terme du nombre de nœuds intermédiaires, aussi appelé nombre de sauts) vers tous les nœuds du réseau [77]. Ainsi, si un nœud désire transmettre un paquet vers une destination, il consulte sa table de routage qui lui indique immédiatement le chemin à suivre. Il existe deux approches pour ce type de protocoles :

- L'approche à vecteur de distance où chaque nœud diffuse les distances qui le séparent de tous les autres nœuds du réseau ;
- L'approche à état des liens où il s'agit de diffuser des descriptions des liens avec les nœuds voisins.

Parmi les protocoles proactifs les plus répandus dans la littérature, on peut citer les protocoles DSDV [78] et OLSR [79].

3.4.2 Routage réactif

À l'inverse des protocoles proactifs, les protocoles réactifs ne construisent pas de tables de routage au préalable. Si un nœud a des données à transmettre, il entreprend une recherche de route et lorsque le chemin est établi, l'acheminement des données peut commencer. Cette

recherche de route diffère d'un protocole à un autre selon l'approche utilisée : état de lien ou vecteur de distance [77]. Les protocoles réactifs AODV [80] et DSR [81] utilisent respectivement l'approche état de lien et l'approche vecteur de distance dans leurs stratégies de routage.

3.4.3 Routage hybride

Le routage hybride combine les caractéristiques des deux types précédents. Dans la phase de dissémination d'informations de routage, les protocoles hybrides utilisent un protocole proactif pour maintenir les informations locales du réseau (au maximum les voisins à deux sauts) et dans la phase de la construction de la route, ils font appel aux techniques des protocoles réactifs pour trouver la route. Les protocoles hybrides vont donc tirer les avantages de ces deux protocoles ce qui leur permet de s'adapter bien aux grands réseaux, cependant, il cumule aussi leurs inconvénients tels que les messages de contrôle périodique et le coût d'ouverture d'une nouvelle route. Plusieurs protocoles hybrides existent dans la littérature comme le protocole ZRP [82].

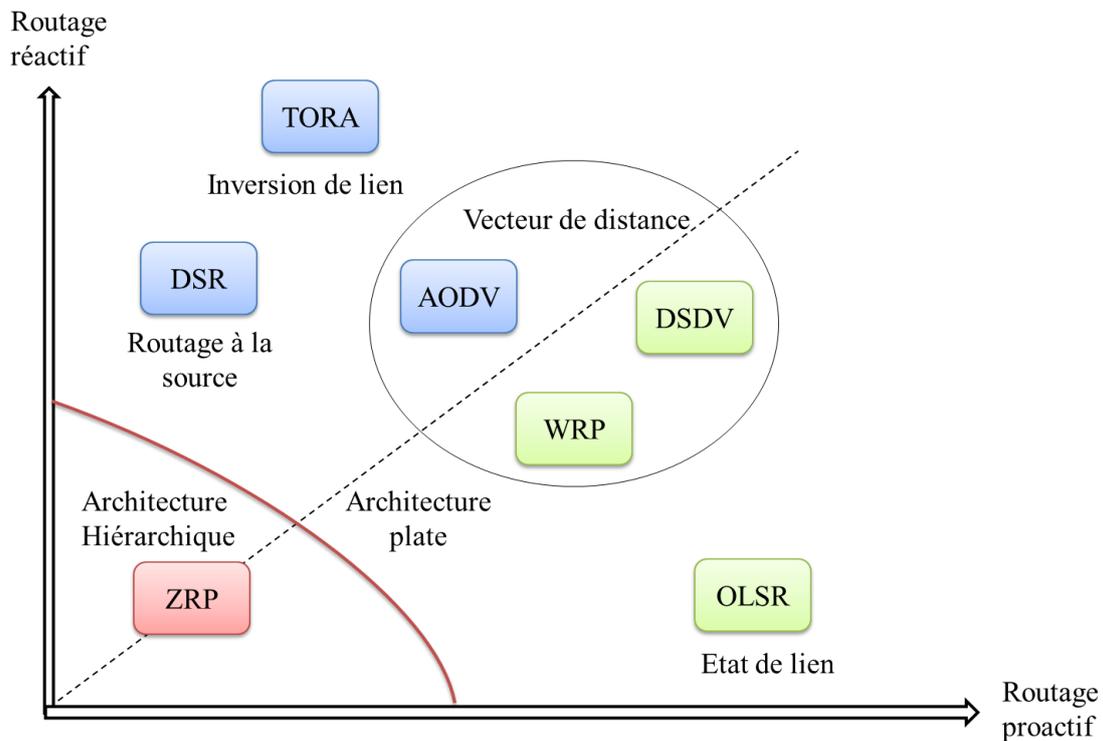


Figure 3.3 Classification des protocoles de routage Ad Hoc.

A l'intérieur de ces différents types de routage, on peut distinguer deux catégories de protocoles comme le montre la figure 3.3; « les protocoles non hiérarchiques » qui sont basés sur une architecture à plat du réseau qui attribue le même rôle à tous les nœuds et « les protocoles hiérarchiques » qui introduisent une architecture hiérarchique dans le réseau. Avant de citer les principaux protocoles de ces deux catégories, nous allons présenter le principe de la hiérarchisation du réseau dans la section suivante.

3.5 Hiérarchisation d'un réseau par le clustering

Dans les architectures à plat, les protocoles de routage fonctionnent bien quand le réseau ne comprend pas un grand nombre de nœuds mais lorsque le réseau devient plus grand et avec une forte mobilité des nœuds, sa gestion devient plus difficile puisque le nombre de message de contrôle augmente ce qui produit une explosion des tables de routage. Cependant, l'architecture hiérarchique s'est considérée comme l'une des solutions efficaces afin de faciliter la gestion du réseau surtout le routage. La technique de clustering consiste à regrouper les nœuds du réseau, géographiquement voisins, en des groupes virtuels appelés « clusters » selon certaines règles. Un nœud est élu comme chef de groupe, appelé cluster-head, qui possède des fonctions supplémentaires et des ressources énergétiques supérieures aux autres nœuds du réseau ; son rôle est de faire le relais entre les nœuds du cluster et la station de base directement ou via d'autres cluster-heads. Les autres nœuds de cluster sont des nœuds « ordinaires » dite aussi membres ou bien des nœuds « passerelles » qui font le lien avec un autre cluster. Cette technique évite les diffusions fréquentes des informations de routage pouvant surcharger le réseau et dégrader considérablement ses performances. Dans certain type de hiérarchisation, un ensemble de nœuds qui est définie par une « zone » ne possède pas un cluster-head. Ainsi, le cluster est une sous-classe d'une zone. La topologie d'un réseau de cluster est illustrée dans la figure 3.4.

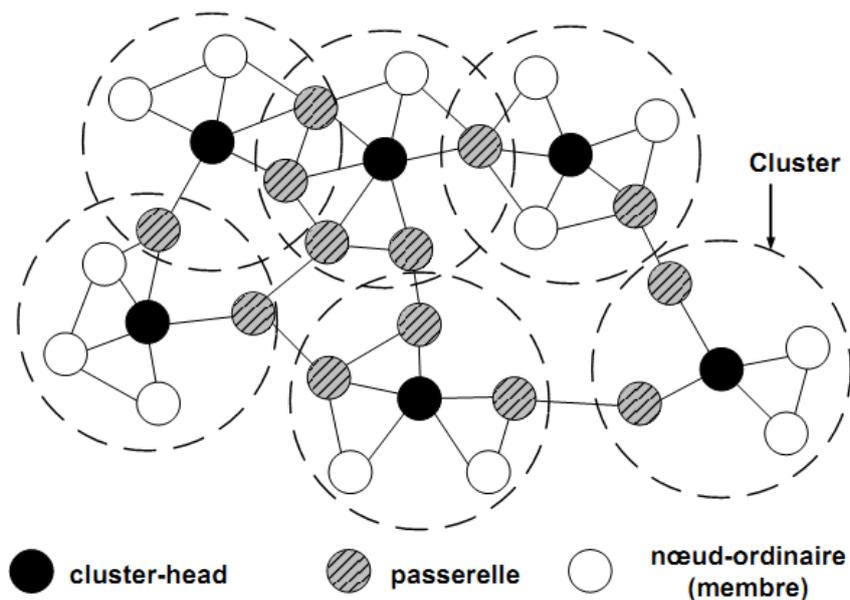


Figure 3.4.11 Topologie d'un réseau de clusters [83].

- **Formation de clusters**

Il existe plusieurs méthodes de formation de clusters. La plus répandue s'exécute comme suit [84]:

1. Chaque nœud devra connaître son voisinage par le biais des messages Hello,
2. Chaque nœud prend la décision selon sa connaissance locale de la topologie pour être cluster-head ou non,

3. Le nœud choisi comme cluster-head diffuse son statut dans son voisinage et invite ses voisins qui ne sont pas encore affiliés à d'autres clusters de le rejoindre.

- **Election de cluster-head**

La phase d'élection de cluster-heads appelée aussi la phase Setup utilise une métrique spécifique ou une combinaison de métriques pour chaque nœud telle que le plus grand/petit ID dans son voisinage, le degré de connectivité, la puissance de transmission, l'énergie restante ou la mobilité ou bien un poids qui représente une combinaison de quelques métriques.

- **Les approches de clustering**

De nombreuses approches de clustering ont été proposées. Une grande partie de ces approches construisent des clusters à 1 saut où chaque nœud est à un saut de son cluster-head. D'autres algorithmes génèrent des clusters à k-sauts où chaque nœud est à au plus k sauts de son cluster-head. La majorité des algorithmes proposent l'utilisation d'une métrique de base qui permet d'élire un cluster-head et invoque parfois d'autres métriques pour rompre les égalités. Les auteurs dans [83] ont proposé de classer les algorithmes de clusterisation dans cinq classes selon le type des métriques employé lors de la sélection des cluster-heads. La métrique arbitraire est une métrique qui est donnée de façon arbitraire ou aléatoire à un nœud comme l'identifiant d'un nœud. Le deuxième type de métrique concerne les métriques calculées à partir de la topologie du réseau comme la connectivité d'un nœud appelée aussi degré d'un nœud. D'autres métriques sont plutôt spécifiques au nœud mobile comme sa mobilité relative et son énergie résiduelle. Il y a des algorithmes qui combinent plusieurs métriques pour calculer un poids utilisé dans l'élection du cluster-head. Néanmoins, il existe des algorithmes qui n'utilisent aucune métrique particulière pour structurer le réseau en clusters.

3.6 Les protocoles non hiérarchiques

Un protocole de routage non hiérarchique permet aux nœuds de se connecter directement les uns aux autres pour relayer les messages par des sauts multiples afin que ces messages puissent être acheminés. Dans cette section, quelques protocoles de routage à plat (non hiérarchique) dans les réseaux Ad-hoc sont présentés.

3.6.1 DSDV (Destination Sequenced Distance Vector)

DSDV [78] est un protocole proactif de routage à vecteur de distance basée sur l'algorithme Bellman-Ford [85] qui a été conçu pour les réseaux Ad Hoc en ajoutant une gestion séquentielle des paquets de mise à jour. Chaque nœud du réseau maintient une table de routage contenant le saut suivant et le nombre de sauts pour toutes les destinations possibles. Afin de maintenir la consistance des tables de routage dans une topologie qui varie rapidement, chaque nœud du réseau transmet périodiquement sa table de routage à ses voisins

directs. La mise à jour doit permettre à un nœud de pouvoir localiser un autre nœud du réseau. Ces mises à jour sont classées en deux types :

- *La mise à jour complète*, la station transmet la totalité de la table de routage aux voisins, ce qui nécessite l'envoi de plusieurs paquets de données.
- *La mise à jour incrémentale*, seules les entrées qui ont subi un changement par rapport à la dernière mise à jour sont envoyées, ce qui réduit le nombre de paquets transmis.

L'objectif principal de ce protocole est de résoudre le problème des boucles de routage "routing loop", et celui de "counting to infinity". Pour cela le DSDV utilise les numéros de séquence pour indiquer la « nouveauté » d'une route. Les routes avec les plus grands numéros de séquences sont privilégiées pour le choix des routes puisque cela signifie une route plus fraîche. Le numéro de séquence pour une route est initialisé par le nœud émetteur et incrémenté pour chaque nouvel avertissement de route.

Malgré les améliorations apportées par le DSDV mais il reste long et coûteux car il nécessite des mises à jour régulières de ses tables de routage même lorsque le réseau est inactif. À chaque mise à jour, un nouveau numéro de séquence est nécessaire ce qui augmente le temps avant que le réseau converge. Ceci rend le DSDV peu adapté aux réseaux très dynamiques.

3.6.2 OLSR (Optimized Link State Routing)

OLSR [79] est un protocole proactif à état des liens qui opère sur la base d'échanges périodiques de message de contrôle afin d'accomplir les opérations de découverte et de maintenance de la topologie du réseau. OLSR maintient sur chaque nœud une table de routage complète (comprenant une entrée pour tous les autres nœuds du réseau). Chaque nœud choisit la route la plus adaptée en fonction des informations qu'il a reçues. OLSR apporte certaines améliorations sur le principe de base de l'état de lien en vue d'atteindre de meilleures performances dans un contexte ad hoc. Pour éviter l'inondation (flooding) sur ce type d'algorithme « à état de liens », le protocole prévoit l'utilisation de la technique de relais multi-point (MPR : MultiPoint Relay), qui représente un sous ensemble des voisins à un saut qui permet d'atteindre la totalité des voisins à deux sauts. Cette technique de MPR est utilisée pour diminuer le trafic dû à la diffusion des messages de contrôle dans le réseau (voir figure 3.5), et aussi pour diminuer la taille du sous-ensemble des liens diffusés à tout le réseau puisque les routes sont construites à base des relais multipoints.

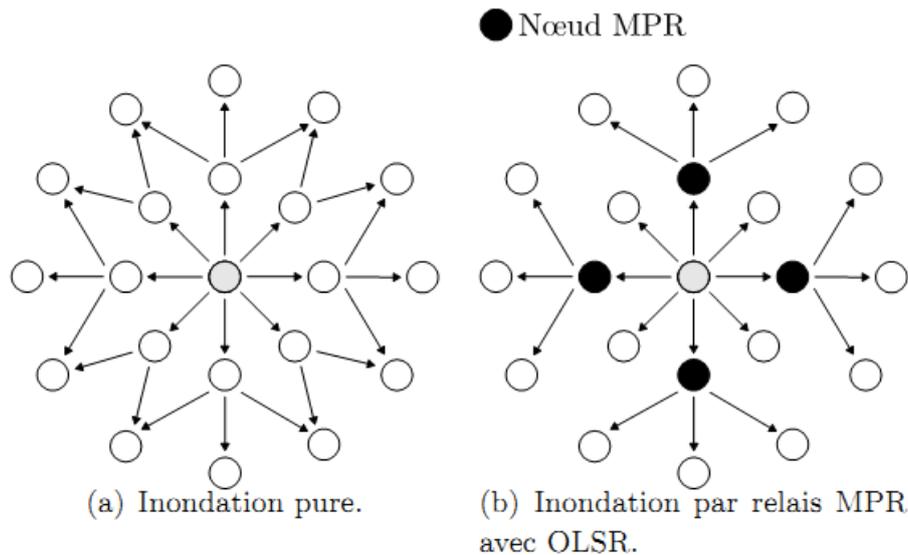


Figure 3.512 Inondation du réseau [86].

3.6.3 AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector)

AODV [80] est un protocole réactif à vecteur de distance qui s'inspire de DSDV. AODV utilise les numéros de séquence d'une façon similaire à DSDV pour éviter les boucles de routage et pour indiquer la « nouveauté » des routes. Par contre, il ne construit pas a priori la table de routage mais il réagit à la demande et essaie de trouver un chemin avant de router les informations. Tant que la route reste active entre la source et la destination, le protocole de routage n'intervient pas et les nœuds qui ne se trouvent pas sur le chemin ne maintiennent aucune information de routage ce qui diminue le nombre de paquets de routage échangés entre les nœuds constituant le réseau.

Lorsqu'un nœud désire trouver une route vers la destination, AODV inonde le réseau avec des paquets de demande RREQ (Route REQuest). Le nœud source diffuse un message RREQ sur tous les canaux disponibles et les nœuds qui reçoivent ce message mettent à jour la route qui mène vers la source. Ces voisins à leur tour diffusent ce message RREQ vers les autres nœuds (voir la figure 3.6). Chaque nœud traversé par un paquet de RREQ stocke des informations sur le numéro de séquence du paquet, l'adresse des nœuds source et destination ainsi que l'adresse du nœud précédent. Lorsque ces paquets RREQ arrivent à la destination, un paquet de réponse RREP (Route REPLY) est envoyé suivant le chemin inverse vers le nœud émetteur. Dans son chemin de retour vers la source, RREP introduit la création des entrées pour la destination dans les tables de routage des nœuds intermédiaires. Les entrées de routage expirent après une certaine période (time-out). Précisons que le protocole AODV ne supporte que les liens symétriques dans la construction des chemins inverses.

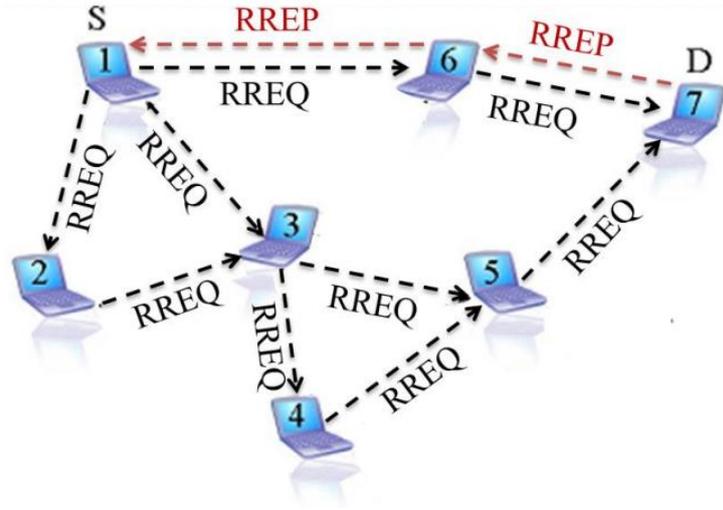


Figure 3.613 Recherche de route dans AODV.

Afin de maintenir les routes, des messages HELLO sont diffusés périodiquement pour détecter les nœuds voisins. Si au bout d'un certain temps, un nœud x ne reçoit pas un message HELLO d'un voisin y par lequel il envoie des données donc le lien en question est considéré défaillant. Dans ce cas, un message d'erreur RERR (Route ERRor) se propage vers la source et tous les nœuds intermédiaires vont marquer la route comme invalide.

3.6.4 DSR (Dynamic Source Routing)

DSR [81] est un protocole réactif à état de lien, il propose une approche comparable à l'AODV dont la recherche des routes s'effectue à la demande mais il se distingue par une approche de routage à la source afin d'envoyer les paquets de données : chaque nœud inclut son adresse dans l'entête de paquet de telle sorte qu'en arrivant à la destination, le paquet contient une liste complète et ordonnée de nœuds à travers lesquels le paquet doit passer qui est renvoyée à la source pour savoir l'ordre complet des nœuds jusqu'à la destination. Le protocole DSR prend en compte les liens unidirectionnels. Par conséquent, le chemin « destination-source » peut être différent du chemin « source-destination ».

Parmi les avantages de DSR est l'absence de boucles de routage puisque la route que chaque paquet de données doit emprunter est incluse dans l'entête du paquet permettant ainsi à la source de disposer d'autant de routes qu'elle a reçu de réponses et d'effectuer ainsi un équilibrage de charge ou encore de disposer de routes de secours pour palier au problème de mobilité. Néanmoins, le problème de passage à l'échelle peut se poser. Lorsque la taille du réseau devient plus grande, les paquets de contrôle deviennent également plus grands en volume ce qui entraîne la surcharge du réseau.

3.7 Protocoles de routage hiérarchiques

Le routage hiérarchique est réalisé à plusieurs niveaux dans le sens où la vue du réseau devient réduite. L'avantage des protocoles hiérarchiques est de diminuer le trafic des paquets de routage et la taille des données à conserver. Plusieurs exemples de protocoles hiérarchiques sont décrits dans la littérature, nous allons présenter les plus répandus:

3.7.1 CGSR (Clusterhead Gateway Switch Routing)

CGSR est un protocole hiérarchique basé sur l'algorithme de DSDV [87]. Le réseau utilise une hiérarchisation du réseau en clusters pour router les paquets. Le cluster est formé des nœuds appartenant à la portée de communication d'un cluster-head qui est le responsable de contrôler ce cluster. Un nœud qui est dans la portée de communication de plus d'un cluster-head est un nœud *gateway* ou « passerelle ». Dans ce protocole, chaque nœud maintient deux tables, une table de membres de cluster qui possède pour chaque nœud du réseau l'identifiant de cluster-head auquel il est rattaché (la mise à jour de cette table se fait périodiquement en utilisant l'algorithme de DSDV) et une table de routage qui détermine le prochain nœud vers chaque cluster-head. Les paquets sont routés alternativement entre les cluster-heads et les passerelles. Le nœud source envoie ses paquets de données à son cluster-head qui va transmettre ces paquets au nœud passerelle, la passerelle à son tour envoie les paquets au cluster-head suivant dans le chemin et ainsi de suite jusqu'à ce que le nœud destination reçoive ces paquets. Ce protocole réduit la taille de la table de routage diffusée car uniquement les entrées en direction des cluster-heads sont conservées. Cependant un chemin choisi peut ne pas être optimal.

3.7.2 HSR (Hierarchical State Routing)

HSR est un protocole à état de lien qui combine les notions de groupes dynamiques, niveaux hiérarchiques avec une gestion efficace de localisation [88]. HSR classe les nœuds du réseau selon une structure hiérarchique en arbre. Le niveau n de la hiérarchie correspond aux nœuds assemblés en clusters et le niveau $n+1$ est composé des cluster-heads de niveaux n qui sont élus pour servir d'intermédiaire à destiner l'information à n'importe quel autre membre. Ces cluster-heads s'organisent en un ensemble de groupes de la même manière du niveau bas, et ainsi de suite pour le reste des niveaux. Chaque nœud membre de niveau n doit connaître une route vers son cluster-head de niveau n et vice versa. Chaque nœud obtient une adresse hiérarchique de la forme < sous-réseau, hôte >. Le champ sous-réseau se constitue du chemin de la hiérarchie de niveau $n+1$ au niveau n . Par ce découpage en adresses hiérarchiques une route peut, aisément, être trouvée. Un nœud source utilise l'adresse hiérarchique de sa destination pour transmettre son message. Il transmet alors sa requête à son cluster-head qui la fait remonter les niveaux vers les représentants du niveau supérieur jusqu'à ce qu'un représentant soit capable de localiser la destination. Une réponse redescend alors vers la source lui indiquant l'adresse hiérarchique en question.

3.7.3 ZRP (Zone Routing Protocol)

ZRP est un protocole hybride qui divise le réseau en différentes zones [82]. La zone de routage d'un nœud inclut tous les nœuds qui sont à une distance au maximum de k sauts. Les nœuds les plus distants (nombre de sauts = k) à l'intérieur de sa zone de routage constituent l'ensemble des nœuds périphériques. ZRP utilise un protocole de routage proactif IARP (Intra-zone Routing Protocol) à l'intérieur de cette zone de routage, ce qui permet de mettre à jour l'état de réseau et de maintenir des routes. De cette manière, un nœud peut décider immédiatement lors de la réception d'un paquet s'il a un chemin vers la destination ou non et peut ainsi répondre au nom de tous les nœuds de la zone à laquelle il appartient. Tandis que, un protocole de routage réactif IERP (Interzone Routing Protocol) est employé entre les zones à la demande pour chercher les routes entre un nœud et une destination qui se trouvent à l'extérieur de sa zone de routage. Ainsi, une demande de route est créée et envoyée aux nœuds périphériques de la zone de routage. Ces nœuds périphériques vérifient l'existence de destination dans leurs zones pour renvoyer un paquet de réponse de route à la source. Dans le cas contraire, ils diffusent la demande de route à leurs propres nœuds périphériques qui, à leur tour, effectuent le même traitement. Ce protocole présente l'avantage de diminuer le nombre de messages de contrôle qui transitent sur le réseau comparé aux protocoles proactifs ou réactifs. De plus, il permet de diminuer le temps de latence pour trouver de nouvelles routes.

3.8 Description du problème de routage dans les RRC

Le problème de routage dans les réseaux classiques comme les réseaux Ad Hoc est de trouver un chemin entre un nœud source et sa destination qui assure une transmission des données sans interruption. La communication entre les nœuds se fait généralement à travers un canal fixe qui est toujours disponible pour la communication. La difficulté vient de la mobilité des nœuds ad-hoc. Par conséquent, la topologie de réseau subit des changements et certains chemins peuvent se casser. Cependant, le défi est de développer un protocole de routage qui construit rapidement les routes avant les changements de topologie. En cas de défaillance d'un lien, le protocole de routage doit réagir rapidement et de le reconstruire.

Dans les RRC, un protocole de routage doit garantir la communication entre les SU sans perturber les activités de PU. Donc, il doit créer et maintenir des routes à plusieurs sauts entre les utilisateurs secondaires en choisissant les nœuds de relai et le canal à utiliser pour chaque lien de la route tout en minimisant les interruptions de connexions primaires. En cas d'interruption, le protocole de routage doit toujours trouver rapidement un autre chemin de routage. Il n'y a pas de solution générale pour le routage dans les RRC car la solution dépend de l'environnement cognitif. Donc, pour concevoir une solution efficace au problème de routage dans les RRC, il faudrait avoir un échange actif entre les modules de routage et les fonctionnalités de gestion de spectre de telle sorte que les modules de routage soient constamment au courant de l'environnement pour prendre les bonnes décisions [89]. L'activité et le temps d'utilisation des bandes primaires par le SU peuvent déterminer aussi la solution de routage à utiliser. Nous classons les environnements possibles créés par l'activité des PU sur leurs canaux dans trois catégories distinctes.

- *Statique*: Le temps d'utilisation de la bande primaire offre un environnement sans fil relativement statique. D'un point de vue de SU, une fois une bande de fréquence est disponible, elle peut être exploitée pour une durée illimitée.
- *Dynamique*: Dans un scénario dynamique, la bande primaire peut être exploitée par un SU, mais sa disponibilité intermittente affecte sérieusement le service offert pour ce SU.
- *Opportuniste ou très dynamique*: Si les PU sont très actifs, alors la disponibilité de leurs bandes de fréquences pour une longue durée de communication devient une hypothèse irréaliste.

3.9 Défis de routage dans les RRC

Pour trouver une route optimale entre un nœud source et une destination dans les RRC, il faut faire face à plusieurs défis liés à l'activité des utilisateurs primaires et aux opportunités spectrales. Dans la suite, nous présentons les défis majeurs.

Dynamisme de disponibilité de canal : La disponibilité du canal pour la transmission de données est dynamique, elle dépend de l'emplacement physique des SU et l'utilisation du canal par les PU. Une faible utilisation de spectre par les PU offre une grande disponibilité des canaux pour les SU, et vice-versa. Cela signifie également que le nombre de canaux disponibles pour chaque SU est dynamique [90]. Cependant, la commutation de canal peut être nécessaire ce qui résulte un grand surcoût de routage à cause des coupures de liens entre les SU.

Absence d'un canal commun fixe: Il existe deux types de canaux: le CCC et le canal de données. Les nœuds de réseau échangent des paquets de contrôle de routage, tels que RREQ et RREP, en CCC; et envoyer des paquets de données dans des canaux de données. En raison de l'obligation de quitter un canal une fois le PU devient actif, l'hypothèse de la disponibilité d'un CCC statique, qui a été largement adopté dans la littérature, pour l'échange des paquets de contrôle de routage peut être impraticable [91]. En outre, l'utilisation de CCC pour sélectionner les routes peut ne pas refléter les caractéristiques de la route actuelle [92]. En conséquence, la conception des systèmes de routage dans les RRC sans compter sur un CCC fixe peut être nécessaire pour fournir une faisabilité de la mise en œuvre.

Intégration de la découverte de route à la décision de canal: La sélection d'une route sans informations de canal peut ne pas être optimale à cause de la nature dynamique du spectre. Par exemple, une performance stable de bout en bout a besoin d'une route qui fournit des liens stables entre les nœuds SU intermédiaire afin de minimiser les coupures des liens. En conséquence, la sélection de la route doit être basée sur des informations de canal obtenues avant la sélection de la route [93].

Transmissions multiples pour chaque Broadcast/Multicast : La Broadcast / Multicast est une monnaie courante dans le routage pour l'échange de message de contrôle. A cause de la diversité des canaux d'exploitation, chaque SU peut utiliser différents canaux disponibles; donc une seule émission dans un canal particulier ne peut pas atteindre tous les SU voisins.

Des transmissions multiples dans différents canaux pour chaque Broadcast / Multicast peuvent être nécessaires. En conséquence, le nombre de transmissions et l'exigence de la bande passante augmente avec le nombre de canaux disponibles pour chaque broadcast. Donc, un plus grand nombre de canaux disponibles peut n'avoir aucune contribution à la performance de débit.

Alternativement, une fenêtre de synchronisation, qui est une durée de temps fixe où tous les SU sont accordés sur un canal particulier pour la diffusion, peut être appliquée; toutefois, la synchronisation de temps est nécessaire. En conséquence, les systèmes de routage devraient réduire le nombre de transmission pour chaque Broadcast / Multicast, afin de réduire le nombre de commutation de canaux et la consommation de bande passante [94].

Compromis entre le nombre de sauts et la performance de l'ensemble de réseau : Une route avec un nombre de sauts élevé (ou avec une plus grande portée de transmission entre les SU) a trois effets. Tout d'abord, une longue distance de propagation entre les SU peut augmenter les interférences aux PU. Deuxièmement, les coupures des liens peuvent être plus fréquentes, ce qui encourt un coût plus élevé de la maintenance de la route. Troisièmement, il encourt une consommation d'énergie plus élevée qui est due à la longue portée de transmission. Un nombre approprié de sauts est nécessaire d'améliorer la route de bout en bout (par exemple un délai réduit, un débit plus élevé et une faible consommation d'énergie) [95]. En conséquence, les systèmes de sélection de route devraient prendre en compte le nombre de sauts pour atteindre la performance du réseau désiré.

Consommation d'énergie de l'ensemble du réseau : Les caractéristiques intrinsèques du RRC pour faire face aux différents défis (tel que la commutation de canal ainsi que la puissance de transmission distinctif dans des différents canaux) ajoutent plus de défis à la conception de systèmes de routage basé sur l'énergie dans les RRC. Hou et al. [96] discutent quelques défis dans chaque phase de routage:

- *La découverte de route :* A cause des transmissions multiples pour chaque Broadcast/Multicast, la diffusion de messages de contrôle RREQ entraîne la consommation d'énergie. Par exemple, la diffusion des RREQ à tous les SU dans le routage réactif nécessite des nœuds intermédiaires (des SU) pour retransmettre le paquet même si ces SU ne peuvent pas être choisis dans le cadre de la route, ce qui augmente la consommation d'énergie, qui se prononce à la suite de défi.
- *La sélection de route :* Le routage des paquets de contrôle ont été largement transférée sur le canal de contrôle commun, qui est accessible par tous les SU. Le transfert de ces paquets de contrôle, ne peut fournir une estimation précise sur la consommation réelle d'énergie pour la transmission de paquets de données dans des canaux de données, et donc le choix de la route peut ne pas fournir l'équilibrage de charge de l'énergie entre les SU. En plus, la sélection de route dans les RRC basé sur l'énergie doit être fondée sur les exigences spécifiques du réseau.
- *La maintenance de route :* Pour maintenir les routes et de récupérer les routes interrompues, les SU ont besoin de vérifier périodiquement leur état de lien respective. Cette période est inversement proportionnelle à la consommation d'énergie des nœuds SU et proportionnelle au

temps d'arrêt des liens. En outre, à cause de la nature dynamique de spectre dans les RRC, la maintenance de route est très nécessaire et donc plus d'énergie est nécessaire pour récupérer les routes interrompues.

Maintenance et récupération des liens : En général, une coupure de lien dans les réseaux à multi-sauts est causée par la mobilité. Cependant dans les RRC, la coupure peut aussi être provoquée quand un utilisateur primaire est détecté. En fait lorsqu'un PU commence soudainement son activité dans le réseau pendant que les SU sont en communication, un canal (ou plus) devient inutilisable dans une région; résultant par conséquent à une coupure dans la route. Il est donc très important d'avoir des procédures de signalement efficaces qui permettent de restaurer les liens avec un effet minimal sur la qualité globale [97].

3.10 Classification des protocoles de routage dans les RRC

Plusieurs protocoles de routage ont été proposés pour les RRC pour faire face aux problèmes inhérents des réseaux, qui comprennent l'accès opportuniste au spectre, la dynamique du spectre disponible, l'interférence avec l'activité de PU, la transmission multicanaux et la consommation élevée d'énergie. La classification des protocoles de routage est indiquée dans la figure 3.7 et les protocoles de routage sont classés comme suit [98] :

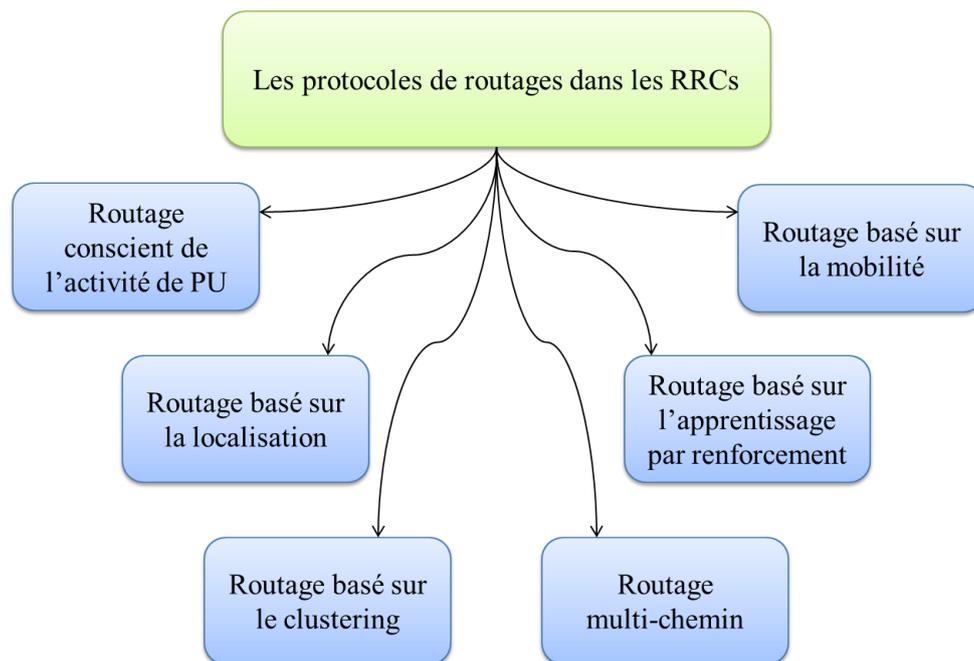


Figure 3.7 Classification des protocoles de routage dans les RRC.

3.10.1 Routage conscient de l'activité des PU

Le protocole a été conçu dans le but d'établir un chemin de transmission qui permet d'éviter les régions d'activité des PU. La raison derrière cette conception est de rendre les routes moins vulnérables à l'impact de l'activité des PU lors de la transmission de données.

Quand une région de PU est rencontrée, le chemin entrera dans un détour pour éviter cette région.

3.10.2 Routage basé sur la localisation

Le protocole utilise les informations de localisation des nœuds pour transmettre les messages de routage vers les régions désirées qui font le plus de progrès vers la destination plutôt que de l'ensemble du réseau afin de réduire le surcoût du contrôle. Pour obtenir l'ensemble de la topologie géographique du réseau, chaque nœud va diffuser sa localisation et son ID à tous les nœuds dans les réseaux (après la fin de ce processus, seulement un changement de topologie sera annoncé). En outre, la position de chaque nœud peut être également déterminée en utilisant le GPS (Global Positioning System).

3.10.3 Routage basé sur le clustering

Le protocole divise les nœuds de réseau à un certain nombre de clusters. Les algorithmes de clustering peuvent être classés en deux catégories, i.e. les clusters avec ou sans cluster-head. Pour la première catégorie, la cluster-head est élu pour chaque cluster pour aider dans la gestion de transmission de données et de maintenir les informations d'appartenance à son cluster. L'objectif principal du routage basé sur le clustering est d'augmenter la scalabilité du réseau, d'optimiser l'utilisation de la bande passante, et d'équilibrer la répartition des ressources.

3.10.4 Routage multi-chemin

Le protocole permet la création de plusieurs chemins alternatifs entre les paires de source-destination afin de transmettre plusieurs flux de données simultanément ou être utilisé pour le but de secours. Il est généralement proposé de fournir un équilibrage de charge, d'augmenter la fiabilité de la transmission de données et de maximiser l'utilisation des ressources du réseau.

3.10.5 Routage basé sur l'apprentissage par renforcement

Le protocole applique un apprentissage par renforcement pour former une route pour la transmission de données. L'apprentissage par renforcement donne une plateforme d'apprentissage d'une politique de contrôle (la formulation des observations en actions) sur la base des expériences et des récompenses. Le but de l'application de l'apprentissage par renforcement pour le routage de données dans les RRC est d'affronter efficacement les défis de l'incertitude sur la disponibilité du spectre.

3.10.6 Routage basé sur la mobilité

Le protocole est conçu dans le but de supporter les RRC mobiles dans lequel les nœuds (SU ou PU) sont mobiles, i.e. les nœuds sont libres de se déplacer à tout moment, à tous les sens et à toute vitesse, résultant des ruptures de liens fréquentes. Pour traiter ces réseaux exigeants, le protocole peut établir le chemin fiable contenant un nombre maximal de nœuds

moins mobiles, ou fournir un mécanisme de récupération de route efficace pour récupérer le lien défaillant causé par la mobilité du nœud.

3.11 Protocoles de routage dans les RRC

Dans la section suivante nous donnons un survol de littérature de plusieurs travaux proposés pour résoudre le problème de routage dans les RRCs.

CAODV (Cognitive Ad-hoc On-demand Distance Vector) inspiré des protocoles classiques est proposé dans [99]. Ce protocole est basé sur la modification du protocole de routage AODV et il a été conçu conformément aux trois principes:

1. Eviter les régions d'activité des PU durant le processus de construction de route et de transfert de paquets.
2. Optimiser un trajet en sélectionnant le canal afin de réduire le coût d'une route.
3. Assurer une communication multicanal pour améliorer les performances globales du réseau.

Le protocole a été proposé pour supporter les RRC dynamiques avec des SU mobiles et des PU fixes. Les SU communiquent les uns avec les autres à travers les bandes de fréquences licenciées sans avoir besoin d'un CCC dédié. Durant la transmission de données des SU, si une activité de PU est détectée, le canal qui chevauche la fréquence de transmission de PU, ainsi que les canaux adjacents ne peuvent pas être utilisés par les SU qui se trouvent dans la portée de transmission de PU en raison d'effets d'interférence.

Pour établir une route pour la transmission de données, un nœud source commence le processus de découverte de route en diffusant un paquet de RREQ dans le réseau à travers chaque canal, qui n'interfère pas avec l'activité de PU, et en attendant la réception d'un paquet de RREP de la part d'un nœud de destination ou d'un nœud intermédiaire qui possède les informations valides de la route vers la destination.

A la différence de l'AODV, un SU est capable de stocker des différents chemins avec des différents canaux disponibles, qui peuvent être constitués par différents nœuds intermédiaires. En outre, dans le processus de la maintenance de route, le protocole applique deux types de paquet RERR:

1. Le paquet RERR utilisé pour faire face au changement de la topologie du réseau;
2. Le paquet PU- RERR utilisé pour la gestion de la présence d'une activité de PU. Pour le processus de transmission de données, chaque expéditeur de données choisit le chemin le plus court dans sa table de routage pour transmettre les données vers la destination.

MSCRIP (Multi-hop Single-transceiver Cognitive Radio Networks Routing Protocol) est un autre protocole basé sur le protocole réactif AODV qui a été proposé dans [100]. MSCRP n'a pas besoin d'un CCC car les messages sont échangés sans avoir besoin de ce dernier. Ce protocole est une amélioration de l'AODV pour gérer le problème de l'ensemble de canaux

disponibles (chaque nœud dans le réseau ne connaît pas l'ensemble des canaux disponibles des autres nœuds du réseau). Les auteurs ont introduit dans un premier temps un nouveau problème appelé « la surdité », cela est dû à la commutation de canaux des nœuds. Pour éviter le problème de la surdité, ils ont proposé que deux nœuds consécutifs dans un flux ne puissent pas être dans l'état de commutation simultanément. Communiquer avec un nœud de commutation est compliqué, donc le nœud de commutation utilise les messages LAISSER / JOINDRE pour informer ses voisins de son canal fonctionnel. MSCRCP suppose qu'un émetteur RC peut être à l'écoute sur une large portée de radio fréquence de spectre, mais il ne fonctionne que sur une portée limitée de RF et sur un seul canal à tout moment. Pour la découverte de route, le MSCRCP diffuse un message de RREQ sur tous les canaux. L'information de disponibilité des canaux portée par le message RREQ est transmise dans le processus de diffusion. Tous les nœuds intermédiaires joignent leurs états et l'ensemble des canaux disponible au message de RREQ. Comme les nœuds peuvent rester sur des canaux différents, donc la manière de diffusion est totalement différente à la diffusion originale utilisée dans AODV. Le chemin inverse au nœud de source est établi par la transmission de message RREP. Le nœud de destination reçoit les informations de canal et le nombre de nœuds sur chaque canal à la fin et attribue le canal à ce flux. Il encapsule les informations de canal attribué dans le message RREP.

SEARCH (*SpEctrum Aware Routing protocol for Cognitive ad-Hoc networks*) [101] est une extension du protocole de routage existant AODV. SEARCH est basé sur le routage géographique et il prend en compte la disponibilité des canaux pour la sélection du chemin afin d'échapper les régions d'activité des PU lors de l'établissement du chemin. Chaque nœud du réseau est équipé d'une seule émetteur-récepteur radio et il possède la connaissance de localisation. Les informations de localisation sont échangées entre les nœuds voisins périodiquement en utilisant les mises à jour de balise.

Dans le processus de construction de route, le nœud source et les nœuds intermédiaires transmettent un paquet de RREQ à ses voisins dans sa région de concentration sur chaque canal qui est non perturbée par l'activité des PU jusqu'à ce qu'il atteigne la destination. Ensuite, la destination combine tous les chemins sélectionnés sur les canaux individuels selon l'algorithme d'optimisation de canal-chemin avec l'objectif de minimiser le nombre de sauts, le délai de bout en bout et la commutation de canal. Puis, un paquet de RREP est transmis à la source le long de la trajectoire optimale. La transmission de données peut démarrer instantanément après que la source reçoive le message RREP. Après l'étape de construction initiale de la route, l'étape d'amélioration de la route sera activée pour optimiser le chemin actuel jusqu'à ce qu'aucune amélioration supplémentaire en termes de délai de bout en bout ne soit trouvée.

SPEAR (*SPEctrum-Aware Routing*) qui prend en charge la transmission à haut débit de paquet, en présence d'hétérogénéité du spectre est étudié dans [102]. Il atteint une performance persistante de bout en bout par l'intégration des approches basées sur les flux avec des approches basées sur les liens. Il attribue des différents canaux à des liens sur le même flux pour minimiser les interférences et intègre la découverte de spectre avec la découverte de route pour une utilisation optimale des canaux disponibles. Pour cela, chaque

nœud maintient une liste des canaux disponibles localement inoccupés. Ces canaux ne sont ni occupés par le PU, ni réservés par des voisins SU à proximité. Dans SPEAR, la découverte de route se fait par la diffusion d'un message de RREQ sur le CCC qui est identifié par les adresses IP de l'émetteur et du récepteur. Quand un nœud intermédiaire reçoit ce message, il vérifie s'il a un canal commun avec le nœud précédent, puis il ajoute son propre identifiant et l'ensemble des canaux disponibles avec le message reçu, puis le diffuse. Le nœud de destination choisit le meilleur chemin sur la base du débit maximal, la latence de bout en bout minimale (le minimum nombre de sauts) et la qualité du lien.

SAMER (*Spectrum Aware MESH Routing*) est proposé dans [103]. Il gère la diversité dans la disponibilité des canaux et l'équilibre entre la stabilité de route à long terme et à court terme. SAMER utilise les espaces blancs du spectre en transmettant les données sur la route qui a une disponibilité élevée de spectre. Ainsi la disponibilité du spectre est utilisée pour le calcul de la métrique de routage pour les routes à long-terme. Ce protocole réalise l'équilibre entre les routes à long et à court terme par la construction d'un maillage des routes de transmission. Ce maillage est périodiquement mis à jour et fournit un ensemble de routes candidates à la destination. Ainsi les paquets sont acheminés vers la destination à travers ce maillage. Les décisions de routage sont prises en collaboration avec la couche PHY et MAC.

SORP (*spectrum-aware on demand routing protocol*) est un protocole de routage réactif présenté dans [104]. La nature de ce protocole est due au manque des informations partagées. La technique proposée pour le calcul de la route est de sélectionner des bandes RF qui conviennent à chaque nœud le long de la route. La sélection de la bande RF est basée sur le minimum retard cumulatif. Le retard de commutation et le délai d'attente causée à la fois par le chemin lui-même et le flux d'intersection sont les paramètres d'estimation pour calculer le retard cumulatif de la route. Les auteurs ont modifié légèrement le protocole AODV pour incorporer l'incohérence de spectre opportuniste et ils ont fait quelques hypothèses pour leur technique de routage, comme suit:

- Pour former un CCC, chaque nœud contient une interface sans fil traditionnel en plus de la RC émetteur-récepteur.
- Chaque nœud est capable de fournir des informations de détection de spectre pour le protocole de routage à travers la conception inter-couche.

Pour la découverte de route, SORP hérite les procédures de base de l'AODV avec une RREQ modifiée. Dans SORP, l'information du spectre opportuniste est portée dans le message RREQ. Ainsi le nœud de destination reçoit la distribution du spectre opportuniste de tous les nœuds le long du chemin et il attribue une bande RF à sa CR émetteur-récepteur en conséquence. Cette information de bande RF est envoyé vers le nœud source ainsi que les nœuds intermédiaires par le message RREP.

STOD-RP (*Spectrum-Tree based On-Demand Routing Protocol*) est proposé dans [105] pour résoudre le problème de la collaboration entre la décision du spectre et de la sélection de la route en construisant un arbre de spectre dans chaque bande de fréquences. Chaque arbre de spectre choisit un seul nœud racine qui stocke les informations de routage à d'autres nœuds

dans l'arbre de spectre. STOD-RP est un protocole de routage hybride qui combine le routage proactif arborescent et la découverte à la demande de route qui est une extension de l'AODV. STOD-RP a introduit une nouvelle métrique cognitive de route qui a été définie en tenant compte des exigences de la qualité de service et de l'activité de PU et qui est basée sur la stabilité de la route et de la consommation des ressources. Dans le processus de découverte de route, le message de demande de route Spectrum RREQ et le message de réponse de route Spectrum RREP sont utilisés pour obtenir les routes de transmission de données. En outre, le protocole présente deux types de routage dans les RRC multi-hop: le routage intra-spectre qui fonctionne dans un seul arbre de spectre et le routage inter-spectre qui fonctionne dans plusieurs arbres de spectre.

UNITED (United nodes) est un protocole de routage basé sur le clustering qui a été proposé pour les réseaux ad hoc RC [106] où il n'y a pas de communication (c'est à dire pas de coopération) entre les réseaux primaires et secondaires. Ce protocole a pour but de maximiser le débit du réseau et minimiser le délai de bout-en-bout et il intègre le coût de la disponibilité du spectre et les mesures d'interférence dans l'algorithme de routage pour trouver les meilleures routes. « United nodes » fonctionne de façon autonome et distribuée à chaque nœud. Les nœuds SU s'organisent en plusieurs clusters selon un algorithme de clustering où les clusters s'adaptent dynamiquement par rapport à la disponibilité du spectre, et la grande mobilité des nœuds. En outre, le routage de données se fait après la création de ces clusters, en tenant compte à la fois les interférences et le coût de la disponibilité du spectre pour choisir les meilleures routes. La métrique d'interférence est définie en tenant compte des impacts des différences dans le ratio de perte de lien, le taux de transmission de lien, ainsi que l'interférence intra-système et inter-système afin d'éviter la région encombrée et la perte des liens. Quant au coût de la disponibilité du spectre, il est calculé sur la base de l'historique de l'utilisation du spectre. Quand un nœud de source a besoin de créer un chemin pour transmettre des données vers un nœud de destination, la source diffuse un paquet de RREQ et reçoit éventuellement en retour un paquet de RREP y compris les informations de spectre et de route de la part du nœud de destination.

Pour la stratégie de transmission de données, le nœud source peut transmettre des paquets de données directement vers le nœud de destination qui est situé dans le même cluster en utilisant sa table de routage pour le routage intra-cluster. Dans le cas où le nœud de destination se trouve dans un autre cluster, le nœud source transmet d'abord les données à son cluster-head via une route par défaut. Ensuite, le paquet de données est transféré au cluster-head de cluster de destination et enfin le paquet est transmis au nœud de destination.

SCRIP (Spectrum-aware Cluster-based routing protocol) qui était proposé dans [107], pour simplifier la collaboration entre l'allocation du spectre et la sélection de route en établissant des cluster dans chaque bande de fréquences. Le protocole proposé est une extension du protocole AODV, il utilise des messages de Spectrum RREQ et de Spectrum RREP pour découvrir les chemins entre les nœuds. Cet algorithme de routage combine le routage basé sur le clustering et la découverte de route réactive. La procédure de découverte de route est classée en deux situations: le routage intra-cluster qui se produit dans un seul cluster et le routage inter-cluster qui se produit dans plusieurs clusters. Cette méthode de

découverte de route peut également être utilisée pour récupérer un lien défaillant provoqué par la mobilité de nœud.

Le tableau 3.1 résume les avantages et les inconvénients des protocoles présentés ci-dessous.

Tableau 3.1 Avantages et inconvénients des protocoles de routages dans les RRC.

Protocoles de routage	Avantages	Inconvénients
CAODV	<p>Prend en considération la diversité du spectre, ce qui fournit la capacité d'adaptation à l'activité de PU.</p> <p>Limite le surcout de routage et la métrique de nombre de sauts n'est presque pas affectée par le nombre des PU.</p>	<p>La découverte de plusieurs routes pourrait résulter une consommation élevée de ressources.</p> <p>Le manque d'un algorithme de récupération de route efficace pour faire face à la rupture des liens la route lors de la transmission de données.</p>
MSCRP	<p>Résout le problème de la surdité.</p> <p>Améliore significativement le débit du réseau</p>	<p>Le surcout de diffusion de message RREQ sur tous les canaux disponibles au lieu un seul canal, ce surcout devient insupportable en cas de nombreux canaux disponibles sur chaque nœud du réseau.</p>
SEARCH	<p>Basé sur le routage géographique qui évite les régions d'activité de PU.</p> <p>Minimise le nombre de sauts, le délai de bout en bout et la commutation de canal.</p>	<p>Un grand nombre de paquets de contrôle sont produits qui peuvent conduire à la congestion du réseau.</p> <p>L'algorithme de maintenance de routes n'est pas pris en compte.</p>
SPEAR	<p>Une faible complexité de calcul et de communication.</p> <p>Une amélioration significative de débit.</p>	<p>Utilise une métrique de routage traditionnelle et des paramètres définis manuellement.</p>

<p>SAMER</p>	<p>Les changements de disponibilité du spectre sont adoptés dynamiquement par son maillage de transfert.</p> <p>Atteint un haut débit de bout en bout.</p>	<p>Le surcout de routage qui est produit par les messages échangés périodiquement dans le réseau et le calcul de la taille du paquet RREQ à chaque saut de la route.</p>
<p>SORP</p>	<p>Approprié pour une application sensible au retard cumulatif causé par les interférences ou la commutation de canal ou les</p> <p>Compléter la phrase.</p> <p>Minimise le retard cumulé.</p>	<p>Ne comprend pas l'évitement des régions d'activité de PU.</p>
<p>STOD-RP</p>	<p>Fournit une route proactive via le routage basé sur l'arbre.</p> <p>Réduit le délai de bout en bout et le surcout de contrôle.</p>	<p>Génère une grande consommation de ressources.</p> <p>Ne met pas à jour le nœud racine qui contient des informations de spectre dépassées.</p>
<p>UNITED</p>	<p>Utilise un algorithme de clustering qui est basé sur la localisation, l'efficacité de la communication, la connectivité du réseau et la disponibilité du spectre.</p> <p>Maximise le débit du réseau et minimise le délai de bout en bout.</p>	<p>Pas de communication (i.e. coopération) entre les utilisateurs primaires et secondaires.</p>
<p>SCRP</p>	<p>Simplifie la collaboration entre la décision du spectre et la sélection de la route et maintient la transmission des données dans le réseau.</p> <p>Minimise le délai de bout en bout et améliore le débit avec un surcout de contrôle réduit.</p>	<p>Le cluster-head peut consommer beaucoup d'énergie car il est responsable de gérer les tables de routage de plus d'un cluster dans le réseau.</p>

3.12 Conclusion

Le routage dans les RRC a attiré beaucoup d'attention dans ces dernières années et il a introduit des défis uniques par rapport au routage de données dans les réseaux sans fil traditionnels. Les RRC souffrent de plusieurs problèmes tels que la disponibilité dynamique du spectre, l'impact des interférences aux PU, le taux d'échec élevé de communications et la consommation d'énergie. Par conséquent, les RRC ont absolument besoin d'un protocole de routage qui est en mesure d'offrir non seulement une meilleure sélection de la route, mais aussi d'aborder les problèmes de routage liés à la nature de cet environnement cognitif.

Dans ce chapitre, nous avons exploré les protocoles de routage qui ont été proposés dans la littérature avec des scénarios de routage variés. Nous pouvons déduire que le protocole de routage à utiliser doit profiter de la maturité des protocoles de routage classiques en les adaptant aux besoins des RRC tout en incluant l'information de sélection du spectre du chemin dans l'algorithme de routage. L'utilisation des protocoles hiérarchiques représente une solution prometteuse pour le problème de routage dans les RRC. En effet, le clustering est la technique la plus utilisée dans le routage hiérarchique qui peut fournir des bénéfices importants. C'est pour cette raison que nous avons opté pour une solution hiérarchique, basée sur le clustering, appliquée sur un RRC.

Nous allons détailler dans le chapitre suivant notre première contribution sur la gestion de spectre ainsi que les différents résultats de simulation obtenus.

Chapitre 4 : Gestion de spectre en utilisant les systèmes multi-agents et le clustering

Sommaire

4.1 Introduction.....	Erreur ! Signet non défini.
4.2 Scénario considéré.....	Erreur ! Signet non défini.
4.3 Approche multi-agents basée sur l’algorithme de clustering K-means++.	Erreur ! Signet non défini.
4.3.1 Regroupement des nœuds en utilisant l’apprentissage.....	Erreur ! Signet non défini.
4.3.2 Architecture interne du cluster des SU	Erreur ! Signet non défini.
4.3.3 Architecture interne du cluster des PU	Erreur ! Signet non défini.
4.3.4 Modèle d’allocation de spectre	Erreur ! Signet non défini.
4.3.5 Algorithmes d’allocation de spectre	Erreur ! Signet non défini.
4.4 Approche globale pour l’allocation des bandes licenciées et non licenciées	Erreur ! Signet non défini
4.4.1 Coopération intra-cluster	Erreur ! Signet non défini.
4.4.2 Coopération inter-cluster	Erreur ! Signet non défini.
4.4.3 Exemple illustratif	Erreur ! Signet non défini.
4.5 Evaluation des performances.....	Erreur ! Signet non défini.
4.5.2 Comparaison entre les différents algorithmes proposés.....	Erreur ! Signet non défini.
4.5.3 Comparaison avec d’autres approches.....	Erreur ! Signet non défini.
4.6 Conclusion	Erreur ! Signet non défini.

4.1 Introduction

La radio cognitive est une nouvelle technologie d'accès et de partage de spectre qui nécessite des techniques intelligentes pour une gestion efficace du spectre dans un RRC. Dans le premier et le deuxième chapitre, nous avons présenté les aspects de la RC et nous avons détaillé les problématiques liées à la gestion de spectre ainsi que les techniques utilisées dans ce domaine. Ce chapitre sera dédié à la description de notre solution que nous avons proposée pour atteindre le but principal de la RC qui est l'utilisation efficace du spectre par une gestion intelligente. Dans un premier temps, nous exposerons le scénario que nous avons considéré et nous formulons nos problèmes qui motivent nos propositions. Puis, nous allons présenter notre approche coopérative basée sur le mécanisme de clustering pour l'allocation de spectre licencié, en détaillons la méthode de regroupement par apprentissage utilisée pour la formation des clusters et en expliquant l'architecture interne de ces clusters et les tâches affectées à chaque agent (PU et SU) dans le cluster. Nous allons montrer les différents algorithmes d'ordonnancement des requêtes que nous avons proposés de les intégrer dans le processus d'allocation du spectre pour une meilleure gestion de ce dernier. Ensuite, nous allons présenter une approche globale et qui prenne en compte l'allocation des bandes licenciées et non licenciées en même temps. Cette approche est basée aussi sur les SMA et le clustering en ajoutant de nouveaux agents dans les clusters des SU et en traitant le problème de collision dans les bandes non licenciées. Un exemple illustratif aura lieu dans cette section pour expliquer le fonctionnement de notre solution proposée pour l'allocation des bandes licenciées et non licenciées. Enfin, nous décrivons les résultats de l'évaluation des performances de notre approche par simulation.

4.2 Scénario considéré

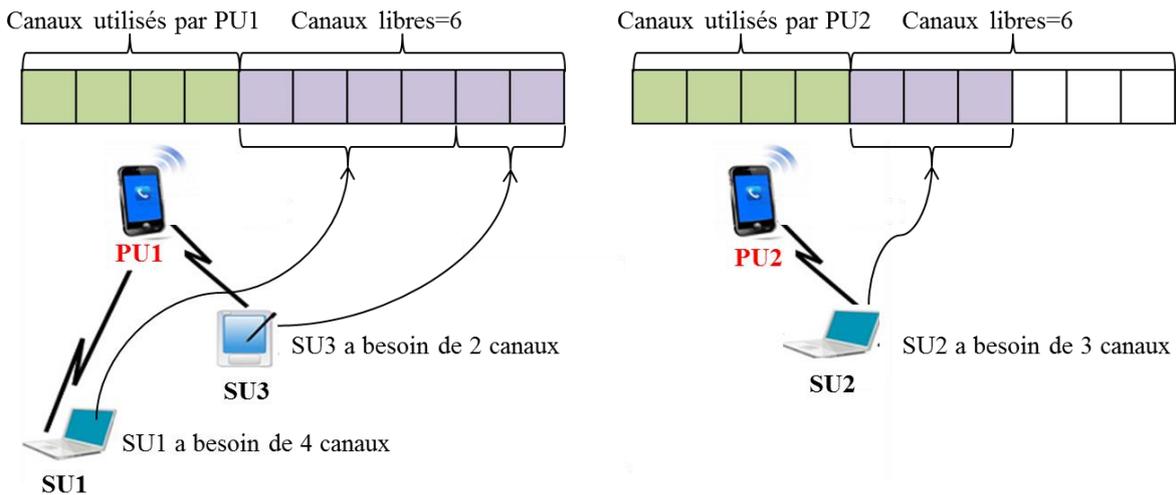


Figure 4.1 Le partage de spectre licencié.

Notre scénario proposé relève les défis de partage de spectre dans un réseau de radio cognitive déployé dans une zone donnée (un campus, un hôpital, un aéroport, ...ect.). Nous considérons que, dans une telle zone, il existe des SU et des PU qui sont connectés en mode « ad hoc » où l'ensemble de PU = $\{PU_1, PU_2, \dots, PU_n\}$ a la priorité d'utiliser une bande de fréquence donnée (station de télévision, fournisseur de téléphone cellulaire, les services d'urgence, ...etc.), et l'ensemble de SU = $\{SU_1, SU_2, \dots, SU_m\}$ peut accéder à ces bandes licenciées selon les besoins dans le cas où ces bandes ne sont pas utilisées par les PU comme il est illustré dans la figure 4.1. Nous considérons aussi que le RRC est dynamique car un SU peut se connecter ou se déconnecter du réseau à tout moment.

Nous pouvons formaliser le problème du scénario précédant comme suit :

L'accès au spectre: L'objectif principal est de satisfaire les demandes des SU et de se concentrer sur la maximisation de leur utilisation du spectre (S_{su}) en tenant compte de l'utilité globale du système.

Le temps de réponse: Le temps est un facteur important dans le processus de partage du spectre. Alors, nous formulons le temps de réponse pour le SU comme suit:

$$TR_{su_i} = TD_{su_i} + TH_{su_i} \quad \forall i \in M \quad (4.1)$$

$M = \{1, 2, \dots, m\}$ tel que m est le nombre des SU dans le réseau. TD_{su} est le temps d'attente d'un SU pour accéder au spectre disponible. TH_{su} est le temps d'utilisation de spectre souhaité par le SU. Cependant, nous visons à minimiser TD_{su} et à maximiser TH_{su} .

Le coût de communication: Le nombre de messages échangés dans le réseau par les SU pour une utilisation efficace du spectre détermine leur coût de communication (C_{su}) qui doit être minimisé pour ne pas saturer le réseau.

La consommation d'énergie : Les SU sont des nœuds mobiles donc ils sont susceptible de consommer beaucoup d'énergie afin d'accéder au spectre et accomplir leurs tâches. Donc la consommation d'énergie par un terminal SU (En_{su}) doit être minimisée.

Alors pour chaque SU, la formulation de notre problème de partage de spectre est la suivante:

$$\text{Maximiser } \sum_{i=1}^m (S_{su_i} + TH_{su_i}) \quad \forall i \in M \quad (4.2)$$

Sous réserve de :

$$\text{Minimiser } \sum_{i=1}^m (TD_{su_i} + C_{su_i} + En_{su_i}) \quad \forall i \in M \quad (4.3)$$

4.3 Approche multi-agents basée sur l'algorithme de clustering K-means++

Dans notre approche, nous proposons l'utilisation du clustering dans un contexte SMA pour une gestion efficace de spectre où un agent est déployé sur chaque dispositif secondaire et primaire. Ces agents coopèrent les uns avec les autres pour prendre une décision d'accès au spectre et ils sont regroupés en clusters possédant chacun un cluster-head (leader) comme illustré dans la figure 4.2. Le leader est choisi selon certains critères par exemple qu'il soit un

nœud statique ou qu'il a des ressources énergétiques supérieures aux autres nœuds du réseau...etc. En effet, le clustering peut permettre aux nœuds RC de coordonner leurs interactions, améliorer l'efficacité du réseau et augmenter sa durée de vie.

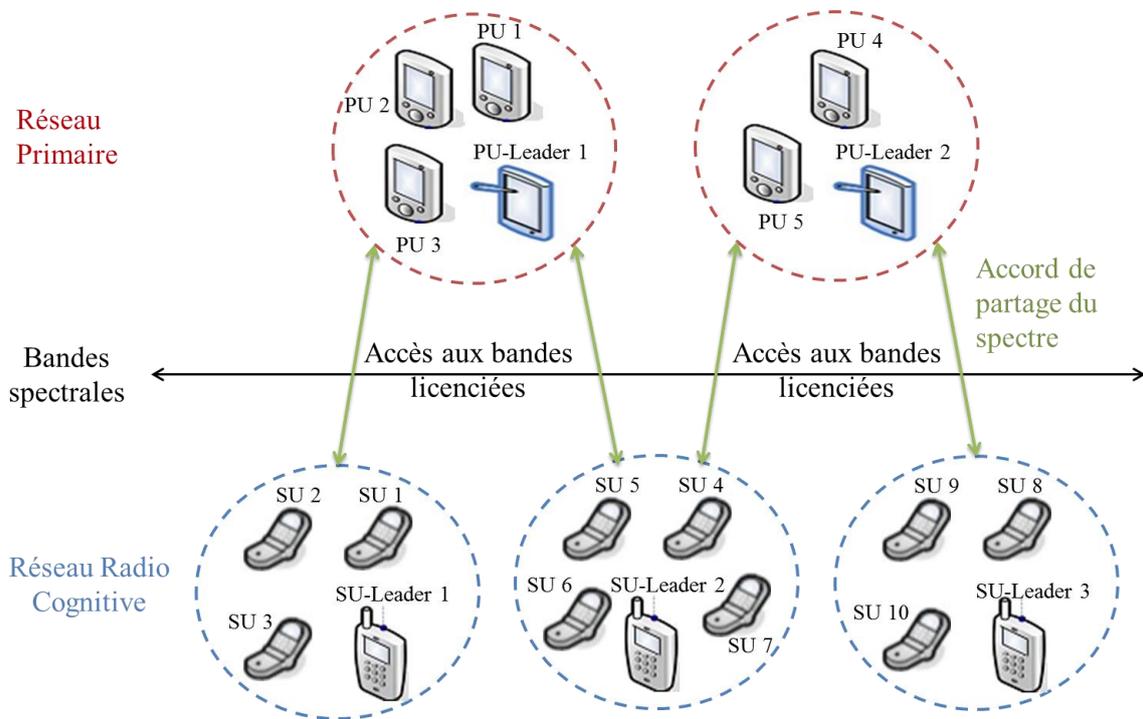


Figure 14.2 Allocation coopérative de spectre basée sur le clustering

Pour mieux comprendre notre scénario, il faut souligner que :

- Le PU est prêt à louer ses canaux disponibles aux SU pour maximiser son gain.
- Les SU n'accèdent pas aux canaux disponibles qu'après un accord de partage de la part du PU afin d'éviter les interférences.
- Le SU devrait libérer les canaux une fois le temps de partage convenu expire.
- Le PU peut partager ses canaux avec plusieurs SU simultanément.

Avant de détailler le fonctionnement du processus d'allocation du spectre, nous allons présenter la technique de regroupement par apprentissage utilisée dans notre approche.

4.3.1 Regroupement des nœuds en utilisant l'apprentissage

Le regroupement ou clustering est la solution clé pour notre approche. L'idée est donc de former des groupes (cluster) au sein du RRC de façon automatique. Cependant, nous allons opter pour l'algorithme des centres mobiles [108] (connu sous le nom de K-means) qui est probablement la technique la plus populaire pour le regroupement. Il existe plusieurs méthodes pour l'initialisation de cet algorithme, la méthode la plus connue est de définir un nombre fixe de clusters et choisir leurs centres d'une manière aléatoire, une chose qui peut générer de mauvais clusters. En effet, K-means++ [109] est apparue comme une amélioration de la phase d'initialisation des centres mobiles. Elle consiste à choisir au départ un seul centre mobile aléatoire puis sélectionner les autres centres en fonction d'une probabilité donnée de

sorte qu'ils sont éloignés les uns des autres autant que possible. Donc dans notre approche et pour la formation des clusters, nous allons utiliser l'algorithme K-means en combinaison avec l'algorithme d'initialisation K-means++ qui vont être présentés ci-dessous.

a) Algorithme K-means

Il s'agit d'implémenter l'algorithme des centres mobiles (K-means) [110] pour la classification automatique d'un ensemble de données (x_1, \dots, x_n) , K-means minimise le critère d'erreur (distorsion) suivant par rapport aux centres des classes $\Psi = (\mu_1, \dots, \mu_k)$ et les classes $\mathbf{z} = (z_1, \dots, z_n) : (\mathbf{z}, \Psi) :$

$$\Phi(\mu_1, \dots, \mu_k, \mathbf{z}) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n z_{ik} \|x_i - \mu_k\|^2 \quad (4.4)$$

qui correspond à la distance euclidienne totale entre chaque données x_i et le centre μ_{zi} dont elle est la plus proche au sens de la distance Euclidienne :

$$\|x_i - \mu_k\|^2 = d(x_i, \mu_k) = \sqrt{\sum_{j=1}^d (x_{ij} - \mu_{kj})^2} \quad (4.5)$$

Dans l'expression du critère Φ , z_{ik} est une variable binaire qui vaut 1 si la classe du *ième* exemple x_i est k et 0 sinon.

L'algorithme K-means est composé des trois étapes suivantes :

1. Etape d'initialisation : On initialise les centres des classes $(\mu_1^{(0)}, \dots, \mu_k^{(0)})$ pour donner le pas de départ de l'algorithme (par exemple on choisissant aléatoirement des centres "virtuels", ou K données parmi les données à traiter). Il s'agit donc de démarrer à l'itération $t = 0$ avec des valeurs initiales pour les paramètres du modèle $(\mu_1^{(0)}, \dots, \mu_k^{(0)})$.

2. Etape d'affectation (classification) : Chaque donnée est assignée à la classe du centre dont elle est la plus proche : $\forall i = 1, \dots, n$

$$z_{ik}^{(t)} = \begin{cases} 1 & \text{si } k = \arg \min_{z \in \{1, \dots, k\}} \|x_i - \mu_k\|^2 \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.6)$$

3. Etape de recalage des centres : le centre μ de chaque classe k est recalculé comme étant la moyenne arithmétique de toutes les données appartenant à cette classe (suite à l'étape d'affectation précédente) : $\forall k = 1, \dots, K$

$$\mu_k^{(t+1)} = \frac{\sum_{i=1}^n z_{ik}^{(t)} x_i}{\sum_{i=1}^n z_{ik}^{(t)}}, \quad (4.7)$$

t étant l'itération courante.

La convergence peut être considérée comme atteinte si la valeur relative au niveau de la distorsion Φ (1) devient inférieure à un seuil petit préfixé ou si un nombre maximum d'itérations préfixé a été atteint.

Une fois l'algorithme a convergé, on a donc une estimation des classes (z_1, \dots, z_n) et des centres (μ_1, \dots, μ_k) . On connaît donc l'appartenance z_i (la classe) de chaque donnée x_i à partir de z_{ik} .

b) Algorithme K-means++

Contrairement à l'algorithme K-means qui commence avec un ensemble arbitraire de centres de classe, l'algorithme K-means++ propose de choisir ces centres d'une façon spécifique [111]. Les étapes de cet algorithme sont comme suit :

1. Choisir un centre initial aléatoirement de l'ensemble de données X.
2. Choisir le prochain centre c_i tel que $c_i = x' \in X$ avec la probabilité $\frac{D(x')^2}{\sum_{x \in X} D(x)^2}$ la plus élevée.
 $D(x)$ est la plus courte distance entre le point de données x et le centre le plus proche qui est déjà choisi.
3. Répéter l'étape 2 jusqu'à la sélection de la totalité des k centres.
4. Procéder les mêmes étapes que l'algorithme standard K-means.

Dans ce qui suit, nous allons expliquer l'architecture interne du cluster des SU et du cluster des PU ainsi que le rôle de chaque agent dans le réseau.

4.3.2 Architecture interne du cluster des SU

Le cluster SU se compose des éléments suivants, comme indiqué dans la figure 4.3:

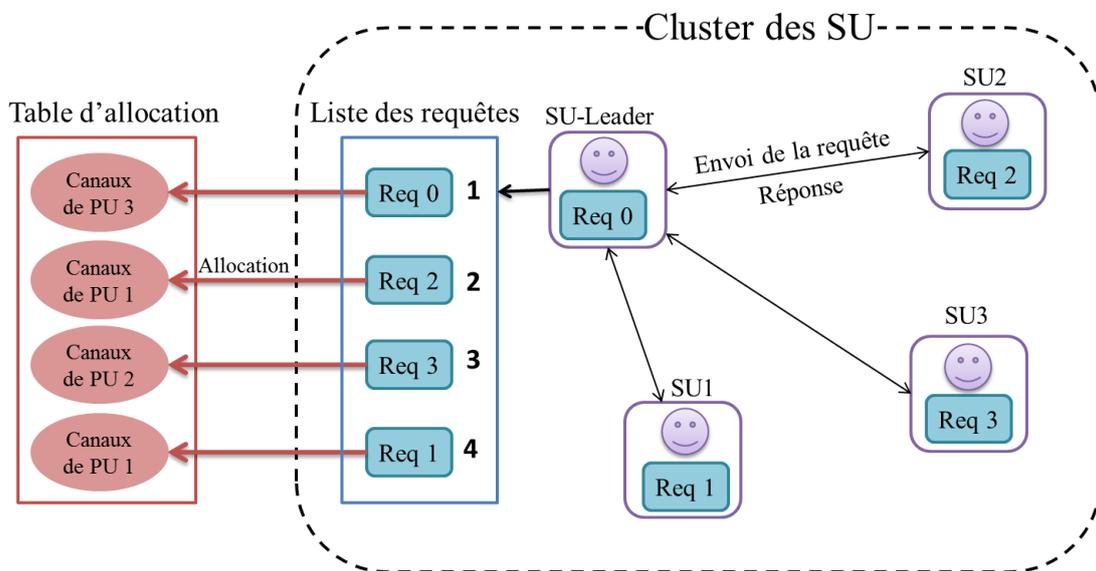


Figure 4.3 Cluster des SU.

- **Agent SU :** A l'arrivée d'un SU dans le cluster, son agent envoie une demande d'allocation de spectre au SU-leader. Nous supposons que la demande est sous la forme suivante : $RequestSU(SUID, s, t, p, e)$ (4.8)

SUID est l'identifiant du nœud SU, il est utilisé pour la communication avec le SU-leader, s est la quantité de spectre demandée par le SU pour son application, t est le temps souhaité pour l'utilisation du spectre, p est le prix que le SU est prêt à payer au PU et e est l'énergie du dispositif SU.

- **Agent SU-leader :** C'est le responsable du processus d'allocation de spectre; il insère chaque nouvelle demande d'allocation d'un SU dans une liste appelée «la liste des requêtes». Cet agent gère l'ordonnancement des requêtes (demandes) en utilisant une politique d'ordonnancement tel que FIFO (First Input First Output). La politique d'ordonnancement peut se baser également sur les informations obtenues de la requête telles que le temps de partage et l'énergie du nœud. L'agent SU-leader vérifie sa table d'allocation pour trouver la proposition appropriée à la demande du SU en tenant compte de la quantité de spectre, le temps de partage et le prix relatif. Une fois que l'allocation est confirmée, l'agent SU-leader supprime la demande de la liste des requêtes, si aucune proposition appropriée n'est trouvée, la demande sera exécutée plus tard.
- **Liste des requêtes :** Chaque SU-leader maintient une liste de requêtes pour organiser les requêtes d'allocation reçues des membres SU en fonction de leurs priorités.
- **Table d'allocation :** L'agent SU-leader maintient également une table d'allocation qui contient les informations sur l'état du spectre. Cette table est mise à jour par les propositions reçues des PU pour le partage des canaux disponibles.

4.3.3 Architecture interne du cluster des PU

Le cluster des PU se compose des éléments suivants, comme il est indiqué dans la figure 4.4.

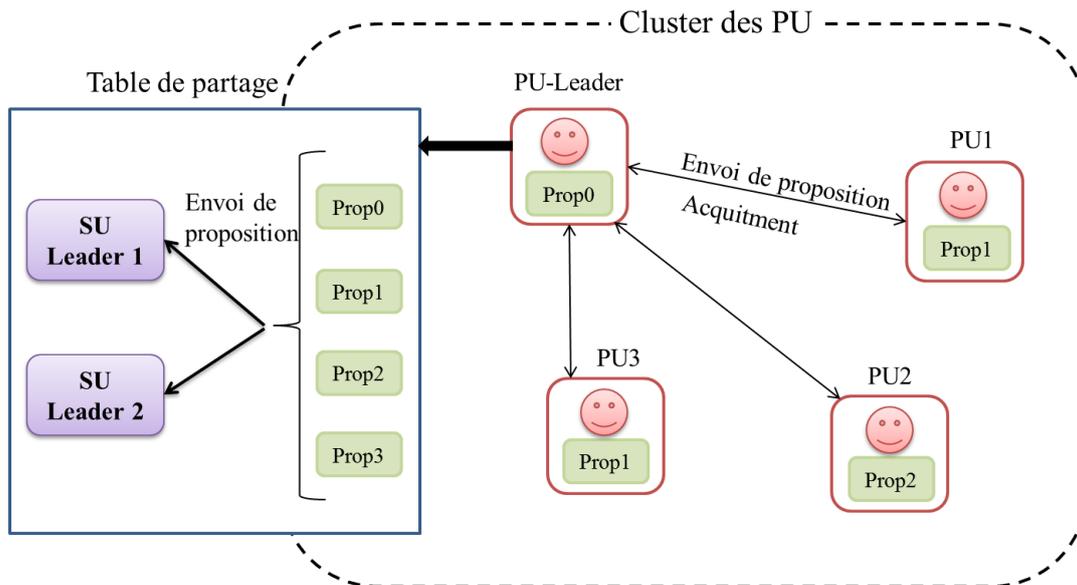


Figure 4.4 Cluster des PU.

- **Agent PU :** Il envoie sa proposition de partage de spectre au PU-leader. La proposition est toujours valable tant que le PU est présent dans le cluster ou jusqu'à ce qu'il décide d'annuler sa proposition. La proposition est sous la forme suivante :

$$RequestPU (PUIID, s, t, p) \quad (4.9)$$

PUIID est l'identifiant du nœud PU, s est la quantité de spectre que le PU est prêt à partager avec le SU (avec le SU ou les SU, il peut avoir 5 canaux par exemple, il donne 2 canaux à SU1 et 3 canaux à SU2), t est le temps de partage du spectre proposée et p est le prix attendu.

- **Agent PU-leader :** Il prend en charge l'organisation du processus de partage du spectre dans son cluster, il recueille les propositions reçues de ses membres PU dans la table de partage. En conséquence, l'agent PU-leader diffuse les propositions disponibles aux agents SU-leader intéressés.
- **Table de partage :** Elle contient toutes les propositions des PU et les informations sur les bandes de spectre déjà partagé avec les SU.

4.3.4 Modèle d'allocation de spectre

La figure 4.5 illustre le modèle d'allocation de notre approche proposée. Dans cette figure, un exemple d'un cluster des SU et un cluster des PU est représenté où les PU travaillent ensemble avec les SU afin de permettre le partage de spectre non utilisé. Les SU envoient leurs demandes d'allocation de spectre aux SU-leader pour les traiter. En revanche, les PU envoient leurs propositions de partage au PU-leader qui va l'envoyer à son tour aux SU-leaders. En outre, le SU-leader va ordonnancer les requêtes selon leurs priorités puis il va attribuer pour chaque demande la proposition appropriée. En fin il envoie un message d'acceptation de partage au PU-leader et ainsi l'utilisation de spectre peut commencer sur la base des paramètres convenus des deux côtés.

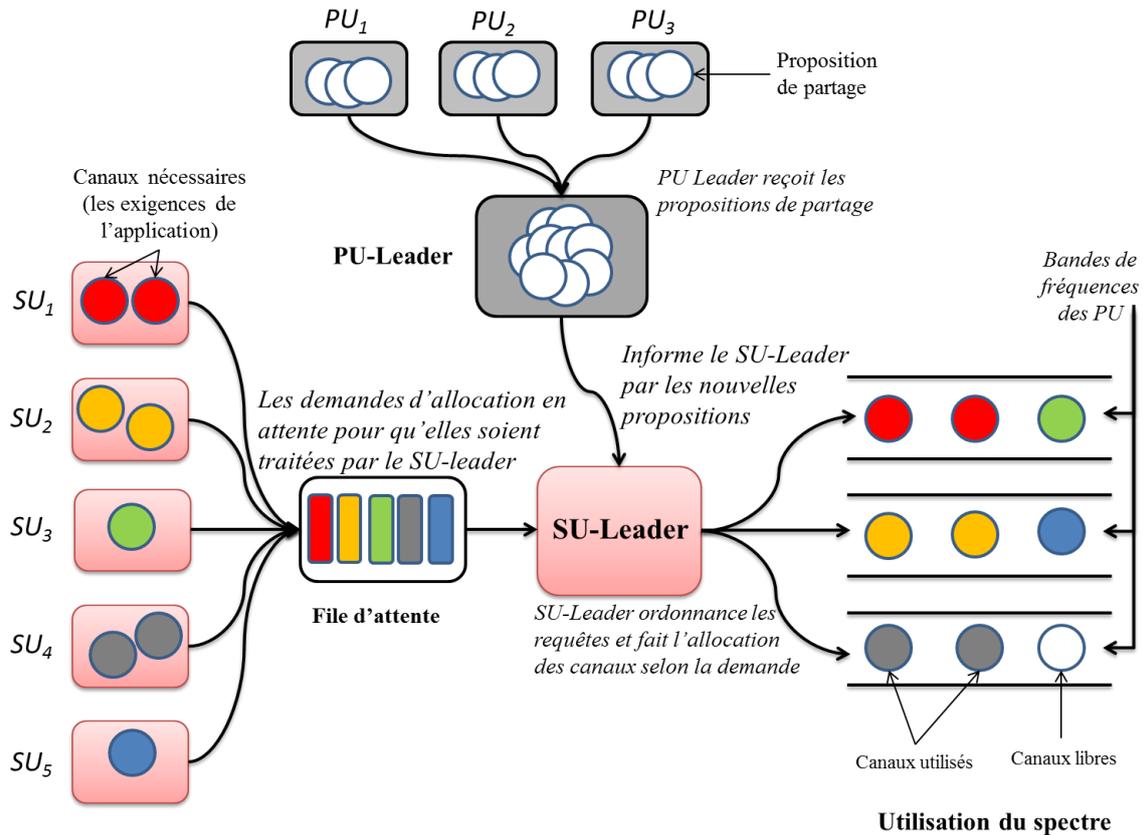


Figure 4.5 Modèle d'allocation de spectre.

4.3.5 Algorithmes d'allocation de spectre

Durant le processus d'allocation de spectre qui consiste à attribuer les canaux inutilisés au SU selon des conditions de partage convenues. Chaque agent SU-leader doit ordonner les requêtes d'allocation reçus de la part des SU membres en fonction de leurs priorités. FIFO (première requête reçue, première requête traité), le temps de partage désiré par le SU et l'énergie du nœud SU sont les trois principaux critères que nous proposons pour l'ordonnement des requêtes dans un cluster de RC. Il existe deux phases majeures dans le processus d'allocation du spectre, la phase d'ordonnement des requêtes et la phase de sélection des ressources relatives au spectre.

- **La phase d'ordonnement des requêtes :** Elle définit la priorité de chaque requête avec une valeur de rang et génère une liste de requête triée en fonction de leurs valeurs de rang.
- **La phase de sélection des canaux:** Elle choisit les canaux disponibles pour chaque demande de SU selon les conditions de partage indiquées dans l'équation (4.10), puis elle attribue à chaque SU la ressource appropriée selon sa priorité.

$$\text{Les conditions de partage} \stackrel{\forall SU, \forall PU}{\iff} \left\{ \begin{array}{l} s.\text{requeteSU} \leq s.\text{requetePU} \\ \text{et} \\ t.\text{requeteSU} \leq t.\text{requetePU} \\ \text{et} \\ p.\text{requeteSU} \geq p.\text{requetePU} \end{array} \right. \quad (4.10)$$

Dans notre contribution, l'algorithme d'allocation de spectre est basé sur les différents critères d'ordonnancement que nous avons proposé pour décider la priorité de chaque SU dans le cluster. Pour faciliter la lecture des algorithmes suivants, le tableau 4.1 décrit les différents acronymes que nous adoptons.

Tableau 4.1 Signification des acronymes.

Symbole	Définition
<i>TA</i>	Temps d'Arrivée du SU.
<i>SRE</i>	Satisfaction de Requête Estimée: la valeur de satisfaction est calculée en fonction des ressources disponibles en termes de nombre de canaux nécessaires, de prix et de temps de partage.
<i>TPE</i>	Temps de Partage Estimé pour le SU afin d'accomplir sa tâche
<i>EnE</i>	Énergie Estimée du SU depuis le début.
<i>TAE</i>	Temps d'Attente Estimé: c'est le temps durant lequel un SU peut attendre dans la file d'attente pour commencer le partage du spectre nécessaire.

a) Algorithme basé sur le FIFO

Cet algorithme ordonnance l'ensemble des requêtes des SU d'une manière itérative (voir algorithme 4.1). Pour chaque itération, il obtient le TA pour chaque requête. Ensuite, la requête du SU qui a la valeur minimale de TA sera classée dans la première position dans la liste des requêtes et elle sera supprimée de la liste des requêtes disponibles qui ne sont pas encore triées. D'une manière itérative, nous consultons la liste des ressources disponibles pour trouver les propositions qui peuvent satisfaire la requête du SU en calculant la SRE pour choisir les canaux appropriés à la demande du SU (la ressource avec un SRE maximal).

Algorithme 4.1 Allocation de spectre basée sur le FIFO

```

1   $Req\_Dispo \leftarrow$  récupérer les requêtes disponibles des SU dans le cluster;
2  tant que  $\exists Req \in Req\_Dispo$  qui n'est pas ordonnancée faire
3  |    $Recuperer\_TA(Req)$ ;
4  fintq
5  pour chaque  $Req \in Req\_Dispo$  faire
6  |    $Req\_Ordonnance \leftarrow$  Ajouter  $Min_{Req \in Req\_Dispo} TA(Req)$ ; //Min: récupérer la requête
       avec le minimum TA parmi les requêtes disponibles;
7  |   Supprimer  $Req$  de  $Req\_Dispo$ ;
8  finprch
9  pour chaque  $Req \in Req\_Ordonnance$  faire
10 |    $Res\_Dispo \leftarrow$  récupérer les ressources disponible des clusters voisins des PU ;
11 |   pour chaque  $R \in Res\_Dispo$  faire
12 |   |   Calculer  $SRE(Req, R)$ ; //choisir la meilleure ressource pour la requête;
13 |   finprch
14 |    $Res \leftarrow Max_{r \in Res\_Dispo} SRE(Req, R)$ ; //Max: récupérer la ressource avec le maximum
       SRE parmi les ressources disponibles;
15 |   Attribuer  $Res$  à  $Req$ ;
16 |   Supprimer  $Res$  de  $Avail\_Res$ ;
17 |   Supprimer  $Req$  de  $Avail\_Req$ ;
18 finprch

```

b) Algorithme basé sur le temps de partage

Cet algorithme ordonnance les requêtes des SU selon le TPE d'une manière itérative (voir l'algorithme 4.2). La requête du SU avec la valeur minimale de TPE sera classée dans la première position dans la liste des requêtes et elle sera supprimée de la liste des requêtes disponibles qui ne sont pas encore triées. Comme le premier algorithme, nous consultons d'une manière itérative la liste des ressources disponibles pour trouver les propositions qui peuvent satisfaire la requête du SU en calculant le SRE pour choisir la ressource du spectre appropriée à la demande du SU (la ressource avec un SRE maximal).

Algorithme 4.2 Allocation de spectre basée sur le temps de partage

```

1   $Req\_Dispo \leftarrow$  récupérer les requêtes disponibles des SU dans le cluster;
2  tant que  $\exists Req \in Req\_Dispo$  qui n'est pas ordonnancée faire
3  |   $Recuperer_{TPE}(Req)$ ;
4  fintq
5  pour chaque  $Req \in Req\_Dispo$  faire
6  |   $Req\_Ordonnace \leftarrow$  Ajouter  $Min_{Req \in Req\_Dispo} TPE(Req)$ ; //Min: récupérer la requête
   |  avec le minimum TPE parmi les requêtes disponibles;
7  |  Supprimer  $Req$  de  $Req\_Dispo$ ;
8  finprch
9  pour chaque  $Req \in Req\_Ordonnace$  faire
10 |   $Res\_Dispo \leftarrow$  récupérer les ressources disponible des clusters voisins des PU ;
11 |  pour chaque  $R \in Res\_Dispo$  faire
12 |  |  Calculer  $SRE(Req, R)$ ; //choisir la meilleure ressource pour la requête;
13 |  finprch
14 |   $Res \leftarrow Max_{r \in Res\_Dispo} SRE(Req, R)$ ; //Max: récupérer la ressource avec le maximum
   |  SRE parmi les ressources disponibles;
15 |  Attribuer  $Res$  à  $Req$ ;
16 |  Supprimer  $Res$  de  $Avail\_Res$ ;
17 |  Supprimer  $Req$  de  $Avail\_Req$ ;
18 finprch
    
```

c) Algorithme basé sur l'énergie

L'algorithme basé sur l'énergie fonctionne d'une façon similaire aux algorithmes précédents sauf que celui-là définit la priorité des SU selon la valeur minimale de EnE obtenue de chaque SU (voir l'algorithme 4.3).

Algorithme 4.3 L'allocation du spectre basée sur l'énergie

```

1   $Req\_Dispo \leftarrow$  récupérer les requêtes disponibles des SU dans le cluster;
2  tant que  $\exists Req \in Req\_Dispo$  qui n'est pas ordonnancée faire
3  |   $Recuperer\_EnE(Req)$ ;
4  fintq
5  pour chaque  $Req \in Req\_Dispo$  faire
6  |   $Req\_Ordonnace \leftarrow$  Ajouter  $Min_{Req \in Req\_Dispo} EnE(Req)$ ; //Min: récupérer la requête
   |  avec le minimum TPE parmi les requêtes disponibles;
7  |  Supprimer  $Req$  de  $Req\_Dispo$ ;
8  finprch
9  pour chaque  $Req \in Req\_Ordonnace$  faire
10 |   $Res\_Dispo \leftarrow$  récupérer les ressources disponible des clusters voisins des PU ;
11 |  pour chaque  $R \in Res\_Dispo$  faire
12 |  |  Calculer  $SRE(Req, R)$ ; //choisir la meilleure ressource pour la requête;
13 |  finprch
14 |   $Res \leftarrow Max_{r \in Res\_Dispo} SRE(Req, R)$ ; //Max: récupérer la ressource avec le maximum
   |  SRE parmi les ressources disponibles;
15 |  Attribuer  $Res$  à  $Req$ ;
16 |  Supprimer  $Res$  de  $Avail\_Res$ ;
17 |  Supprimer  $Req$  de  $Avail\_Req$ ;
18 finprch
    
```

d) Algorithme hybride

Cet algorithme ordonnance les requêtes selon la valeur de TAE. Le TAE est calculé en fonction de TPE et de EnE (voir l'algorithme 4.4). Pour le calcul de TAE, nous devons estimer l'énergie dépensée durant le temps de partage et la soustraire de l'énergie initiale (EnE). Le SU qui aura le minimum de TAE sera servi en premier en lui attribuant la ressource avec le maximum SRE pour accomplir sa tâche le plutôt possible.

Algorithme 4.4 Allocation de spectre basée sur une politique hybride.

```

1  Req_Dispo ← récupérer les requêtes disponibles des SU dans le cluster;
2  tant que  $\exists Req \in Req\_Dispo$  qui n'est pas ordonnancée faire
3  |   Recuperer_TPE(Req);
4  |   Recuperer_EnE(Req);
5  |   Calculer TAE(Req); // Cette valeur est calculée en fonction de TPE et EnE;
6  fin tq
7  pour chaque Req  $\in Req\_Dispo$  faire
8  |   Req_Ordonnace ← Ajouter  $Min_{Req \in Req\_Dispo} TAE(Req)$ ; //Min: récupérer la requête
   |   avec le minimum TAE parmi les reuqêtes disponibles;
9  |   Supprimer Req de Req_Dispo;
10 fin prch
11 pour chaque Req  $\in Req\_Ordonnace$  faire
12 |   Res_Dispo ← récupérer les ressources disponible des clusters voisins des PU ;
13 |   pour chaque R  $\in Res\_Dispo$  faire
14 |   |   Calculer SRE(Req, R); //choisir la meilleure ressource pour la requête;
15 |   fin prch
16 |   Res ←  $Max_{r \in Res\_Dispo} SRE(Req, R)$ ; //Max: récupérer la ressource avec le maximum
   |   SRE parmi les ressources disponibles;
17 |   Attribuer Res à Req;
18 |   Supprimer Res de Avail_Res;
19 |   Supprimer Req de Avail_Req;
20 fin prch

```

e) Synthèse sur les algorithmes proposés

L'algorithme FIFO est un algorithme classique qui est pratique et simple pour l'ordonnancement des requêtes. Toutefois, il peut mettre les autres SU en attente dans le cas où le premier SU servi utilise pour une longue durée les canaux disponibles. L'algorithme basé sur le temps de partage de spectre nous semble primordial dans le contexte de la RC où chaque SU doit estimer le temps nécessaire pour accomplir sa tâche. Le but principal de cet algorithme est de traiter le maximum de requêtes dans une période donnée. Si nous supposons qu'un SU a besoin de 100 unités de temps pour accomplir sa tâche et qu'il existe des SU qui ont besoin seulement de 10 unités de temps, alors selon cet algorithme plusieurs requêtes peuvent être traitées dans une période de 100 unités. Il faut noter que cet algorithme est très intéressant si les PU proposent le partage d'un nombre important de canaux. Par ailleurs, ces deux premiers algorithmes peuvent être gourmands au niveau de l'énergie consommée par les nœuds SU en attendant leur tour dans la file d'attente. A cet effet, nous avons pensé à se baser sur l'énergie qui est un critère important pour un algorithme d'allocation de spectre dans un RRC où les nœuds sont mobiles et souhaitent conserver leurs énergies le plus longtemps

possible. Ainsi, les requêtes sont ordonnancées selon le niveau de la batterie de leurs dispositifs pour que les nœuds qui sont faibles en termes d'énergie seront les prioritaires à exploiter le spectre, Mais se baser sur l'énergie initiale du nœud n'est pas la solution optimale car les nœuds qui ont une grande énergie sont les derniers qui vont être servi et leur énergie devient insuffisante pour le partage du spectre jusqu'à la fin de l'application. Pour résoudre ce problème, nous avons proposé un quatrième algorithme basé sur le temps de partage et sur l'énergie. L'algorithme estime le temps d'attente d'un SU en calculant l'énergie restante (soustraire le temps de partage de l'énergie initiale) que chaque nœud SU peut la consommer dans la file d'attente afin de garantir que le maximum des SU vont terminer leur tâche avec succès.

4.4 Approche globale pour l'allocation des bandes licenciées et non licenciées

Cette approche est une amélioration de l'approche précédente qui prend en charge seulement l'allocation des bandes licenciées du spectre. Donc pour maximiser l'utilisation du spectre, nous allons tirer profit également des bandes non licenciées existantes (voir la section 1.5.2). Nous prenons en considération le même scénario de l'approche précédente basée sur les SMA où les clusters des PU coopèrent avec les clusters des SU pour le partage des bandes licenciées et les clusters des SU coopèrent aussi entre eux pour le partage des bandes non licenciées comme il est indiqué dans la figure 4.6. En effet, au cas où les bandes licenciées ne sont plus disponibles ou le SU ne possède pas le prix demandé par le PU, nous allons permettre aux SU d'utiliser les bandes non licenciées existantes dans le spectre pour ne pas perdre du temps en attendant la libération des bandes licenciées surtout que l'accès à ce spectre est gratuit (ces bandes n'ont pas de propriétaires). Dans l'algorithme que nous avons proposé (algorithme 4.5), nous favorisons le partage des ressources licenciées tant qu'elles sont disponibles même s'il y en a suffisamment de bandes non licenciées dans le spectre afin de garantir que les SU terminent leurs applications avec succès puisque les PU leurs autorisent le partage des canaux pendant une période convenue.

Algorithme 4.5 Allocation du spectre licencié et non licencié

```

1 Insérer chaque nouvelle requete d'allocation  $Req_i$  dans la liste d'allocation  $L$ ;
2 Mettre à jour la table d'allocation  $Tab$  par les informations de détection;
3 pour tout  $Req_i$  faire
4   Récupérer les informations de  $Req_i$ ; //Les informations sur le nombre des canaux, le
   temps de partage et le prix désirés;
5   ChercherTab ( $BandesLicenciees$ ); //Consulter la table d'allocation pour vérifier s'il
   existe des canaux appropriés à la demande;
6   si  $\exists$   $BandesLicenciees = 1$  alors /* Les bandes licenciées sont disponibles */
7     Demande de partage ( $Req_i$ );
8     //le PU leader vérifie si les canaux demandés sont toujours valables;
9     Attendre ( $Confirmation = 1$ );
10    si  $Confirmation$  alors /* Demande acceptée */
11      Partager ( $BandesLicenciees$ );
12      Supprimer ( $Req_i$ ) //Supprimer la requête de la liste d'allocation;
13    finsi
14  finsi
15  si  $BnadesLicenciees=0$  Ou  $Confirmation=0$  alors /* requête échouée pour le
   partage des bandes licenciées */
16    ChercherTab ( $BandesNonLicenciees$ );
17    si  $\exists$   $BandesNonLicenciees=1$  alors
18      Utiliser( $BandesNonLicenciees$ );
19      Supprimer ( $Req_i$ );
20    finsi
21  finsi
22 finpr

```

Dans le spectre non licencié, tous les SU ont le même droit d'accès [112] ce qui peut générer beaucoup d'interférences et collisions entre eux. Ainsi, pour résoudre ce problème et organiser l'accès au spectre non licencié, nous avons proposé la coopération entre les clusters des SU du même RRC. Comme il est montré dans la figure 4.6, chaque cluster va échanger des messages sur l'état du spectre avec les clusters voisins pour qu'ils se mettent d'accord sur l'allocation du spectre non licencié. Nous allons expliquer dans ce qui suit l'intérêt de la coopération intra-cluster et inter-cluster pour l'allocation du spectre.

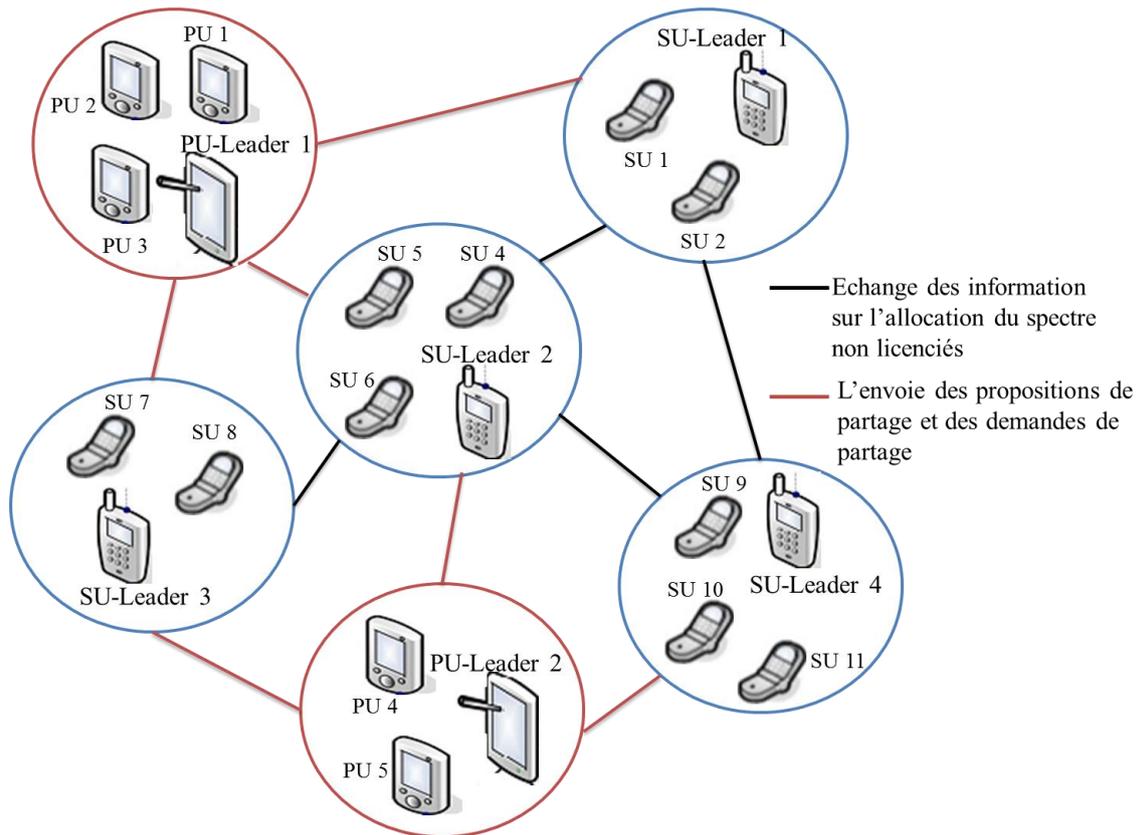


Figure 4.6 Allocation coopérative du spectre non licencié.

4.4.1 Coopération intra-cluster

L'allocation du spectre demandé par l'agent SU se fait toujours au niveau de l'agent SU-leader. Cependant, la détection des bandes non licenciées est indispensable pour alimenter la table d'allocation afin de servir les requêtes des SU membres (voir figure 4.7). Pour faciliter les tâches de l'agent SU-leader, nous avons proposé qu'il va lancer deux autres agents assistants, l'un pour la détection du spectre et l'autre pour l'allocation du spectre comme il est illustré dans la figure 4.8.

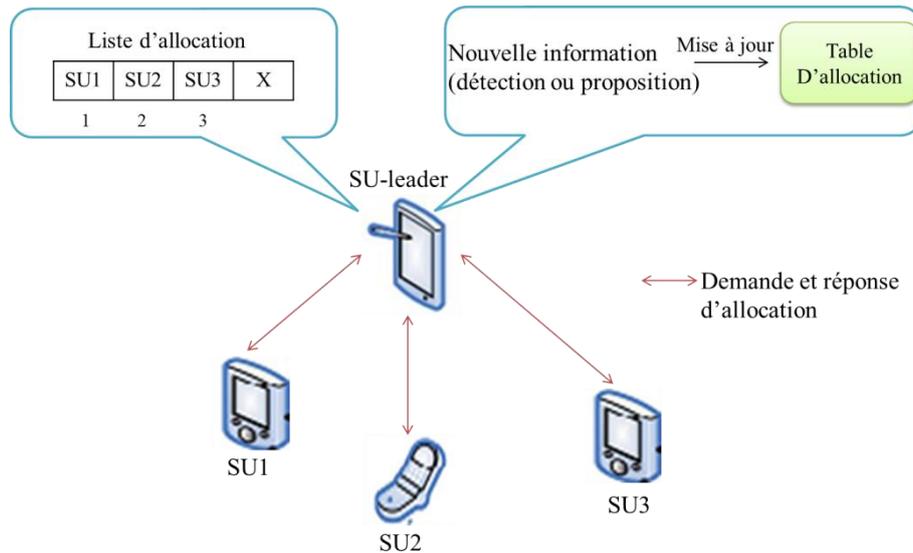


Figure 4.7 Fonctionnement de l'agent SU-leader.

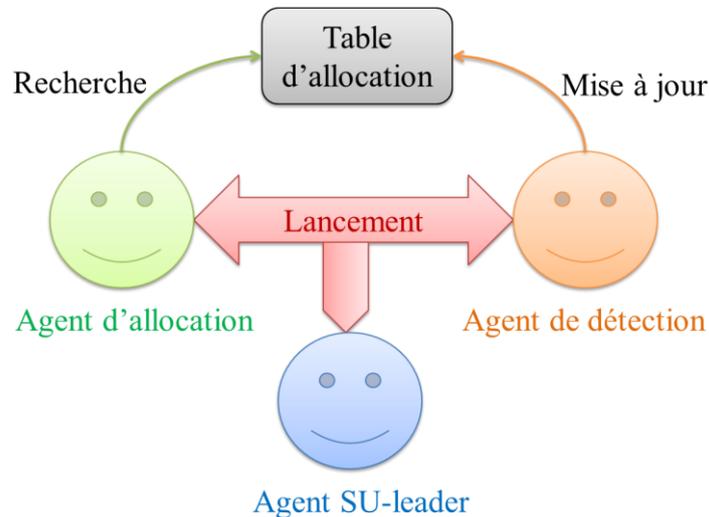


Figure 4.8 Lancement des agents assistants.

- **Agent de détection**

Une fois l'agent de détection est lancé, il commence la détection des canaux du spectre non licencié et il met à jour la table d'allocation de son cluster de manière périodique et adaptative (figure 4.9). Cette période varie en fonction du nombre de demandes, si le nombre de demandes est grand dans le cluster alors la période entre une détection et une autre sera courte, sinon la période devient plus grande pour conserver l'énergie du dispositif.

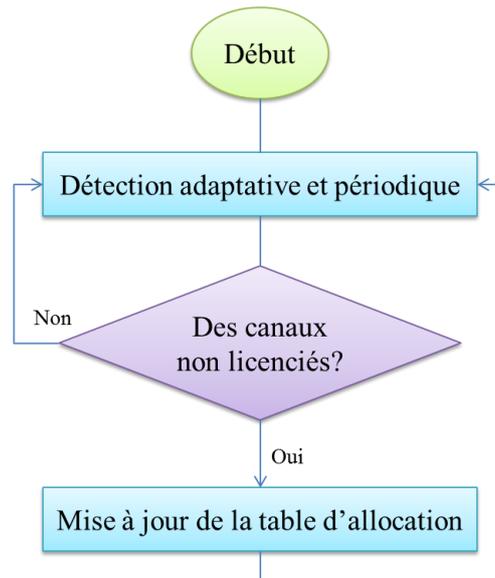


Figure 4.9 Fonctionnement de l'agent de détection.

- **Agent d'allocation**

Il devient le responsable du processus d'allocation de spectre pour les demandes des SU. Donc, il va traiter les requêtes selon les algorithmes d'allocation proposés dans la section 4.3.5 comme il peut accéder à la table d'allocation pour choisir les canaux appropriés (avec ou sans licence) et la mettre à jour quand ces canaux ne seront plus disponibles.

Le diagramme de séquence ci-dessous explique les liens entre les différents agents du même cluster. Au début, chaque agent SU envoie sa demande d'allocation à l'agent SU-leader sous forme de requête qui contient toutes les informations nécessaires. L'agent d'allocation reçoit une requête d'allocation de la part de son leader pour traiter ces demandes et choisir les canaux appropriés selon les informations de la requête et la disponibilité des canaux dans la table d'allocation. Les canaux qui ont été choisis peuvent être licenciés si les propositions conviennent aux demandes des SU sinon les canaux non licenciés détectés vont être attribués à leurs SU. Finalement, le SU-leader répond aux demandes reçues de partage et les SU commencent le partage du spectre pour accomplir leurs tâches.

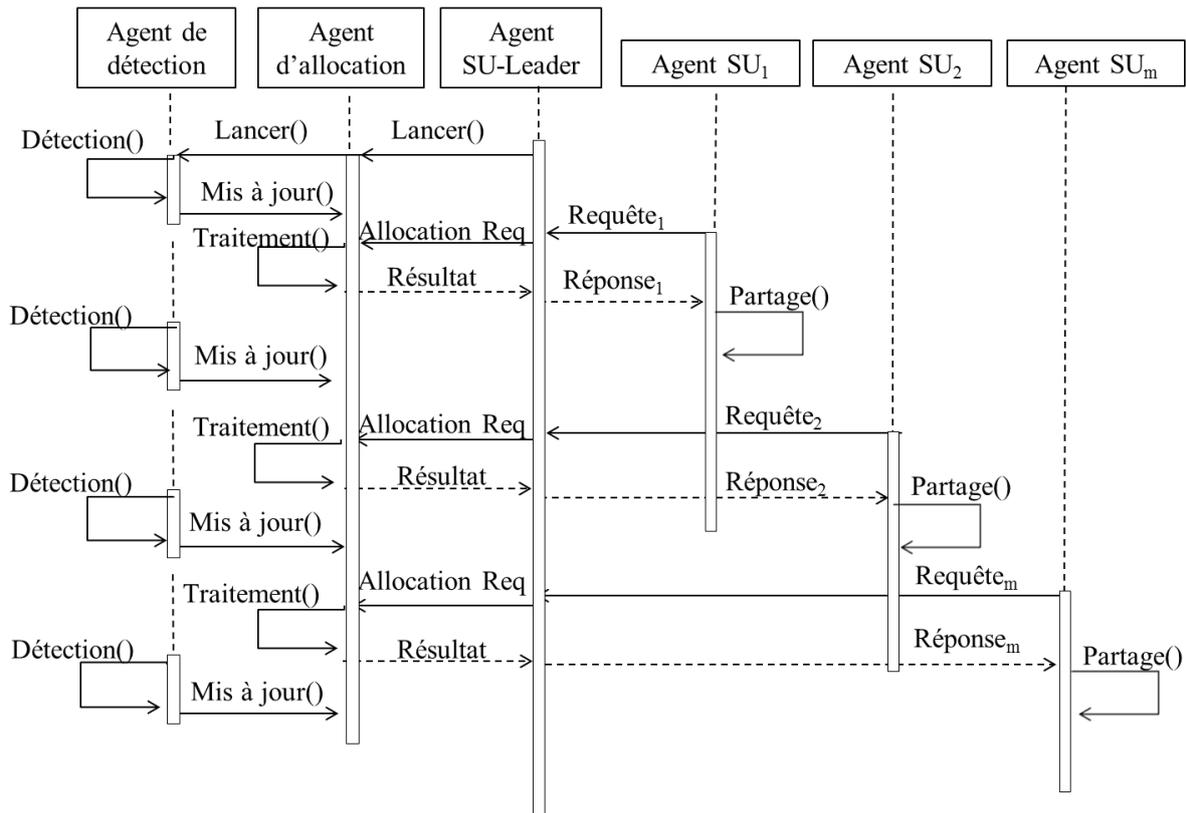


Figure 4.10 Fonctionnement des agents dans le cluster des SU.

4.4.2 Coopération inter-cluster

Dans la figure 4.6, nous distinguons deux types de coopération inter-cluster : 1) Une coopération entre les clusters des PU et les clusters des SU pour le partage des canaux licenciés ; 2) Une coopération entre les clusters des SU pour le partage des canaux non licenciés. Dans ce dernier type de coopération, l'agent SU-leader est censé vérifier la disponibilité du canal non licencié au moment de l'allocation, car il arrive que plusieurs agents d'allocation veuillent partager le même canal en même temps. Dans ce cas, l'agent SU-leader envoie une demande de partage aux autres agents SU-leader, cette demande contient les informations nécessaires telles que le canal en question et l'estimation de l'énergie restante du SU. Les agents SU-leader qui ne sont pas intéressés par ce canal non licencié vont lui répondre par un message d'autorisation, sinon les agents intéressés vont faire une comparaison entre l'énergie restante de leurs SU, le SU qui a le minimum d'énergie aura l'autorisation du partage. Les agents de détection du même réseau doivent coopérer aussi entre eux. Chaque agent de détection échange des informations sur les bandes non licenciées détectées car il se peut qu'un agent de détection trouve des bandes qui ne vont pas être exploitées dans son cluster tandis que les autres clusters ont besoin de ces bandes.

4.4.3 Exemple illustratif

Pour mieux comprendre notre proposition, nous présentons un exemple de deux clusters de SU et un cluster de PU qui coexistent dans une zone donnée. Les PU proposent de partager leurs canaux inutilisés avec les SU en spécifiant le nombre de canaux et le prix unitaire d'un canal. Le temps de partage n'est pas mentionné dans le tableau 4.2 car il est considéré dans notre exemple comme suffisant pour toutes les demandes des SU. Nous supposons également que 10 canaux non licenciés sont détectés dans le spectre. Chaque SU envoie sa demande d'allocation à son agent SU-leader (voir le tableau 4.3) pour lui trouver les canaux appropriés à son besoin.

Tableau 4.2 Propositions des PU

PUID	Nombre des canaux proposés	Prix demandé
PU ₁	6	2
PU ₂	7	3
PU ₃	8	2

Nous supposons que SU₁ et SU₅ sont les leaders de C₁ et C₂ respectivement. Ces derniers travaillent simultanément d'une manière coopérative pour éviter les collisions entre les SU.

Tableau 4.3 Demandes des SU

ID de cluster	SUID	Nombre de canaux demandés	Prix proposé
C ₁	SU ₁	6	3
	SU ₂	3	4
	SU ₃	5	2
	SU ₄	4	1
C ₂	SU ₅	5	2
	SU ₆	4	3
	SU ₇	3	2

Au départ, les agents SU-leader commencent à recevoir les propositions des PU pour le partage des canaux licenciés et en parallèle les canaux non licenciés sont détectés par leurs agents de détection. Nous supposons que l'agent d'allocation va traiter les requêtes des SU

selon leur ordre d'arrivé (FIFO). Cependant, SU_1 et SU_5 ont besoin de 6 et 5 canaux respectivement, donc les propositions des PU_1 et PU_3 sont appropriées à leurs demandes respectivement puisque les SU possèdent le prix des canaux demandés. Comme indiqué précédemment, le PU peut partager ses canaux inutilisés avec plusieurs SU simultanément donc SU_2 et SU_6 partagent les canaux de PU_2 puisqu'ils sont suffisants pour les deux demandes. Dans C_1 , les canaux non licenciés sont alloués aux SU_3 et SU_4 car il ne reste pas suffisamment de canaux licenciés pour la demande de SU_3 et SU_4 qui ne possèdent pas le prix des canaux licenciés. Par ailleurs, dans C_2 , le nombre des canaux licenciés restants de PU_3 sont suffisant pour satisfaire SU_7 (voir tableau 4.4).

Tableau 4.4 Allocation de spectre.

Spectre à partager	Occupé par
Canaux licenciés de PU_1	SU_1
Canaux licenciés de PU_2	SU_2, SU_6
Canaux licenciés de PU_2	SU_5, SU_7
Canaux licenciés	SU_3, SU_7

4.5 Evaluation des performances

Dans cette section, nous présentons différents résultats numériques pour évaluer le fonctionnement de l'approche proposée (l'approche globale). Nous effectuons nos simulations sous l'hypothèse d'un réseau de radio cognitive où plusieurs ensembles de SU et PU sont regroupés selon l'algorithme K-means++.

Considérant la capacité d'une seule machine, le nombre maximal d'utilisateurs primaires et secondaires est de 130 au total dont le nombre maximal des SU est 100 et le nombre maximal des PU est 30. En outre, les symboles λ_p et λ_s désignent le nombre maximal des PU et SU par cluster qui est 5 et 10 respectivement. Dans notre simulation, nous considérons pour chaque prochaine ronde de λ_p il y a une addition d'une bande de fréquence et nous avons mis la bande passante de chaque partie du spectre à 3.75MHz [113]. Nous supposons que chaque bande supporte 60 canaux, ces derniers sont destinés pour satisfaire 5 PU car chaque PU dispose de 10 canaux et les canaux restants sont les canaux sans licence. Selon [114], nous avons fixé l'utilisation moyenne du spectre pour chaque PU à 40% et nous supposons que chaque PU a des portions de spectre inutilisées.

Il faut noter que nous avons choisi l'algorithme d'allocation hybride pour effectuer toutes nos simulations qui ont été réalisées en Java Application Development Environment (JADE) [115]. Chaque simulation est réalisée pour un total de 10 exécutions et les valeurs moyennes sont prises pour tracer les graphiques. Le tableau 4.5 résume les différents paramètres de simulations utilisés.

Tableau 4.5 Paramètres de simulation

Paramètre	Valeur
Nombre maximale de SU (N_S max)	100
Nombre maximale de PU (N_P max)	30
Nombre maximale de bandes de fréquence	10
Nombre de canaux par PU	10
Nombre de canaux non licenciés par bande	10
L'utilisation moyenne du spectre par le PU	40%
Nombre des SU par cluster (λ_s)	10
Nombre des PU par cluster (λ_p)	5
Nombre d'exécution par simulation	10

4.5.1 Résultats obtenus

a) Taux moyen d'utilisation du spectre

La figure 4.11 présente une comparaison entre l'approche basée sur le spectre licencié (Approche 1) et l'approche globale basée sur le spectre licenciée et non licenciée à la fois (Approche 2). Cette comparaison concerne l'utilisation moyenne du spectre en fonction du nombre de SU.

Nous remarquons que le taux moyen d'utilisation du spectre s'accroît considérablement avec l'augmentation du nombre de SU et s'élève à 89% et 99% dans l'approche 1 et 2 respectivement ce qui prouve l'efficacité de nos approches. Le taux d'utilisation moyen du spectre dans l'approche 2 est supérieur à celui de l'approche 1 car dans l'approche 1, les SU exploitent seulement les parties licenciées du spectre par contre dans l'approche 2, les SU peuvent accéder au spectre non licencié au cas où le spectre licencié est non disponible ou n'est pas convenable.

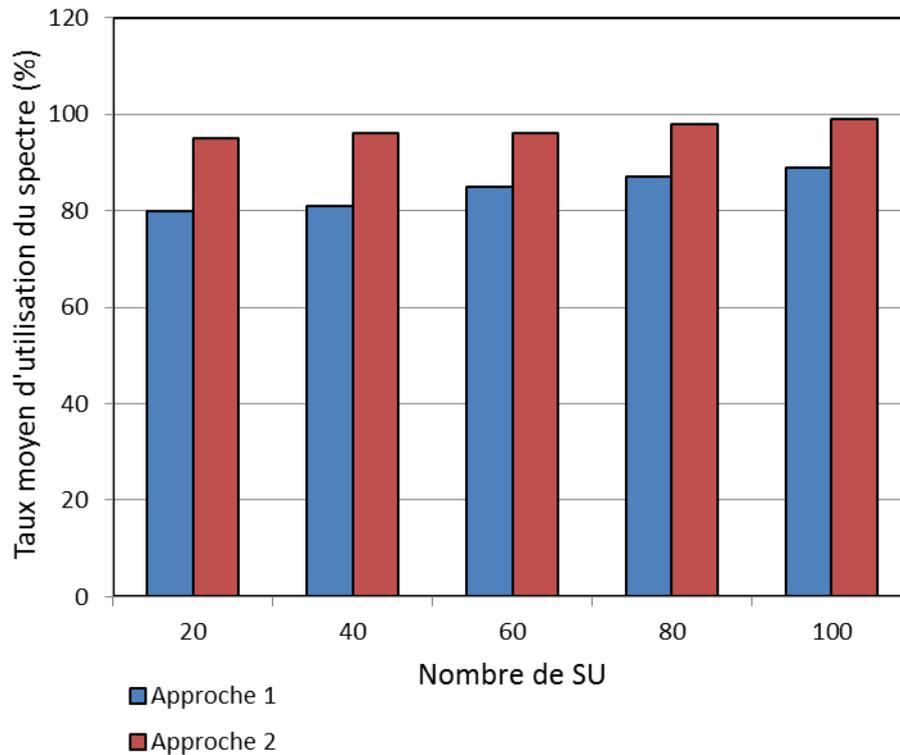


Figure 4.11 L'utilisation du spectre.

b) Taux moyen de coopération avec les PU

La figure 4.12 illustre une comparaison entre les 2 approches 1 et 2 en termes de taux moyen de coopération entre les SU et les PU en fonction du nombre de SU. Nous remarquons que le taux de coopération avec les PU est élevé et a atteint 98% et 89% pour l'approche 1 et 2 respectivement car l'approche 1 se base uniquement sur l'allocation du spectre licencié, quant à l'approche 2, elle favorise le partage du spectre licencié pour atteindre l'objectif du SU. Nous expliquons la différence remarquable du taux de coopération entre les deux approches par la stratégie adoptée par l'approche 2 qui ne compte pas seulement sur les canaux licenciés pour le partage du spectre car dans le cas où les canaux licenciés ne sont pas disponibles ou ils ne sont pas appropriés à la demande, les SU utilisent les canaux non licenciés pour accomplir leurs tâches ce qui réduit le taux de coopération avec les PU.

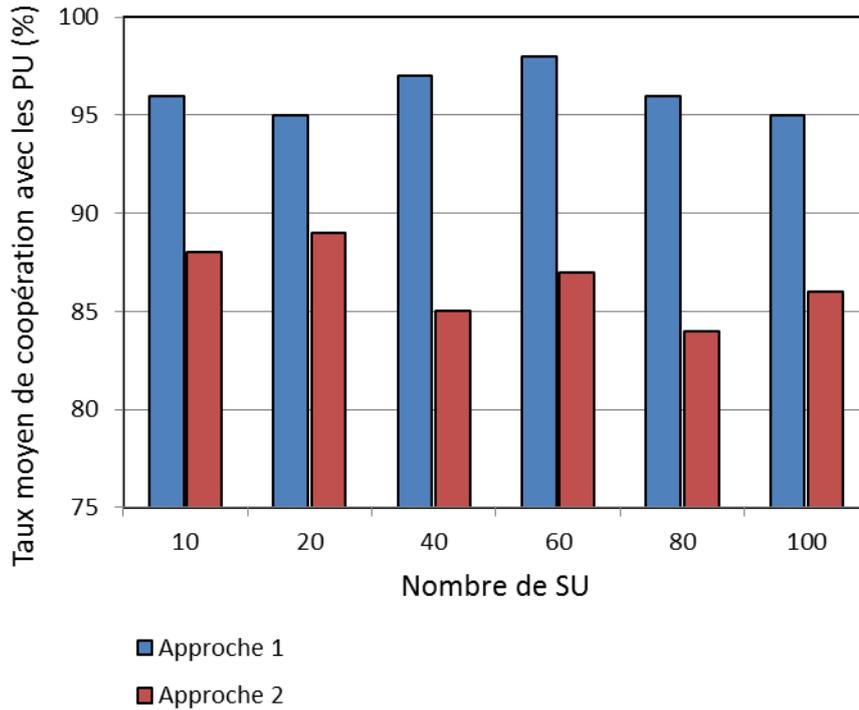


Figure 4.12 Coopération entre les SU et les PU.

c) Utilité moyenne des PU et des SU

Afin d'évaluer le degré de satisfaction des SU et des PU, nous avons mesuré leur utilité moyenne. L'utilité moyenne des SU (U_{su}) est calculée par l'équation suivante :

$$U_{su} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{P_p}{P_{pr}} * \frac{D_a}{D_d} \quad (4.11)$$

Où N est le nombre total d'allocation pour les SU, P_p est le prix payé par un SU, D_a est la durée d'accès attribuée à un SU, P_{pr} est le prix proposé par un SU et D_d est la durée d'accès demandé par un SU.

L'utilité moyenne des PU (U_{pu}) est calculée par l'équation suivante :

$$U_{pu} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{P_p}{P_d} * \frac{D_a}{D_f} \quad (4.12)$$

Où, M est le nombre total de partage pour les PU, P_p est le prix payé par un SU, D_a est la durée d'accès attribuée à un SU, P_d est le prix demandé par un PU et D_f est la durée d'accès fixée par un PU.

La figure 4.13 compare l'utilité moyenne des SU et des PU dans les deux approches 1 et 2. Nous remarquons que l'approche 2 assure une utilité moyenne des SU nettement plus intéressante que celle obtenue avec l'approche 1 (96% et 91% respectivement) car quelques SU dans l'approche 2 utilisent des canaux non licenciés qui sont gratuits et avec un accès libre ce qui augmente l'utilité moyenne des SU. Par ailleurs, il est tout à fait logique d'obtenir la

valeur maximale de l'utilité moyenne des PU (100%) car dans les deux approches, l'allocation des canaux licenciés se fait seulement aux SU qui sont prêts à payer le prix demandé par le PU et qui respectent la durée fixé par le PU.

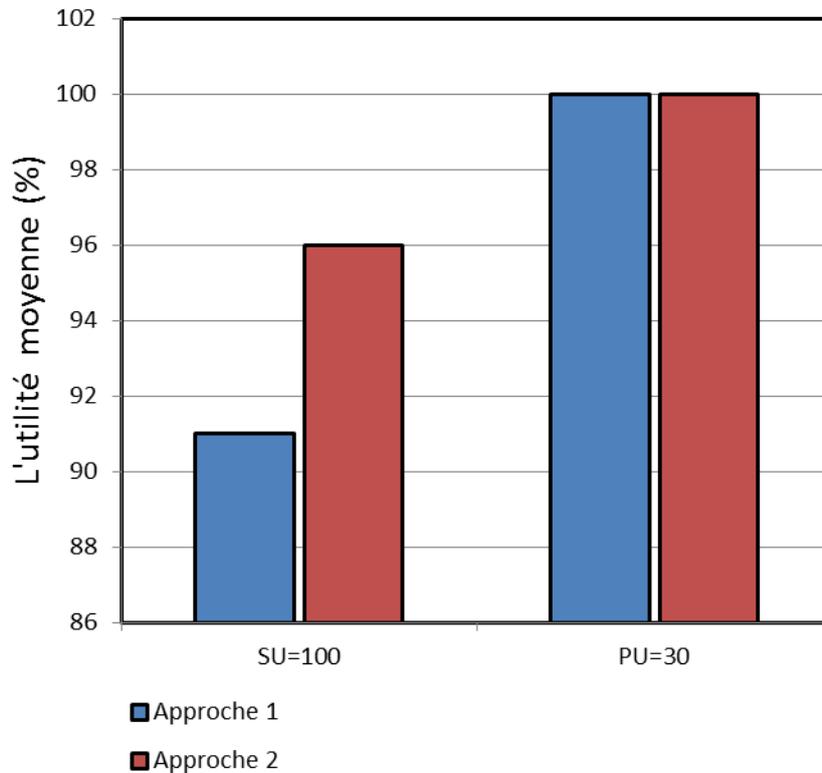


Figure 4.13 Utilité des PU et des SU.

d) Collision

La collision se produit quand plusieurs SU veulent accéder au même canal en même temps. La figure 4.14 montre l'efficacité de notre approche en faisant une comparaison avec l'accès classique au spectre non licencié dans le cas où tous les SU ont le droit d'accéder à n'importe quel canal sans aucune contrainte, une chose qui augmente le nombre de collision et génère beaucoup d'interférences. Dans notre approche, le nombre de collision est nul même avec l'augmentation du nombre des SU car si plusieurs SU veulent accéder au même canal non licencié, ils vont se communiquer entre eux pour céder l'accès au SU prioritaire pour accomplir sa tâche.

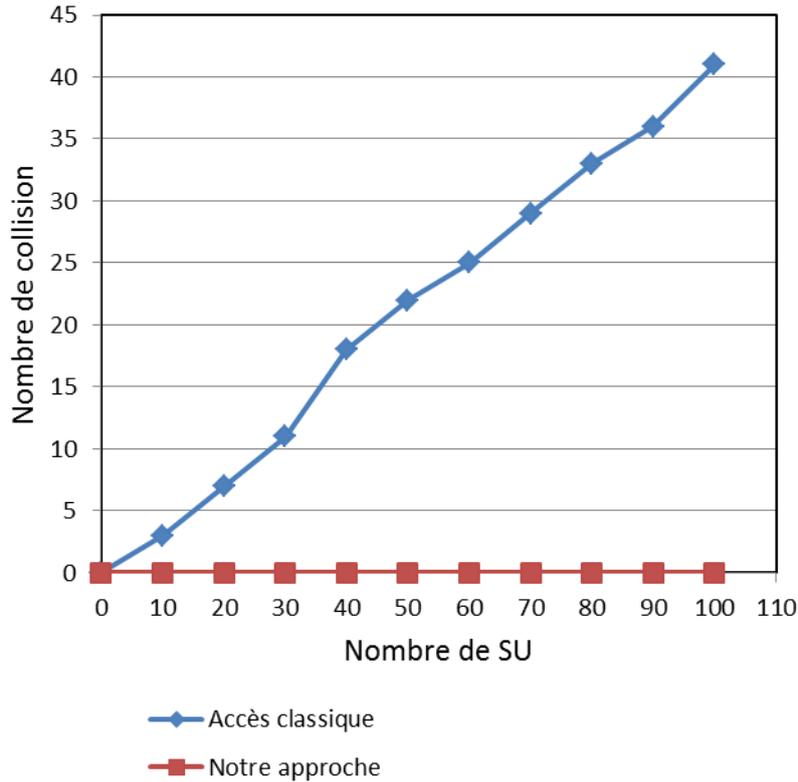


Figure 4.14 Collision par rapport aux canaux non licenciés.

4.5.2 Comparaison entre les différents algorithmes proposés

Dans cette section, nous allons faire une comparaison entre les résultats obtenus de nos algorithmes d'allocation de spectre proposés dans la section 4.5. Les figures 4.15, 4.16 et 4.17 représentent respectivement les résultats des comparaisons en termes de taux d'allocation de spectre avec succès, de l'impact des PU sur l'allocation du spectre et de l'impact sur la consommation d'énergie.

a) Taux d'allocation du spectre avec succès

La figure 4.15 illustre le pourcentage de l'allocation de spectre avec succès relatif aux différents algorithmes en fonction du nombre de SU. Nous remarquons que le pourcentage d'allocation pour les algorithmes FIFO, temps de partage et énergie est inférieur au pourcentage relatif à l'algorithme hybride où presque toutes les requêtes des SU sont exécutées avec succès. L'algorithme hybride effectue 20% des allocations avec succès de plus par rapport à l'algorithme basé sur le FIFO et 10% des allocations avec succès de plus par rapport aux deux autres algorithmes. L'algorithme hybride alloue chaque canal disponible au SU qui a le minimum ratio entre son énergie restante et la durée prévue de partage ce qui maintient la balance de la consommation d'énergie des SU et donne la possibilité à un grand nombre de SU d'accomplir leurs tâches.

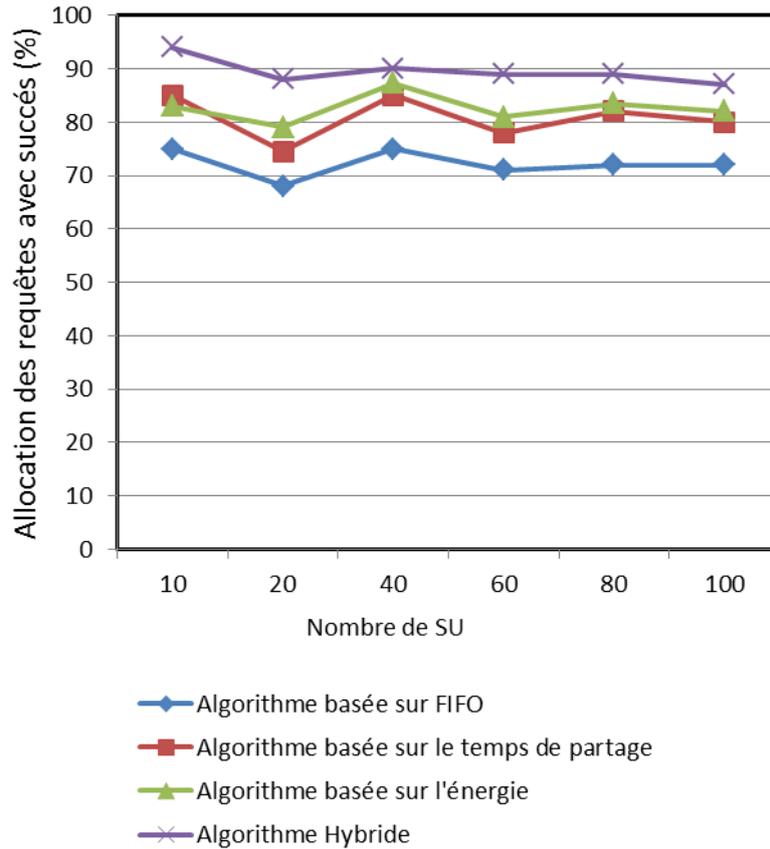


Figure 4.15 Taux d'allocation avec succès.

b) Impact des PU sur l'allocation du spectre

La figure 4.16 illustre l'impact du nombre de PU sur l'allocation du spectre où nous avons fixé le nombre de SU à 50 et nous avons varié le nombre de PU. Nous observons dans la figure que le taux de réussite des allocations dépend considérablement du nombre des PU. Lorsque le nombre de PU est petit, le pourcentage d'allocation du spectre est minimal pour tous les algorithmes et lorsque le nombre des PU augmente, le pourcentage d'allocation augmente aussi. Nous remarquons également que l'algorithme hybride donne un meilleur pourcentage que les autres algorithmes ce qui prouve l'amélioration des performances faites au niveau de l'allocation du spectre. Nous notons également que le pourcentage d'allocation du spectre est maximal (100%) et constant pour tous les algorithmes lorsque le nombre de PU est supérieur à 25 car il y a suffisamment de canaux libres à partager avec tous les SU.

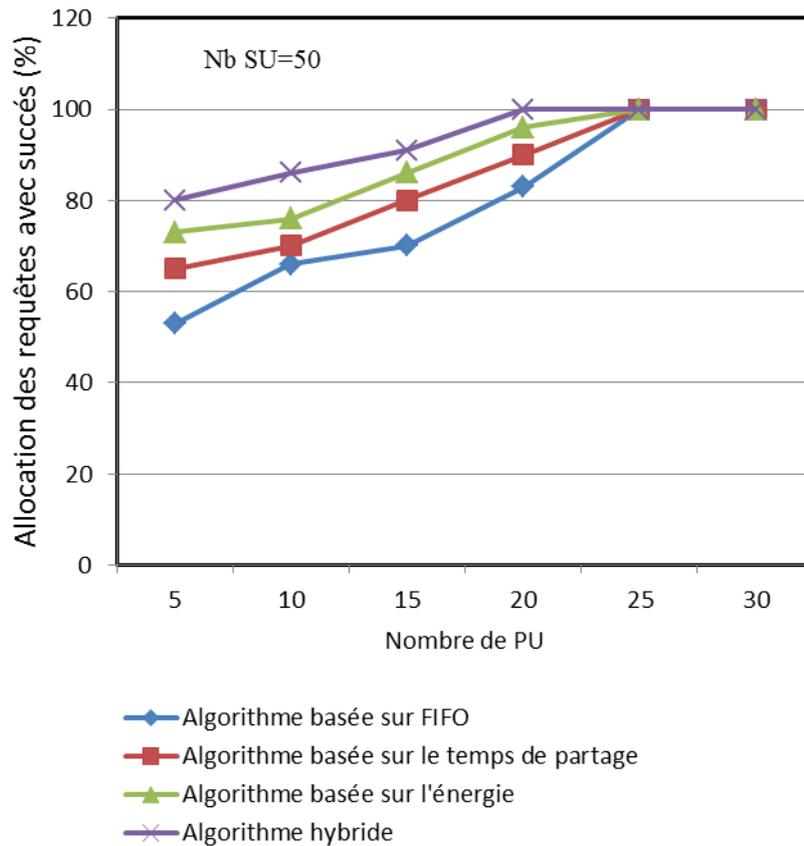


Figure 4.16 Impact des PU sur l'allocation du spectre.

c) Consommation d'énergie

Nous nous concentrons maintenant sur la façon dont un nœud utilise son énergie. Certains nœuds consomment moins d'énergie pour accomplir leurs tâches tandis que d'autres nœuds consomment beaucoup plus, une chose qui ramène à la réduction de la durée de vie du réseau. Ainsi, il est important d'équilibrer la consommation d'énergie entre les nœuds pour éviter leur défaillance. La figure 4.17 illustre la variance⁸ de la consommation d'énergie en fonction du nombre de SU. La variance de la consommation d'énergie est calculée selon l'équation suivante:

$$V(En) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (En_{su_i} - En_m)^2 \quad (4.13)$$

Où N est le nombre de SU, En_{su_i} est l'énergie consommée par SU_i et En_m est la moyenne de l'énergie consommée par l'ensemble des SU.

D'après la figure 4.17, nous observons que les valeurs de variance de la consommation d'énergie pour l'algorithme hybride sont plus petites par rapport aux autres algorithmes une chose qui signifie que l'algorithme hybride gère bien la balance de la consommation d'énergie

⁸ Une petite variance est signe que les valeurs sont proches les unes des autres alors qu'une variance élevée est signe que celles-ci sont très écartées.

des différents SU. Par ailleurs, la valeur élevée de la variance signifie qu'il n'y a pas d'équilibrage de la consommation d'énergie entre les SU. Cependant, l'algorithme hybride assure une distribution plus uniforme de la consommation d'énergie à travers le réseau par rapport aux autres algorithmes.

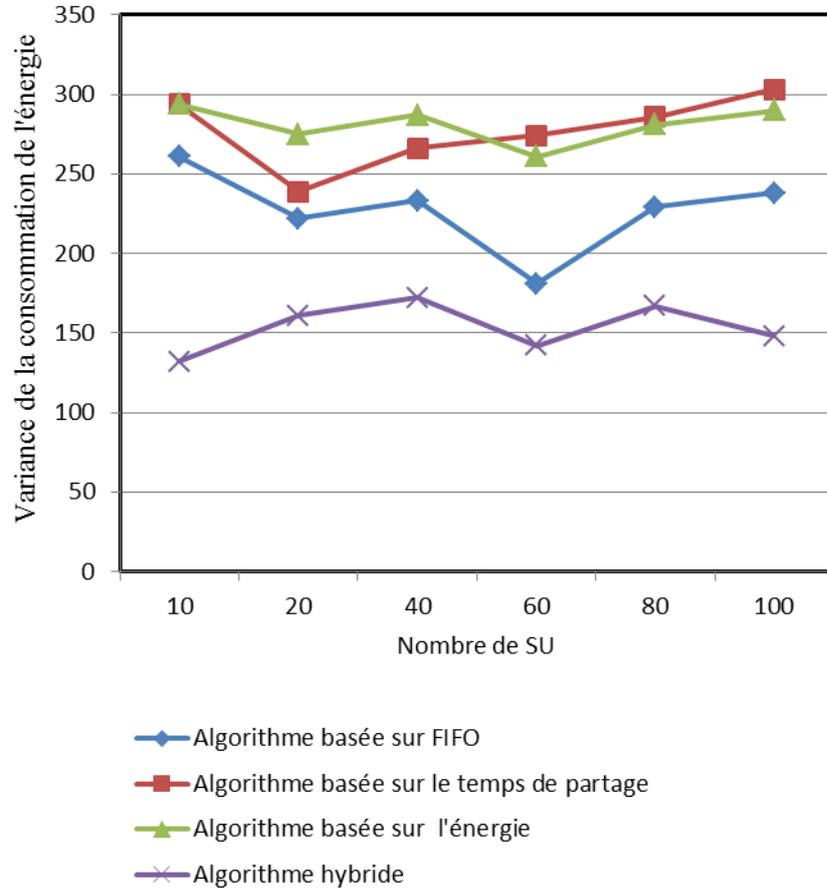


Figure 4.17 Consommation d'énergie.

4.5.3 Comparaison avec d'autres approches

Dans cette section, nous comparons notre approche globale avec l'approche coopérative multi-agents [63], l'algorithme glouton (greedy approach) [116] et la négociation locale (local bargaining) [33]. Dans l'approche Greedy, la plupart des PU sont égoïstes et hésitent de partager les canaux inutilisés jusqu'à ce qu'ils obtiennent la meilleure offre de partage pour maximiser leur utilité individuelle. L'approche de Bargaining est une approche coopérative où les SU échangent des messages et ils s'auto-organisent en groupes de négociation pour le partage du spectre. Dans l'approche coopérative multi-agents, les PU et les SU coopèrent entre eux pour établir le partage du spectre mais d'une manière égoïste car chaque SU négocie avec les PU existant et choisit le PU qui partage ses canaux avec un prix minimal et le PU à son tour choisit le SU qui lui offre un prix maximal avec un nombre minimum de canaux à partager.

Les figures 4.18, 4.19 et 4.20 représentent respectivement les résultats des comparaisons en termes de temps de réponse, de nombre d'allocation de spectre faite avec succès et de nombre moyen de messages échangés.

a) Comparaison en termes de temps de réponse

La figure 4.18 présente le temps de réponse global (voir section 4.2) des SU en fonction de leur nombre. En comparant les résultats de notre solution avec les autres approches, nous remarquons que l'algorithme Greedy et Bargaining ont des valeurs de temps de réponse global élevées et ces valeurs augmentent rapidement avec l'augmentation du nombre de SU, cela signifie que les SU ont des difficultés de trouver des canaux disponibles pour le partage (le temps d'attente est élevé) contrairement à notre approche et l'approche coopérative multi-agents où la valeur de temps de réponse global décroît légèrement avec l'augmentation du nombre de SU. Il est important de signaler que notre approche assure un temps de réponse très faible, ce qui confirme que notre approche minimise le temps d'attente et d'interruption et garantit une allocation très rapide assurant de bonnes performances.

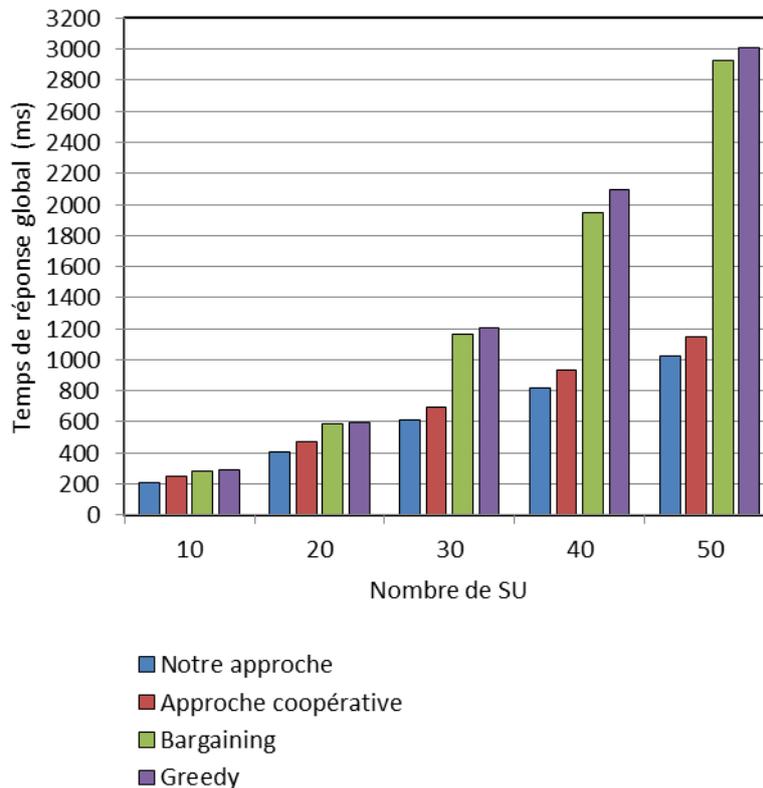


Figure 4.18 Comparaison en termes de temps de réponse.

b) Comparaison en termes d'allocation de spectre

La figure 4.19 décrit le nombre d'allocations de spectre qui sont établies avec succès lors de l'exécution de la simulation de notre approche et les autres approches avec plusieurs ensembles de SU. D'après la figure 4.19, nous observons que le nombre des allocations faites avec succès dans les approche Greedy, Bargaining et mutli-agents est plus petit par rapport à notre approche. Cette dernière assure la réussite de l'allocation du spectre pour la majorité des

SU. Ce résultat est très important confirmant que notre approche améliore les performances du processus d'allocation du spectre et permet de satisfaire les besoins des SU.

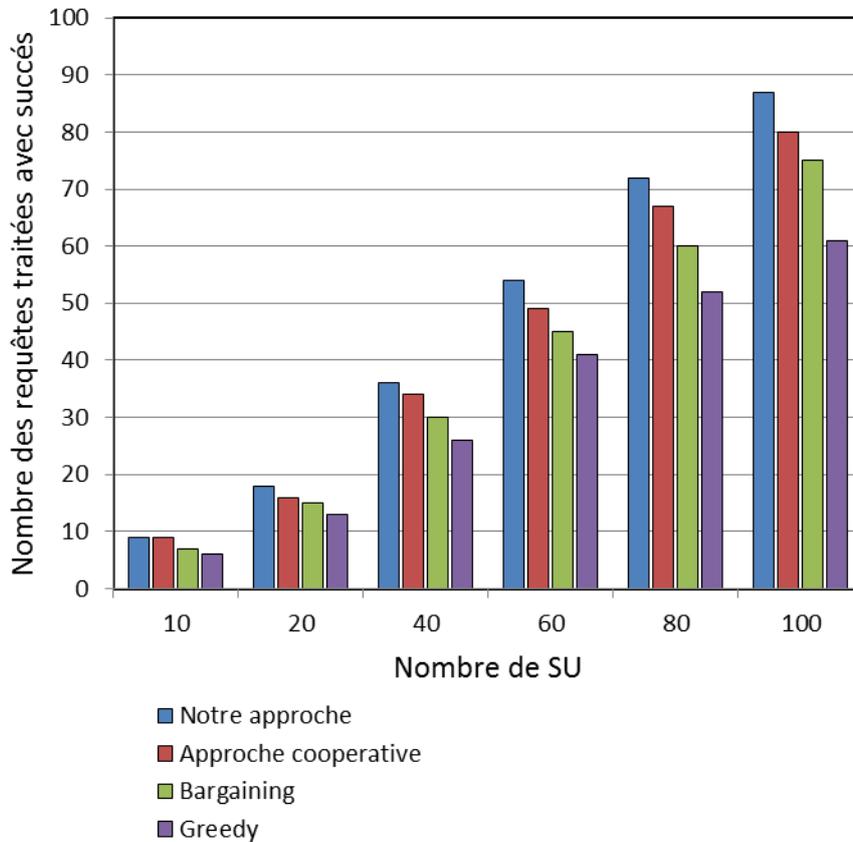


Figure 4.19 Comparaison en termes d'allocation de spectre.

c) Comparaison en termes de coût de communication

La figure 4.20 montre le coût de communication dans le réseau en fonction du nombre de SU où le nombre de messages échangés est fortement dépendant du nombre de SU. Nous remarquons que le nombre de messages échangés dans l'approche Greedy augmente de façon remarquable en raison de la nature égoïste des PU. Par conséquent, souvent les SU reçoivent des propositions non satisfaisantes, et donc plusieurs messages sont gaspillés. Quant à l'approche coopérative multi-agents, les SU échangent plusieurs types de messages aux différents PU et certains SU peuvent être mécontents ce qui rend le coût de communication plus élevé. L'approche de Bargaining est limitée à un-à-un négociateur, où un SU peut négocier avec un seul PU à la fois ce qui réduit le nombre de message échangés. D'autre part, nous constatons que notre approche entraîne un échange de message plus faible que les autres approches, et cela grâce au regroupement des nœuds qui diminue le coût de communication et ne surcharge pas le trafic dans le réseau.

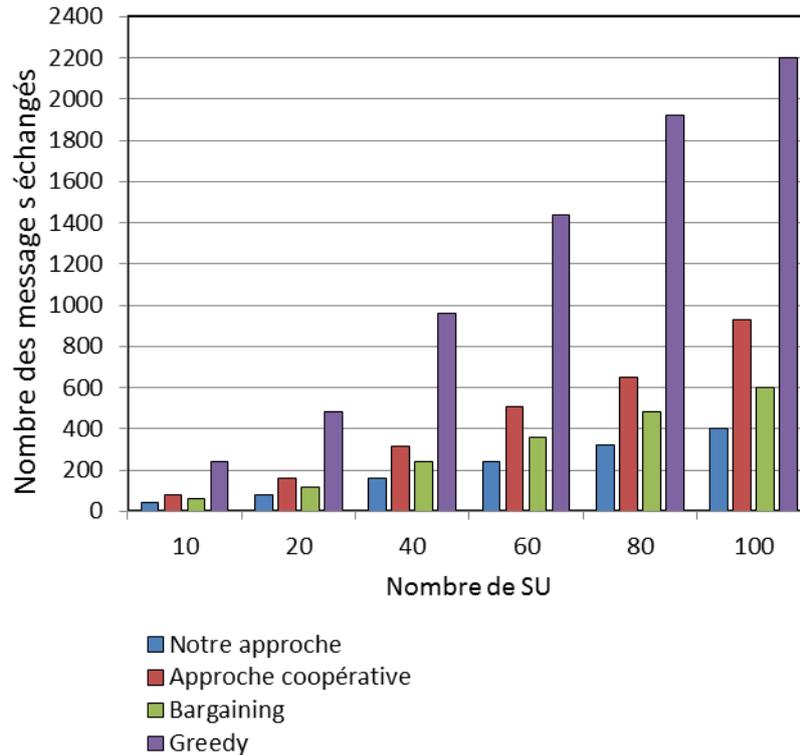


Figure 4.20 Comparaison en termes de coût de communication.

4.6 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation de nos solutions proposées pour une gestion efficace et intelligente du spectre licencié et non licencié dans un réseau de radio cognitive en se basant sur les systèmes multi-agents et le clustering. Nous avons présenté en premier temps une solution approfondie pour l'allocation/partage du spectre licencié où nous avons détaillé le rôle de chaque agent et l'intérêt du clustering dans le RRC. Nous avons également proposé des algorithmes d'allocation pour l'amélioration du processus d'allocation au niveau de SU-leader et nous avons expliqué la différence entre ces algorithmes afin d'adopter celle qui donne les meilleures performances pour notre proposition. Ensuite, nous avons exposé une approche globale qui exploite la disponibilité du spectre licencié et non licencié en même temps pour servir les demandes d'allocation selon les besoins et les capacités des SU. Cette approche tire profit des avantages de l'approche précédente en améliorant le fonctionnement du SU-leader avec l'ajout des agents assistants (agent de détection et agent d'allocation) et surtout en améliorant l'accès au spectre non licencié par une coopération entre les différents clusters de SU. Dans la partie évaluation des performances, nous avons prouvé à travers les résultats obtenus l'efficacité de nos approches en termes d'utilisation de spectre, l'utilité des SU et des PU ainsi que l'élimination du problème de collision dans les bandes non licencié. En plus, nous avons montré l'apport significatif de l'algorithme pour ce qui concerne les allocations réussites et la consommation d'énergie des SU. Finalement, les résultats de comparaison ont illustré que notre approche est généralement la meilleure et permet d'assurer

des allocations réussites avec un temps de réponse raisonnable et avec un faible coût de communication par rapport aux autres approches existantes dans la littérature.

Dans le chapitre suivant, nous proposons notre deuxième contribution pour le routage dans les RRC, en présentant un nouveau protocole de routage basé sur le clustering.

Chapitre 5 : Protocole de routage basé sur le clustering

Sommaire

5.1 Introduction	Erreur ! Signet non défini.
5.2 Contexte	Erreur ! Signet non défini.
5.3 Protocole de routage proposé	Erreur ! Signet non défini.
5.3.1 Découverte de la route	Erreur ! Signet non défini.
5.3.2 La formation de la route	Erreur ! Signet non défini.
5.3.3 La maintenance de la route	Erreur ! Signet non défini.
5.3.4 Un exemple explicatif.....	Erreur ! Signet non défini.
5.4 Evaluation des performances de l'approche de routage proposée.....	Erreur ! Signet non défini.
5.4.1 Résultats obtenus.....	Erreur ! Signet non défini.
5.5 Conclusion	Erreur ! Signet non défini.

5.1 Introduction

Récemment, plusieurs études sont intéressées au problème de routage dans les RRC. Le chapitre 3 a récapitulé les travaux existants dans ce domaine ce qui nous a permis de tirer profit de leurs avantages et inconvénients pour proposer une solution plus efficace qui va être présentée dans ce chapitre. L'un des défis majeur du routage dans les RRC est la conception d'un mécanisme qui permet une collaboration compétente entre la sélection de la route et la décision spectrale. Notre protocole de routage proposé est un protocole basé sur la technique de clustering qui prend en considération les caractéristiques du RRC et porte des améliorations au niveau des principales phases de routage : découverte, construction et maintenance de la route. Dans ce chapitre, nous allons présenter donc notre approche pour la gestion de routage dans un RRC. D'abord, nous décrirons le contexte et le protocole proposé ainsi que ses différentes étapes qui seront illustrées par un exemple explicatif. Ensuite, nous évaluons les performances du protocole proposé par simulation et nous le comparons avec le protocole AODV (voir la section 3.6.3)

5.2 Contexte

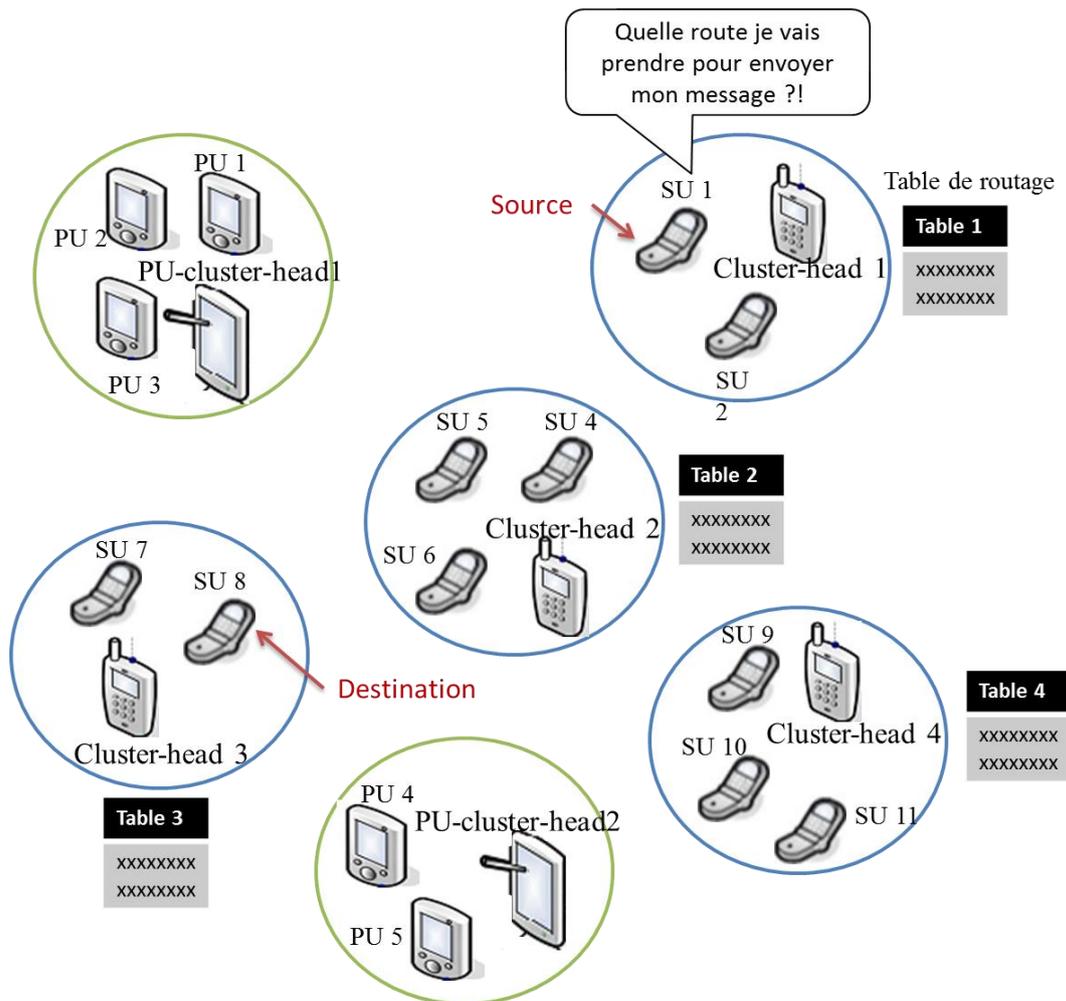


Figure 5.1 Réseau de radio cognitive.

Dans le même RRC considéré dans le chapitre 4 et avec la même répartition adoptée pour la gestion du spectre, nous allons présenter notre approche proposée pour la gestion de routage dans un RRC où l'ensemble des SU est décomposé en clusters en se basant sur le regroupement par apprentissage (K-means++). Chaque cluster possède un cluster-head qui est choisi selon des critères (nœud statique, puissant en termes d'énergie...etc) pour gérer les membres de son cluster. La figure 5.1 montre un exemple d'un SU qui appartient à un cluster donné et qui voudrait envoyer un message à un autre nœud SU dans un autre cluster dans le réseau, cela fait appel à un protocole de routage qui permet à un nœud source de transmettre ses paquets au nœud de destination sans interruption. Par ailleurs, le rôle du routage dans le RRC est de trouver le meilleur chemin où les nœuds relais de chaque lien dans le chemin partagent le même spectre pour pouvoir se communiquer.

5.3 Protocole de routage proposé

Nous avons proposé un nouveau protocole de routage pour les RRC qui se base sur la technique de clustering et qui peut tirer profit des avantages des protocoles réactifs et proactifs à la fois. Quand un nœud source veut transmettre un message à un autre nœud destination ; tout d'abord, il doit effectuer une découverte de route vers la destination. Ensuite, la construction de route sera effectuée à partir de la destination en choisissant le chemin optimal selon les métriques choisies. Dans notre conception basée sur le clustering, le cluster-head joue un rôle très important dans toutes les étapes de routage, chaque cluster-head maintient une table de routage (voir figure 5.1) qui contient les détails sur tous les membres de son cluster ainsi que les autres cluster-heads et leurs membres de son voisinage⁹. Les cluster-heads sont les responsables de la diffusion des paquets de découverte dans le réseau et le choix de la route optimale et les nœuds intermédiaires du chemin pour transmettre le paquet. Dans ce qui suit, nous décrivons en détail les différentes phases de notre protocole.

5.3.1 Découverte de la route

Lorsqu'un nœud source veut établir une route vers une destination pour laquelle il ne possède pas encore de chemin, il envoie un paquet de découverte (Route Request-RREQ) à son cluster-head (CHS). Au début, le paquet RREQ est identifié uniquement par l'adresse IP de la source et la destination, puis le CHS lui attache un numéro de séquence pour faire la distinction entre les anciennes et les nouvelles routes. Ensuite, le CHS va diffuser le paquet RREQ aux cluster-heads voisins qui vont également rediffuser le paquet jusqu'à qu'il atteigne le cluster-head de destination (CHD).

Quand un Cluster-head intermédiaire (CHI) reçoit le paquet de RREQ, il ajoute d'abord son adresse IP au paquet RREQ puis il vérifie sa table de routage pour voir si le nœud de destination appartient à son cluster donc il envoie un paquet de réponse (Route Replay-RREP) à la source et la phase de découverte de la route est terminée. Sinon il cherche dans la table de routage s'il connaît déjà la route vers la destination et dans ce cas le paquet RREQ ne sera pas

⁹ Les informations sur les nœuds membres et les cluster-heads voisins sont obtenus en échangeant le message HELLO.

diffuser aux cluster-heads voisins mais envoyé seulement au cluster-head qui appartient au chemin de la destination mais s'il ne connaît pas le chemin vers la destination, il continue à diffuser le paquet RREQ aux cluster-heads voisins jusqu'à trouver la destination. Cependant, le routage se fait d'une manière réactive si le chemin vers la destination n'est pas connu et d'une manière hybride si un chemin partiel de la route est déjà connu car la découverte de la route optimale se fait pour chaque nouvelle demande reçu par le CHS et quand le paquet RREQ atteint un certain CHI, le routage devient proactif car la suite du chemin vers la destination est déjà enregistré dans sa table de routage.

L'approche proposée traite le problème de congestion de diffusion et des boucles de routage dans le RRC. Comme il est montré dans la figure 5.2, il existe des paquets RREQ qui ne vont pas atteindre la destination car ils sont dans le mauvais chemin. Cependant, nous avons limité le nombre de diffusion de paquets RREQ par un seuil pour éviter le problème de congestion du réseau. Ce seuil « Hmax » représente le nombre maximal de sauts permis entre CHS et CHD et il est calculé selon l'équation suivante: $H_{max} = NC - 1$ (5.1)

NC est le nombre de clusters RC dans le réseau.

Donc, si le nombre de sauts entre CHS et CHD est supérieur à Hmax, le paquet RREQ sera tout simplement supprimé. Nous proposons également de supprimer tout paquet RREQ déjà reçu par un CHI afin d'éviter les boucles de routage (voir la figure 5.3).

Nous illustrons les différentes étapes de la découverte de route dans la figure 5.4.

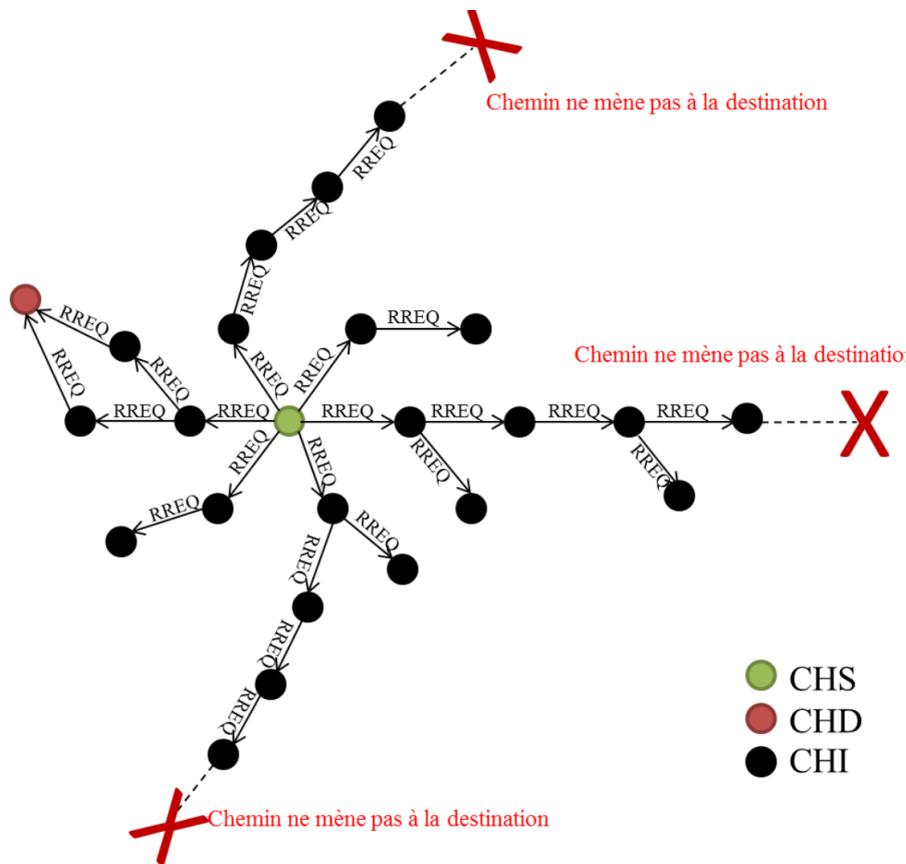


Figure 5.2 Diffusion des paquets RREQ.

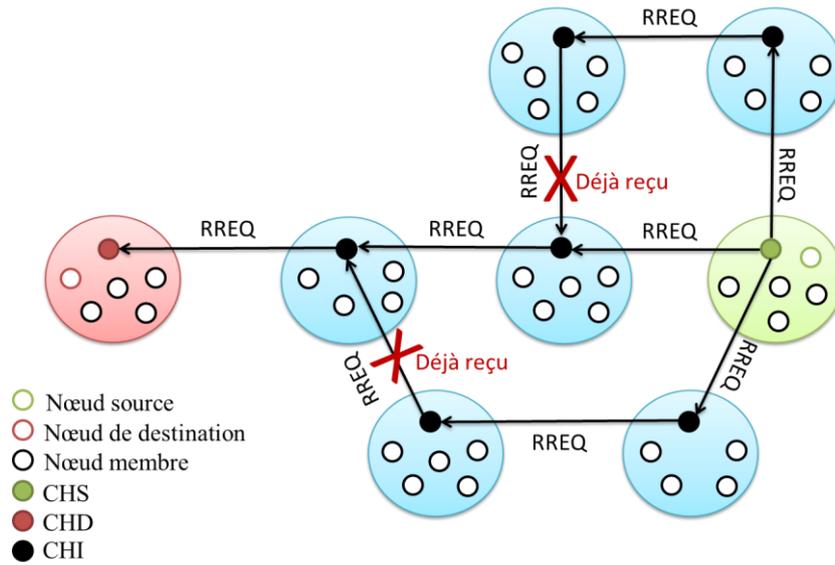


Figure 5.3 Elimination des paquets RREQ.

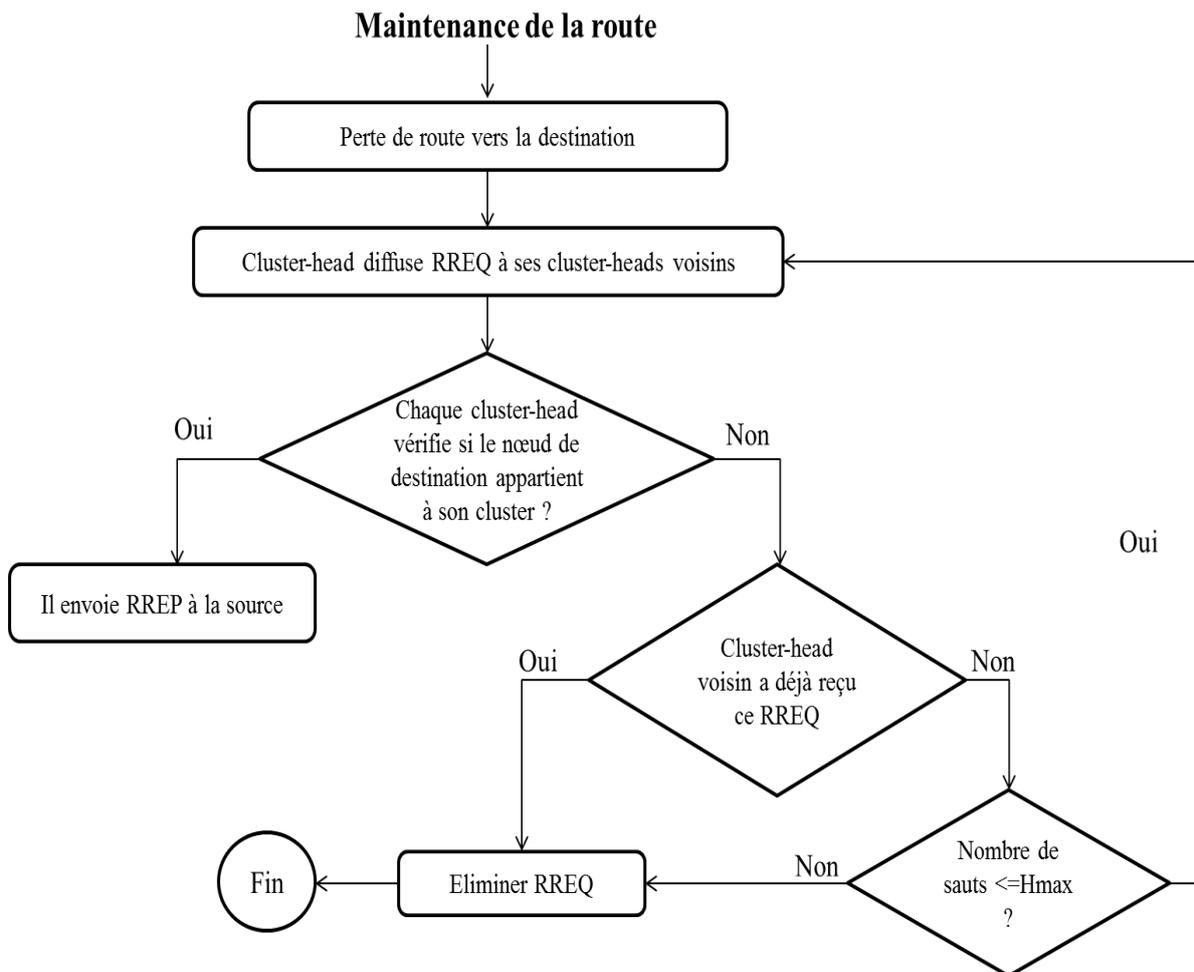


Figure 5.4 Organigramme de la découverte de route.

5.3.2 La formation de la route

Une fois le nœud de destination est trouvé, la phase de formation de la route est lancée. Une variété de politique peut être considérée pour faire le choix de la route comme le débit et la latence de bout en bout. Le CHD peut recevoir plusieurs paquets de RREQ. Tous ces paquets représentent des différents chemins entre la source et la destination mais seulement le premier paquet RREQ arrivé à la destination sera choisi pour la formation de la route car son chemin contient le minimum nombre de sauts et les autres paquets seront supprimés (voir la figure 5.5). Ensuite, un paquet de RREP sera envoyé à la source en inversant la séquence des sauts (les adresses IP des CHI) enregistré dans le paquet RREQ. Le long du chemin de RREP, chaque CHI choisit un nœud intermédiaire de son cluster qui partage un canal en commun avec le nœud de saut précédent et s'il y en a beaucoup il choisit celui qui a le plus haut débit puis il met à jour le paquet RREP par l'adresse IP de ce nœud intermédiaire.

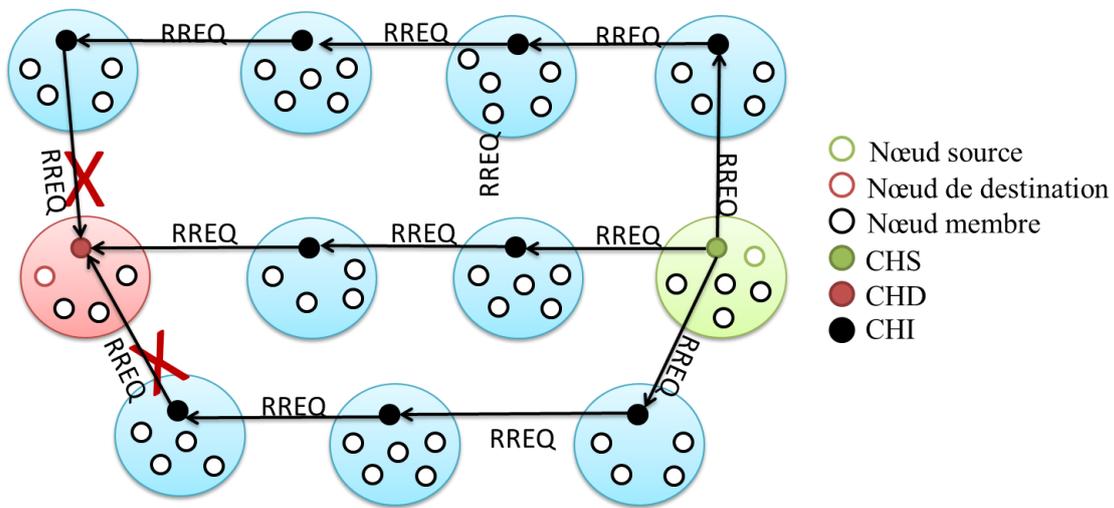


Figure 5.5 Sélection de la route.

Dans la figure 5.6 par exemple, chaque nœud dans la route partage au minimum un canal avec le nœud précédant, le nœud intermédiaire N1 partage le canal C1 avec le nœud source et le nœud intermédiaire N2 partage les canaux C1 et C4 avec N1...etc. A la réception du paquet RREP, le nœud source peut commencer la communication avec le nœud de destination. Au bout d'un délai d'attente si la source ne reçoit aucun paquet de RREP, le message sera abandonné. La figure 5.7 résume les différentes étapes de la phase de formation de la route.

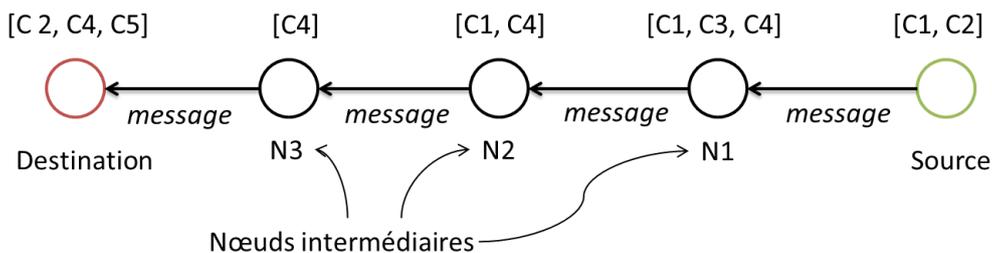


Figure 5.6 La route établie entre la source et la destination.

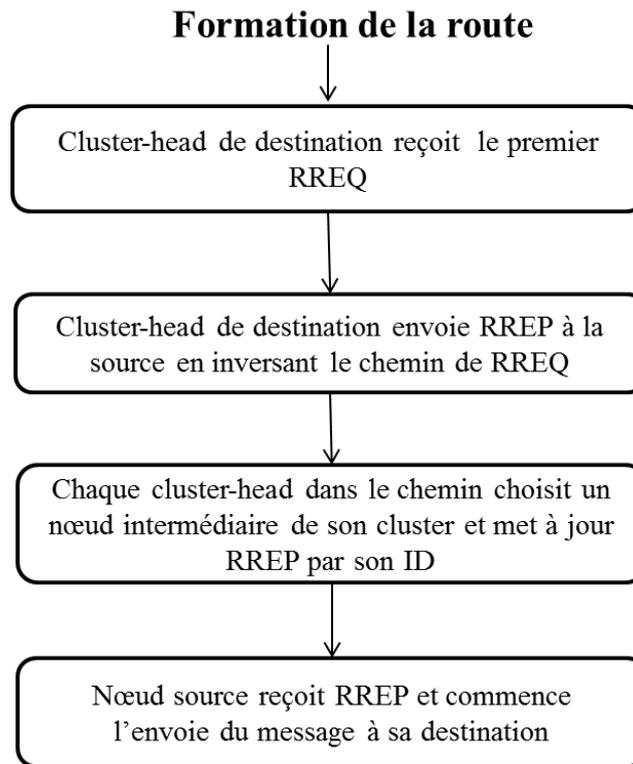


Figure 5.7 Formation de la route.

5.3.3 La maintenance de la route

La coupure du lien d'une route est due souvent à la mobilité ou la déconnexion des nœuds qui forment cette route ce qui nécessite une maintenance immédiate manipulée avec les paquets d'erreur (Route ERRor-RERR). Lorsqu'une route est établie, elle est maintenue par les cluster-heads tant que le nœud source a besoin de cette route. La maintenance de la route se produit selon le type de nœud qui a affecté la route établie :

- Quand un nœud source se déplace pendant une session active et perd la connexion avec le saut suivant de la route; ce nœud source envoie un paquet RERR à son nouveau cluster-head pour lui prévenir que la destination est désormais injoignable. Si le nouveau cluster-head appartient à l'ancien chemin donc ça ne sera pas nécessaire de refaire une nouvelle découverte de route. Tout simplement, le nouveau cluster-head de la source va mettre à jour l'ancienne route en enlevant la partie qui le relie avec l'ancien cluster-head de la source. Sinon, une nouvelle session de découverte de route sera initiée en utilisant le paquet traditionnel RREQ.
- Lorsqu'un nœud intermédiaire perd la connexion avec le saut suivant, il envoie un paquet de RERR à son cluster-head qui va transmettre le paquet RERR au cluster-head du nœud perdu pour sélectionner un autre nœud intermédiaire. Par conséquent, le message pourrait être transmis vers la destination.
- Dans le cas où un nœud de destination est en mouvement ou il se déconnecte, le nœud intermédiaire qui lui précède envoie un paquet de RERR à son cluster-head qui va transmettre le paquet à la source. Si le nœud de destination change de cluster alors une

nouvelle découverte est lancée et si le nœud est déconnecté alors le message sera détruit.

5.3.4 Un exemple explicatif

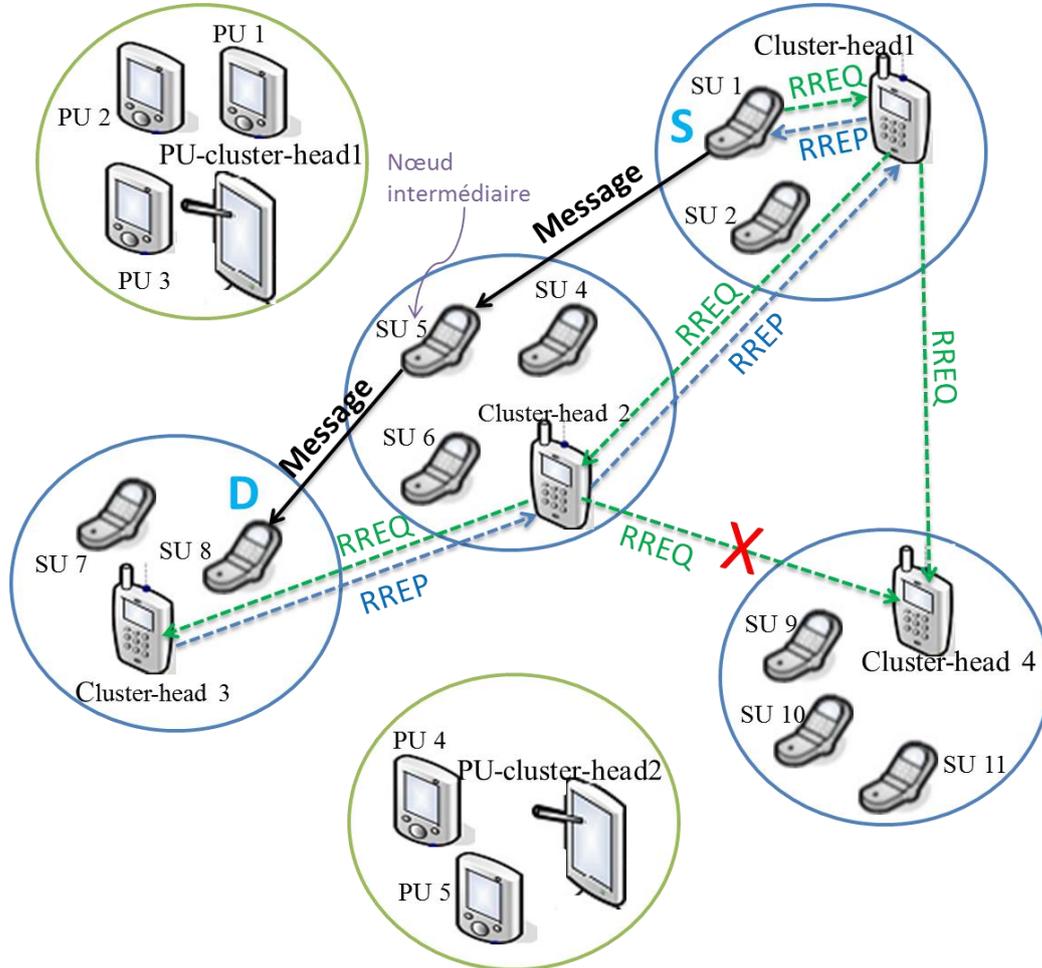


Figure 5.8 Exemple de routage dans un RRC.

Dans l'exemple illustré dans la figure 5.8, nous allons expliquer le fonctionnement du protocole de routage proposé et comment la route sera établie entre la source SU1 et la destination SU8. Tout d'abord SU1 va lancer la phase de découverte de la route vers SU8 par l'envoi du paquet RREQ au cluster-head 1 (CHS). Le Cluster-head 1 initialise H_{max} à 3 (selon l'équation (1)) puis il diffuse RREQ au cluster-head voisins : Cluster-head 2 et Cluster-head 4. De la même manière, Cluster-head 2 diffuse le paquet au Cluster-head 3 et Cluster-head 4 mais ce dernier il a déjà reçu le même paquet donc le deuxième paquet sera éliminé. Chaque CHI décrémente la valeur de H_{max} et si $H_{max} = -1$ le paquet RREQ sera supprimé. Le Cluster-head 3 (CHD) va examiner le paquet reçu et il va constater que le nœud de destination est un membre de son cluster donc il va envoyer un paquet RREP à la destination en passant par les mêmes cluster-head qui se trouve dans le chemin du paquet RREQ {CH3, CH2, CH1}. Chaque cluster-head va ajouter l'identifiant du nœud le plus approprié pour qu'il soit un nœud intermédiaire, dans notre exemple, il existe un seul nœud intermédiaire SU5 sélectionné par le

Cluster-head 2 qui a un haut débit de connexion et partage les mêmes canaux que SU1 et SU8. Une fois le paquet RREP arrive à la source, le message peut être transmis à la destination le long du chemin suivant {SU1, SU5, SU8}. Au cas où SU1 perd la connexion avec SU5, un paquet d'erreur RERR sera envoyé au Cluster-head 2 pour choisir un autre nœud intermédiaire de son cluster, comme il est illustré dans la figure 5.9. C'est SU4 qui est choisi au lieu de SU5 et donc le chemin sera le suivant {SU1, SU4, SU8}.

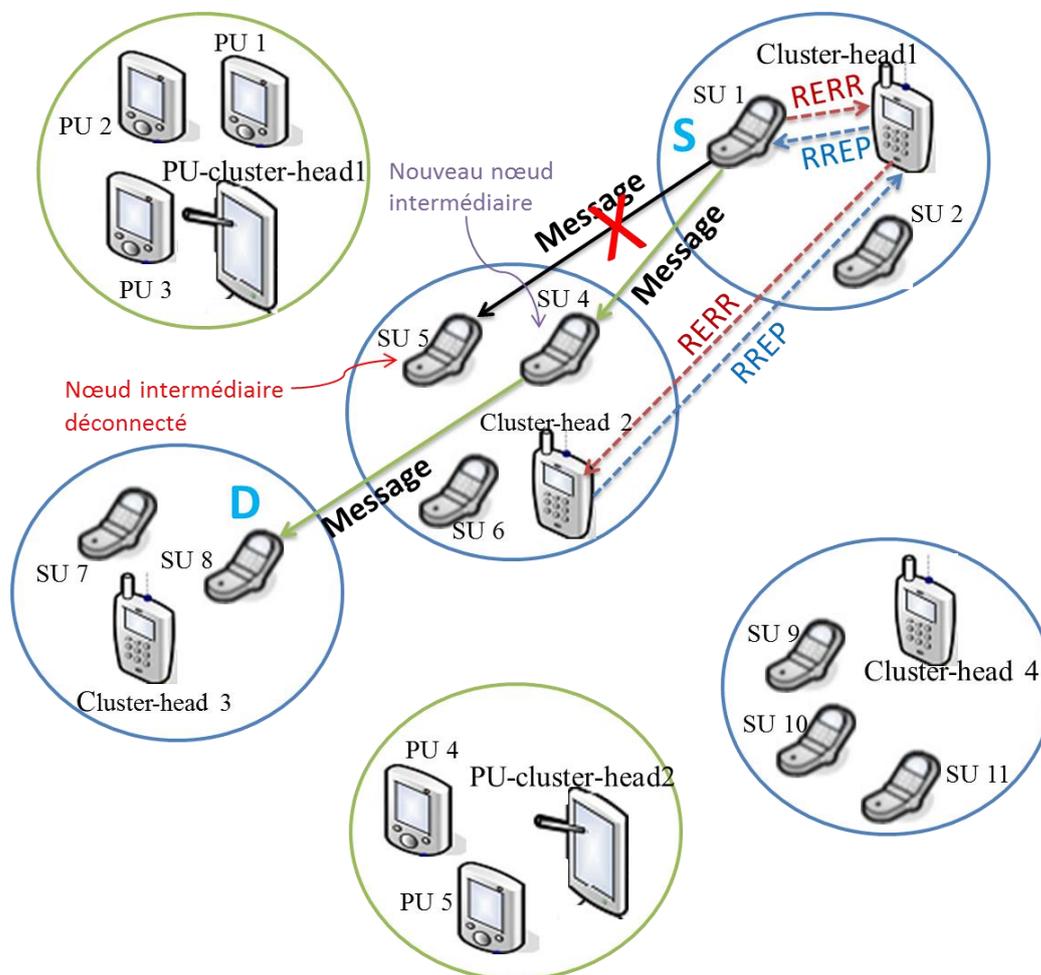


Figure 5.9 Maintenance de la route.

5.4 Evaluation des performances de l'approche de routage proposée

Dans cette section, nous évaluons notre approche de routage à travers le même simulateur JADE utilisé dans le chapitre 4 et avec le même contexte dans lequel les SU sont regroupés en clusters gérés par des cluster-heads. Nous considérons pratiquement les mêmes paramètres de simulation que ceux adoptés pour l'évaluation des performances de notre approche proposée pour la gestion du spectre et nous supposons que chaque cluster-head partage au minimum un canal avec chaque cluster-head voisin pour le but de la communication (envoi et réception des paquets RREQ et RREP).

Dans ce qui suit nous allons présenter quelques résultats de comparaison entre notre protocole de routage et le protocole AODV. Les simulations réalisées sont basées essentiellement sur les métriques suivantes : le nombre de paquets RREQ diffusés dans le réseau pour la découverte de la route, le nombre de paquets RREP envoyés pour la construction de la route, le temps de réponse de routage et enfin le taux de réussite de trouver une route entre la source et la destination. Ces résultats sont obtenus en fonction du nombre de SU dans le RRC et chaque résultat reflète la moyenne de dix exécutions effectuées. Les figures 5.10, 5.11, 5.12 et 5.13 présentent respectivement les résultats des simulations basées sur les différentes métriques mentionnées ci-dessus.

5.4.1 Résultats obtenus

La figure 5.10 représente le nombre moyen de paquets RREQ en variant le nombre de SU de 10 à 100. Nous remarquons que le nombre de paquets RREQ dans le protocole AODV est plus grand que celui de notre protocole. Ce nombre augmente rapidement avec l'augmentation du nombre de SU. En effet, quand un nœud a besoin d'une route qui ne la connaît pas il va envoyer un paquet de RREQ à ses voisins, ces derniers vont transmettre ce paquet à leurs voisins donc plusieurs paquets de RREQ sont diffusés dans le réseau pour atteindre la destination. Par contre dans notre protocole de routage, les paquets RREQ sont plus petits car ils sont diffusés seulement entre les cluster-head ce qui minimise le nombre des messages envoyés dans le réseau et montre l'efficacité de la technique de clustering dans la phase de découverte de la route.

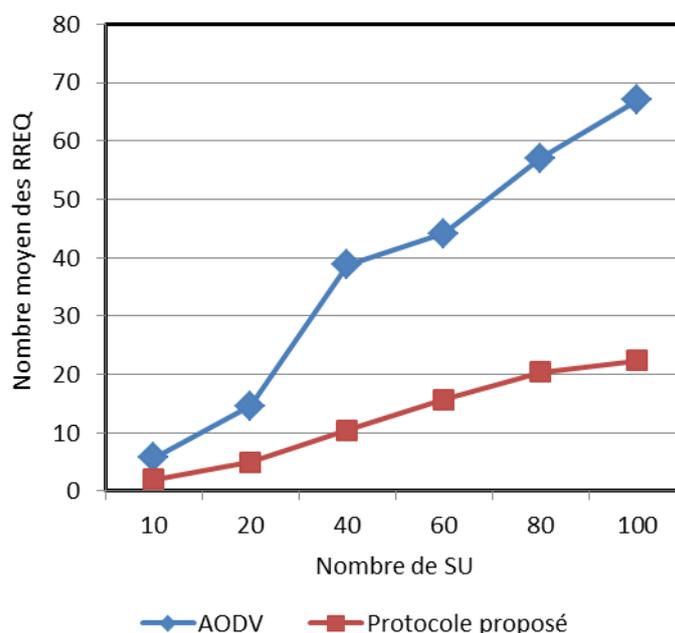


Figure 5.10 Nombre Moyen des RREQ diffusés dans le réseau.

Dans la figure 5.11, nous présentons le nombre de paquets RREP en fonction du nombre de SU dans le réseau. Nous observons à travers la figure que le nombre moyen des paquets RREP est réduit par rapport au protocole AODV et nous notons que le nombre de paquets RREP signifie également le nombre de saut de la route. Nous concluons que les routes

choisies par notre protocole sont plus performantes en termes de la latence de bout en bout par rapport au protocole AODV.

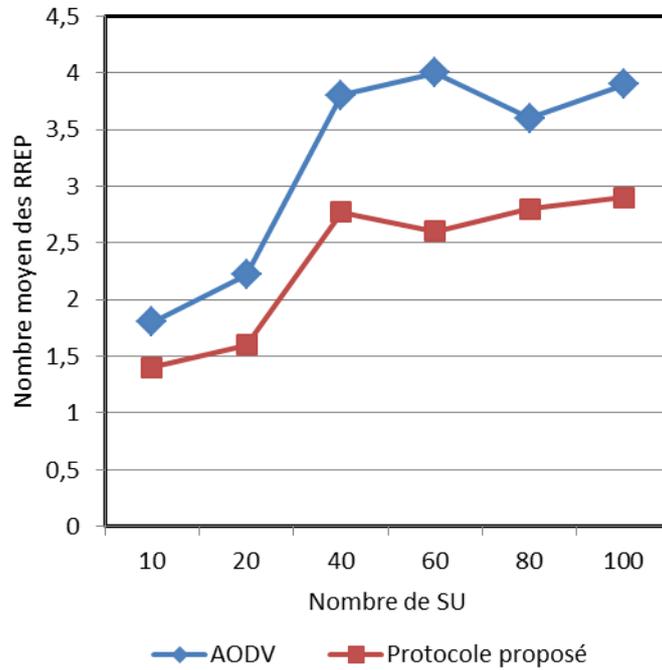


Figure 5.11 Nombre moyen des RREP diffusés dans le réseau.

La figure 5.12 illustre les résultats du temps de réponse moyen de routage en fonction du nombre de SU. Le temps de réponse de routage est le temps nécessaire pour un nœud source afin de trouver le nœud de destination. Donc c'est le temps écoulé pendant la phase de découverte et la phase de construction de la route. En comparaison avec le protocole AODV, nous remarquons que notre protocole de routage donne des bons résultats en termes de temps de réponse de routage. En effet, la diffusion d'un paquet RREQ à tous les nœuds voisins prend beaucoup plus de temps pour trouver la destination par rapport à la diffusion du même paquet aux seuls cluster-heads qui ont toutes les informations nécessaires sur leurs membres, une chose qui prouve la performance de notre protocole de routage.

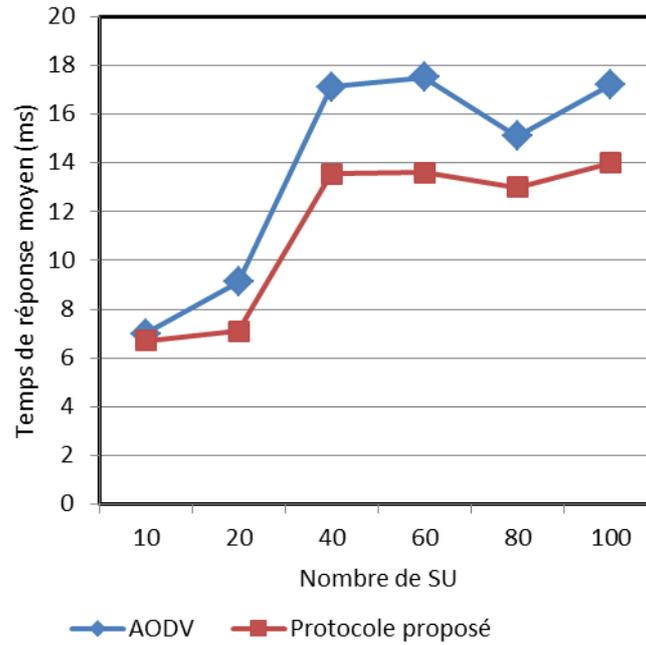


Figure 5.12 Temps moyen de réponse.

La figure 5.13 représente l'histogramme du taux moyen de satisfaction des SU en termes de réussite liée à trouver une route entre la source et la destination. Nous remarquons que le taux de satisfaction est influencé par le nombre des SU dans le réseau et il se diminue lentement avec l'augmentation du nombre des SU. Nous remarquons aussi que le taux moyen de réussite dans notre approche est supérieur à celui de AODV et cette différence de taux entre les deux protocoles augmente avec l'augmentation du nombre de SU. Cependant, notre protocole assure le bon fonctionnement du routage grâce au clustering qui facilite l'établissement d'une route entre la source et la destination.

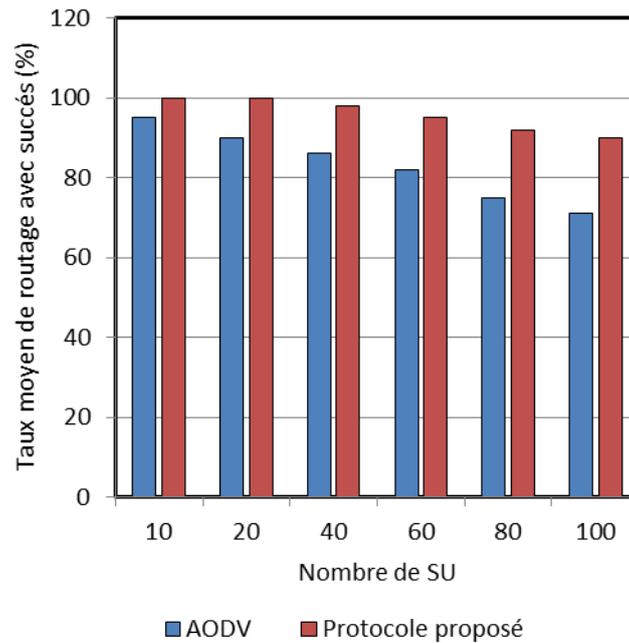


Figure 5.13 Taux moyen de satisfaction des SU.

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un nouveau protocole de routage dans les RRC. Ce protocole est basé essentiellement sur la technique de clustering où le cluster-head joue un rôle très important dans la découverte et la formation de la route. Les résultats obtenus en comparaison avec le protocole AODV montrent que notre protocole garantit un fonctionnement efficace de routage dans les RRC. En effet, il assure, d'une part, un degré de satisfaction élevé pour les nœuds du réseau en termes de réussite de trouver une route entre la source et la destination. D'autre part, notre protocole réduit le temps de réponse ce qui permet d'éviter les retards lors la découverte de la route et il réduit également le coût de la communication dans le réseau causé par l'envoi des paquets traditionnels de routage (les paquets RREQ, RREP et RERR).

Conclusion générale

La radio cognitive est une technologie émergente qui offre de grandes promesses pour améliorer l'utilisation de spectre dans les réseaux de communication modernes. Cette technologie permet à un terminal de détecter les portions inutilisées du spectre et d'adapter ses caractéristiques de transmission pour utiliser les bandes libres. Le problème majeur de la radio cognitive est la gestion de ces ressources spectrales disponibles sans interférer aux utilisateurs primaires tout en améliorant sa qualité de service.

En outre, l'introduction du principe de la radio cognitive dans le monde de réseau sans fil a poussé plusieurs recherches à traiter le problème de routage dans ces nouveaux réseaux car l'utilisation des protocoles de routage traditionnels des réseaux ad hoc directement dans les RRC entraîne de mauvaises performances en termes de débit, de délai, et de probabilité de perte de paquets d'où la nécessité de concevoir de nouveaux protocoles de routage appropriés à l'environnement de RRC.

Dans cette thèse, nous avons apporté de nouvelles approches pour une gestion efficace et intelligente de spectre et de routage dans un contexte RC en se basant sur le clustering (algorithme k-means++). Dans notre solution proposée pour la gestion intelligente des ressources spectrales existantes, nous avons eu recours aux SMA comme une résolution coopérative basée sur le clustering afin d'organiser l'accès au spectre disponible et optimiser la répartition de ces ressources spectrales. Les résultats obtenus ont prouvé l'efficacité de nos propositions en termes d'utilisation de spectre et la réussite des requêtes d'allocations tout en minimisant le nombre des messages échangés et le temps de réponse grâce à la coopération entre les agents, une chose qui a permis aussi d'éviter le problème de collision entre les SU.

Par ailleurs, dans notre solution destinée au problème de routage dans les RRC, nous avons proposé un nouveau protocole de routage basé également sur le clustering où les cluster-heads jouent un rôle très important dans les différentes phases de routage. Ce protocole est un protocole hybride qui se comporte d'une manière réactive si le chemin n'est pas connu au préalable et d'une manière proactive dans le cas inverse. Notre protocole améliore la découverte de route par l'élimination du problème des boucles de routage et la congestion du réseau et prend en compte la maintenance des routes affectées. En effet, les résultats montrent que notre protocole augmente le taux de satisfaction des nœuds en termes de route optimale trouvée. Il réduit également le temps de réponse et le coût de communication en introduisant les cluster-heads.

Dans la continuité de notre travail, nous envisageons de se concentrer sur le problème de routage pour améliorer de plus en plus le protocole proposé et le comparer avec d'autres protocoles de routage existants dans la littérature.

Liste des travaux de recherche

1. Revues internationales :

- a) F.Z. Benidris, B. Benmammar, F. Krief. "A novel approach to spectrum management in cognitive radio networks using agent coalition formation". International Journal of Wireless and Mobile Computing. Editor: Inderscience Publishers. Vol. 9, No. 1, September 2015. pp. 27-35. DOI: 10.1504/IJWMC.2015.071666.
Répertoriée DBLP, ACM Digital Library, Scopus | Elsevier, SJR (2014) = 0.302.
- b) F. Z. Benidris, B. Benmammar, F. T. Bendimerad, "An Efficient Spectrum Allocation Mechanism for Cognitive Radio Networks", WSEAS Transactions on Communications. Volume 13, 2014, pp. 534-547. Print ISSN: 1109-2742, E-ISSN: 2224-2864. Editor: World Scientific and Engineering Academy and Society.
Répertoriée Scopus | Elsevier, SJR (2014) = 0.213.

2. Conférences internationales :

- a) F. Z. Benidris, B. Benmammar, L. Merghem-Boulaïhia and M. Esseghir. "An Efficient Cluster-based Routing Protocol in Cognitive Radio Network", Proceedings of the International Conference on Advanced Communication Systems and Signal Processing (ICOSIP 2015). Tlemcen, Algeria. 8-9 November 2015.
- b) Amraoui, FZ. Benidris, B. Benmammar, F. Krief and FT. Bendimerad. "Toward cognitive radio resource management based on multi-agent systems for improvement of real-time application performance". Proceedings of the Fifth IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS'2012). Istanbul, Turkey. 7-10 May 2012. ISSN : 2157-4952, ISBN : 9781467302289, DOI: 10.1109/NTMS.2012.6208727. Page(s) : 288-291.
Répertoriée DBLP, IEEE Xplore Digital Library et Scopus | Elsevier.
- c) FZ. Benidris, B. Benmammar, FT. Bendimerad. "Comparative studies of artificial intelligence techniques in the context of cognitive radio", Proceedings of the International Conference on Multimedia Information Processing (ICMIP'2012), April 09-11th, 2012 Mascara, Algeria.

3. Communication orale :

- a) FZ. Benidris, B. Benmammam. "Gestion intelligente de spectre dans un contexte radio cognitive", Premières Journées du Laboratoire de Télécommunications (JLTT' 2014), du 27 au 30 Avril 2014, Tlemcen, Algérie.

4. Stage et bourse :

- a) Bourse de 09 mois dans le cadre de bourse PROFAS B+ au titre de l'année universitaire 2014-2015 à l'université de technologie de Troyes (UTT).
- b) Stage de 10 jours à l'université de technologie de Troyes (UTT), 2013.
- c) Université d'été à Tlemcen de la recherche scientifique et technologique, 2011.

Liste des acronymes

ANN	Artificiel Neurone Network
AODV	Ad-hoc On Demand Distance Vector
ASMAC	Ad hoc Secondary system MAC
BS	Base Station
CAODV	Cognitive Ad-hoc On-demand Distance Vector
CCC	Canal de Contrôle Commun
CGSR	Cluster-head Gateway Switch Routing
CHD	Cluster-Head de la Destination
CHI	Cluster-Head Intermédiaire
CHS	Cluster-Head de la Source
CNP	Contract Net Protocol
CTMC	Continuous Time Markov Chain
CRNMAC	Cognitive Radio Network MAC
CRTC	Canadian Radio television and Telecommunications Commission
DDMAC	Distance-Dependent MAC
DSAP	Dynamic Spectrum Access Protocol
DSDV	Destination Sequenced Distance Vector
DSR	Dynamic Source Routing
EAR	Efficient and Accurate link-quality monitoR
ETT	Expected Transmission Time
ETX	Expected Transmission Count
FCC	Federal Communications Commission
FIFO	First Input First Output
FIPA	Foundation of Intelligent Physical Agent
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communication
HMM	Hidden Markov Model
HSR	Hierarchical State Routing
IA	Intelligence Artificielle
IAD	Intelligence Artificielle Distribuée
IARP	IntrA-zone Routing Protocol
ID	IDentifiant
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IERP	IntEr-zone Routing Protocol
IP	Internet Protocol
ISM	Industrielles, Scientifiques et Médicales
ITU	International Telecommunication Union
LAN	Local Area Network
MAC	Media Access Control
MSCRP	Multi-hop Single-transceiver Cognitive Radio Networks Routing Protocol
OLSR	Optimized Link State Routing
OSI	Open Systems Interconnection
PU	Primary User
QoS	Quality of Service

RC	Radio Cognitive
RERR	Route ERRor
RNA	Réseau de Neurones Artificiels
RRC	Réseau à Radio Cognitive
RREP	Route REPlay
RREQ	Route REQuest
TV	TeleVision
SAMER	Spectrum Aware MESH Routing
SCRP	Spectrum-aware Cluster-based Routing Protocol
SDR	Software Defined Radio
SEARCH	SpEctrum Aware Routing protocol for Cognitive ad-Hoc networks
SMA	Systèmes Multi-Agents
SORP	Spectrum-aware On demand Routing Protocol
SPEAR	SpEctrum-Aware Routing
STOD-RP	Spectrum-Tree based On-Demand Routing Protocol
SU	Secondary User
WiFi	Wireless Fidelity
ZRP	Zone Routing Protocol

Bibliographie

- [1] M. Marcus, C.J. Burtle, B. Franca, A. Lahjouji and N. McNeil. “Federal Communications Commission (FCC): Spectrum Policy Task Force”. ET Docket no. 02-135. 2002.
- [2] J. Mitola III, “Cognitive radio for flexible mobile multimedia communication”, IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications (MoMuC), Novembre 1999, pp. 3–10.
- [3] J. Mitola. “Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio”. PhD thesis, Royal Inst. Tech. (KTH), Stockholm, 2000.
- [4] FCC (2003) FCC 03-322 [Online]. <http://hraunfoss.fcc.gov/edocspublic/attachmatch/FCC-03-322A1.pdf>.
- [5] ITU-R Report SM.2152. “Definitions of software defined radio (SDR) and cognitive radio system (CRS)”. 2009.
- [6] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, “Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey,” *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, vol. 50 , Issue 13, pp. 2127 – 2159, 2006.
- [7] S. Haykin, “Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Février 2005, vol. 23, pp. 201–220.
- [8] Software Defined Radio Forum (2007). “ SDRF Cognitive Radio Definitions” (Working Paper No. SDRF-06-R-0011-V1.0.0). Retrieved from Wireless Innovation Forum website: http://www.sdrforum.org/pages/documentLibrary/documents/SDRF-06-R-0011-V1_0_0.pdf.
- [9] Y. Lakys, “Filtres a fréquence agile totalement actifs : théorie générale et circuits de validation en TECHNOLOGIE SiGe BiCMOS 0.25µm”, thèse de doctorat, université de bordeaux, décembre 2009.
- [10] D. Ouattara, “Apport des réseaux intelligents aux usages et pratiques en e-santé : Une architecture flexible basée sur la technologie radio cognitive pour un suivi efficace et temps réel des patients”. Thèse de doctorat, université de bordeaux 1, novembre 2014.
- [11] J. Palicot, “Cognitive radio: an enabling technology for the green radio communications concept”, in *Proc. the 2009 ACM International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing: Connecting the World Wirelessly, IWCMC '09*, pp. 489-494, 2009.
- [12] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, “A survey on spectrum management in cognitive radio networks”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 4, pp. 40–48, 2008.
- [13] Z. Tabakovic, “A Survey of Cognitive Radio Systems”, Croatian Post and Electronic Communications Agency, Jurišićeva 13, Zagreb, Croatia, 2000.
- [14] I. F. Akyildiz, W.Y. Lee, and K. R. Chowdhury, “CRAHNs : Cognitive Radio Ad Hoc Networks”, Elsevier, Vol. 7, No. 5, Jul. 2009, p.810-836
- [15] W. Y. Lee, “Spectrum management in cognitive radio wireless networks”, thèse de Doctorat, institut de technologie de Géorgie, 2009.
- [16] B. Benmammam and A. Amraoui. “Réseaux de radio cognitive : Allocation des ressources radio et accès dynamique au spectre”. Preprint, arXiv:1407.2705, Juillet 2014.
- [17] Wireless World Research Forum, “Cognitive radio and management of spectrum and radio resources in reconfigurable networks,” WWRF Working Group 6 White Paper, 2005.
- [18] E. Hossain, D. Niyato, Z. Han, “Dynamic spectrum access and management in cognitive radio networks. Cambridge”: Cambridge University Press, 2009.
- [19] L. Giupponi and C. Ibars, “Cooperative Cognitive Systems, Cognitive Radio Systems”, Wei Wang (Ed.), ISBN: 978-953-307-021-6, InTech, (2009). Available from: <http://www.intechopen.com/books/cognitiveradio-systems/cooperative-cognitive-systems>
- [20] R. Laraki , J. Renault, and S. Sorin, “Bases Mathématiques de la théorie des jeux”. Les éditions de l'école polytechnique; Edition 2013, 186 pages.

- [21] O. F. Rodriguez, S. Primak, V. Kontorovich, and A. Shami, "A Game Theory Interpretation for Multiple Access in Cognitive Radio Networks with Random Number of Secondary Users", *Computer Science and Game Theory*, Mai 2013.
- [22] H.S. Mohammadian, B. Abolhassani, "Spectrum sharing among multiple secondary users in cognitive radio networks". 4th International Conference, Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS), p.1-5, Dec. 2010.
- [23] T. Manna, I. S. Misra, "Game theoretic spectrum sharing for cognitive radios". 2012 International Conference, Communications, Devices and Intelligent Systems (CODIS), p.33-36, Dec. 2012.
- [24] M. Rasti, A. R. Sharafat, and B. Seyfe, "Pareto-efficient and goal-driven power control in wireless networks: A game-theoretic approach with a novel pricing scheme". *IEEE/ACM Transactions on Networks*, vol. 17, pp. 556–569. 2009.
- [25] C. Yang, J. Li, and Z. Tian, "Optimal power control for cognitive radio networks under coupled interference constraints: A cooperative game-theoretic perspective". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, pp. 1696-1706. 2010.
- [26] D. Cabric, S. Mishra, D. Willkomm, R. Brodersen, and A. Wolisz, "A cognitive radio approach for usage of virtual unlicensed spectrum", in *Proceedings of the 14th IST Mobile and Wireless Communications Summit*, June 2005.
- [27] V. Brik, E. Rozner, S. Banarjee, and P. Bahl, "DSAP: A protocol for coordinated spectrum access", in *Proceedings of the IEEE DySPAN Conference*, Nov. 2005, pp. 611–614.
- [28] Q. Zhao, L. Tong, and A. Swami, "Decentralized cognitive MAC for dynamic spectrum access," in *Proceedings of the IEEE DySPAN Conference*, Nov. 2005, pp. 224–232.
- [29] T. Shu, S. Cui, and M. Krunz, "Medium access control for multi-channel parallel transmission in cognitive radio networks", in *Proceedings of the IEEE GLOBECOM Conference*, Nov. 2006.
- [30] H. Bany Salameh, M. Krunz, and O. Younis, "Distance- and traffic aware channel assignment in cognitive radio networks", in *Proceedings of the IEEE SECON Conference*, June 2008.
- [31] S. Sankaranarayanan, P. Papadimitratos, A. Mishra, and S. Hershey, "A bandwidth sharing approach to improve licensed spectrum utilization," in *Proceedings of the IEEE DySPAN Conference*, Nov. 2005, pp. 279–288.
- [32] Y. Yuan, P. Bahl, R. Chandra, P. Chou, J. Ferrell, T. Moscibroda, S. Narlanka, and Y. Wu, "Knows: cognitive networking over white spaces," in *Proceedings of the IEEE DySPAN Conference*, April 2007, pp. 416–427.
- [33] L. Cao, and H. Zheng, "Distributed spectrum allocation via local bargaining". *SECON: Proceedings of IEEE Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, pp. 475–486, 2005.
- [34] R. Murawski and E. Ekici, "Backward-compatible dynamic spectrum leasing for 802.11-based wireless networks". *Proceedings of IEEE GLOBECOM*, pp. 1-6. 2010.
- [35] S. Haykin, "Neural Networks: A Comprehensive Foundation". Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1999.
- [36] A. Fehske, J. Gaeddert, and J. H. Reed, "A new approach to signal classification using spectral correlation and neural networks," in *Proc. 1st IEEE Int. Symp. New Frontiers DySPAN*, Baltimore, MD, Nov. 8–11, 2005, pp. 144–150.
- [37] J. H. Reed et al., "Development of a Cognitive Engine and Analysis of WRAN Cognitive Radio Algorithms—Phase I," *Wireless @ Virginia Tech*, Virginia Polytech. Inst. State Univ., Blacksburg, VA, Dec. 2005.
- [38] B. Ustundag and O. Orcay, "Pattern based encoding for cognitive communication," in *Proc. 3rd Int. Conf. CrownCom*, Singapore, May 15–17, 2008, pp. 1–6.
- [39] O. Orcay and B. Ustundag, "Pattern recognition in cognitive communication," in *Proc. 23rd ISCIS*, Istanbul, Turkey, Oct. 27–29, 2008, pp. 1–6.
- [40] L. R. Rabiner, "A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition," *Proc. IEEE*, vol. 77, no. 2, pp. 257–286, Feb. 1989.
- [41] B. Wang, Z. Ji, and K.J.R. Liu. "Primary-prioritized Markov approach for dynamic spectrum access", *2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, vol.1 and 2, pp.495-503, 2007.

- [42] X. Zhu, L. Shen, and T.S. P. Yum, "Analysis of cognitive radio spectrum access with optimal channel reservation", *IEEE Commun. Letters*, vol. 11, no.4, pp.304-306, Apr. 2007.
- [43] P.K. Tang, Y.H. Chew, L.C. Ong, and M.K. Haldar, "Performance of secondary radios in spectrum sharing with prioritized primary access", *IEEE MILCOM 2006*, vol.1-7, pp.1273-1279.
- [44] Y. Xing, R. Chandramouli, S. Mangold, and S. Shankar, "Dynamic spectrum access in open spectrum wireless network", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, pp.626-636, Mar. 2006.
- [45] L. Wang; Y. Zhu, "A spectrum sharing scheme for cognitive radio networks", in *Proc. International Conference on Communications and Networking in China, ChinaCOM 2009*, 26-28 Aug. 2009, pp1 – 4.
- [46] T. Vallée, M. Yildizoglu, "Présentation des algorithmes génétiques et de leurs applications en économie", Document de travail n° 2001-3, IFREDE-E3i, Université Montesquieu Bordeaux IV, septembre 2001.
- [47] M. J. Kaur, M. Uddin, and H. K. Verma, "Optimization of QoS Parameters in Cognitive Radio Using Adaptive Genetic Algorithm", *International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN)*, Vol. 4, No. 2, 2012, 15 Pages.
- [48] S. Chen, T. R. Newman, J. B. Evans, and A. M. Wyglinski, "Genetic algorithm-based optimization for cognitive radio networks," *Sarnoff 10 Proceedings of the 33rd IEEE Conference*, Sarnoff, 2010.
- [49] B. Hou, Y. Zu, W. Li, G. Liu, and J. Ding, "Cognitive Radio Spectrum Allocation Strategy Based on Improved Genetic Algorithm". *Communications and Network* (2013), 5, 22-26.
- [50] F. Ye, R. Yang, Y. Li, "Genetic spectrum assignment model with constraints in cognitive radio networks". *International Journal of Computer Network and Information Security* (2011), 4, 39-45.
- [51] F. Z. Benidris, B. Benmammar, F. T. Bendimerad, "An Efficient Spectrum Allocation Mechanism for Cognitive Radio Networks", *WSEAS Transactions on Communications* (2014), Volume 13, pp. 534-547.
- [52] F. Z. Benidris, B. Benmammar, F. Krief. "A novel approach to spectrum management in cognitive radio networks using agent coalition formation". *International Journal of Wireless and Mobile Computing*, Vol. 9, No. 1, 2015.
- [53] S. labidi and W. Lejouad, "De l'intelligence artificielle distribuée aux systèmes multi-agents". Rapport de recherche n° 2004. INRIA, Août 1993.
- [54] J. Ferber, "Multi-Agent System: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence", Addison Wesley Longman, 1999.
- [55] Y. Demazeau, J.P. Muller, "Decentralized Artificial Intelligence", Elsevier Science Publisher, pp. 3-10, 1991.
- [56] M. Wooldridge and N.R. Jennings, "Intelligent agent: theory and practice", *The knowledge Engineering Review*, Juin 1995, vol.10, n° 2, pp.115-152.
- [57] M. Gouasmi, "Intégration d'ontologie dans les actes de communication inter-agents", mémoire d'ingénieur, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2005.
- [58] F. Klein, "Contrôle d'un Système Multi-Agents Réactif par Modélisation et Apprentissage de sa Dynamique Globale", thèse Doctorat de l'université Nancy 2, 2009.
- [59] E. Trigui, "Gestion multi-agents du spectre pour des terminaux mobiles à radio cognitive", thèse de doctorat, université de technologie de Troyes, 2013.
- [60] U. Mir, "Utilization of Cooperative Multiagent Systems for Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks", thèse de doctorat, université de technologie de Troyes, 2013.
- [61] J. Li, C. Yang, "A Markovian Game-Theoretical Power Control Approach In Cognitive Radio Networks: A Multi-Agent Learning Perspective", *Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, 2010 International Conference on 2010.
- [62] U. Mir, L. Merghem-Boulahia, M. Esseghir and D. Gaïti. "Dynamic Spectrum Sharing for Cognitive Radio Networks using Multiagent System", *The 8th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference - Wireless Consumer Communication and Networking*. 2011.
- [63] U. Mir, L. Merghem-Boulahia and D. Gaïti, "A cooperative multiagent based spectrum sharing". in *Proc. 6th Annu. Advanced International Conference on Telecommunications*, Barcelona, 2010.

- [64] A. Ahmed, M. Mubashir Hassan, O. Sohaib, W. Hussain and M. Qasim Khan, "An Agent Based Architecture for Cognitive Spectrum Management", Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2011.
- [65] X. Jiang, H. Ivan, and R. Anita, "Cognitive radio resource management using multi-agent systems," in Proc. 4th Annu. IEEE International Conf. Consumer Communications and Networking, Vegas, 2007, pp. 1123-1127.
- [66] L. Qian, F. Ye, L. Gao, X. Gan, T. Chu, X. Tian, X. Wang, and 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.
- [67] H. Li, "Multi-agent Q-Learning for Competitive Spectrum Access in Cognitive Radio Systems", Networking Technologies for Software Defined Radio (SDR) Networks, 2010 Fifth IEEE Workshop on 2010.
- [68] C. Zhang, V. Lesser, and P. Shenoy, "A multi-agent learning approach to online distributed resource allocation," Proc. International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 09), 2009.
- [69] C. Wu, K. Chowdhury, M. Di Felice, and W. Meleis, "Spectrum Management of Cognitive Radio Using Multi-agent Reinforcement Learning", Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), Toronto, Canada, 2010.
- [70] Z.Feng, K .Yu, Y .Ji, P.Z hang, L.VOK, and Y. Zhang, "Multi-access Radio Resource Management using Multi-Agent System", IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Las Vegas, Nevada, USA, 3-6 April 2006, v.1, p. 63-68, 2006.
- [71] H. M. Kelash, H. M. Faheem, and M. Amoon , "A Multiagent System for Distributed Systems Management", proceedings of world academy of science, engineering and technology volume 11february 2006 ISSN 1307-6884.
- [72] T. Lemlouma, "Le routage dans les réseaux mobiles Ad hoc". Mémoire de Master, University of USTHB, Sept. 2000.
- [73] Y. Sarr, "Métriques de routage dans les réseaux maillés sans fil". Mémoire numérique, Université de Montréal, 2011.
- [74] D.S.J.D. Couto, D. Aguayo, J. Bicket, R. Morris, "A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing, Wireless Networks", 11, 419-434. 2005.
- [75] R. Draves, J. Padhye, and B. Zill, "Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks". Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking. ACM, Philadelphia, PA, USA, 114-128. 2004.
- [76] K. H. Kim, and K. G. Shin, "On accurate measurement of link quality in multi-hop wireless mesh networks". Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile computing and networking. ACM, Los Angeles, CA, USA, 38-49. 2006.
- [77] M.A. Ayachi, "Contributions à la détection des comportements malhonnêtes dans les réseaux ad hoc AODV par analyse de la confiance implicite". Université Rennes 1; Université Européenne de Bretagne; Université 7 Novembre à Carthage, 2011.
- [78] C.E. Perkins and P. Bhagwat. "Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers". In Proc. of the conference on Communications architectures, protocols and applications (SIGCOMM'94), pages 244–254. ACM, August 1994.
- [79] T. Clausen and P. Jacquet. "Optimized Link State Routing Protocol OLSR". <http://tools.ietf.org/html/rfc3626>, October 2003. RFC3626.
- [80] C. E. Perkins and E.M. Royer. "Ad-hoc on-demand distance vector routing". In Proc. 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, 1999. Proceedings (WMCSA'99), volume 2, pages 90–100. IEEE Computer Society, February 1999.
- [81] D. B. Johnson and D. A. Maltz. "Dynamic source routing in ad hoc wireless networks". In Thomasz Imielinski and Hank Korth, editors, Mobile Computing, volume 353, chapter 5, pages 153–181. Kluwer Academic Publishers, 1996
- [82] Z. J. Hass, "A new routing protocol for the reconfigurable wireless networks". In Proc.of IEEE 6th International Conference on Universal Personal Communications Record., volume 2, pages 562–566, 1997.

- [83] B. Guizani, "Algorithmes de clustérisation et routage dans les réseaux Ad Hoc". Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2012.
- [84] M. Lehsaini, "Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique", thèse de doctorat, université de Tlemcen, 2009.
- [85] D. Walden, "The Bellman-Ford Algorithm and "Distributed Bellman-Ford". Available at: <http://www.walden-family.com/public/bfhistory.pdf>, 2008.
- [86] C. BURGOD, "Contribution à la s'écuration du routage dans les réseaux ad hoc". Thèse de doctorat, université de Limoge, 2009.
- [87] G. Pei, M. Gerla, and T.W. Chen. "Fisheye State Routing: A Routing Scheme for Ad Hoc Wireless Networks". In Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Communications (ICC 2000), volume 1, pages 70 –74, New Orleans, Louisiana, USA, June 18-22 2000. IEEE Communications Society. ISBN 0-7803-6283-7.
- [88] G. Pei, M. Gerla, X. Hong, and C. Chiang, "A wireless hierarchical routing protocol with group mobility", in: Proceedings of Wireless Communications and Networking, New Orleans, 1999.
- [89] G. Cheng, W. Liu and Y. Li, and Cheng, "Spectrum aware on-demand routing in cognitive radio networks", 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007.pp.571—574.
- [90] L. Ding, T. Melodia, S. N. Batalama, J. D. Matyjas, and M. J. Medley, "Cross-layer routing and dynamic spectrum allocation in cognitive radio ad hoc networks". IEEE Transactions on Vehicular Technology, 59(4), 1969–1979. 2010.
- [91] X. Huang, L.Wang, G. F. Hu, and S. Kumar, "Stability-capacity-adaptive routing for high-mobility multihop cognitive radio networks". IEEE Transactions on Vehicular Technology, 60(6), 2714–2729. 2011.
- [92] K. R. Chowdhury and M. Di Felice, "SEARCH: A routing protocol for mobile cognitive radio ad-hoc networks". In Proceedings of Sarnoff Symposium (SARNOFF) (pp. 1–6). Princeton, NJ. 2009.
- [93] H. Ma, L. Zheng, X. Ma, and Y. Luo, "Spectrum aware routing for multi-hop cognitive radio networks with a single transceiver". In Proceedings of 3rd international conference on cognitive radio oriented wireless networks and communications (CROWNCOM) (pp. 1–6). Singapore. 2008.
- [94] L. Xie and J. Xi, "A QoS routing algorithm for group communications in cognitive radio ad hoc networks". In Proceedings of international conference on mechatronic science, electrical engineering and computer (MEC) (pp. 1953–1956). Jilin, China. 2011.
- [95] K. R. Chowdhury and I. F. Akyildiz, "CRP: A routing protocol for cognitive radio ad hoc networks". IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 29(4), 794–804. 2011.
- [96] L. Hou, K. H. Yeung and K. Y. Wong, "A vision of energy-efficient routing for cognitive radio ad hoc networks". In Proceedings of 6th international symposium on wireless and pervasive computing (ISWPC) (pp. 1–4). Hong Kong, China. 2011.
- [97] M. Zeeshan, M. F. Manzoor and J. Qadir, "Backup channel and cooperative channel switching on-demand routing protocol for multi-hop cognitive radio ad hoc networks (BCCCS)". In Proceedings of 6th international conference on emerging technologies (ICET) (pp. 394–399). Islamabad, Pakistan. 2010.
- [98] A. Varade and S. Kulkarni, "Overview and literature survey on routing protocols for cognitive radio networks", International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE), November 2014, Vol.1, n°10.
- [99] Sara Cacciapuoti, C. Calcagone and M. Caleffi. "CAODV: Routing in mobile ad hoc cognitive radio networks". IEEE conference publication. Pages 1-5. 2010.
- [100] H. Ma, and L. Zheng, and X. Ma lu, "Spectrum-aware routing for multi-hop cognitive radio networks with a single transceiver", Proceedings of the Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom). 2008.
- [101] K. R. Chowdhury and M.D. Felice, "SEARCH: A routing protocol for mobile cognitive radio ad hoc networks". IEEE SARNOFF 2009. Pages 1-6.
- [102] A. Sampath, L. Yang, L. Cao, H. Zheng and B. Y. Zhaou. "High Throughput Spectrum-aware Routing for Cognitive Radio Networks". IEEE crowncom 2008.

- [103] I. Pefkianakis, S. H.Y. Wong et S. Lu, "SAMER: Spectrum Aware Mesh Routing in Cognitive Radio Networks". 3rd IEEE Symposium 2008. Pages 1-5. 2008.
- [104] G. Cheng, W. Liu, and Y. L. Cheng, "Spectrum aware on-demand routing in cognitive radio networks", 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007.pp.571—574.
- [105] G. M. Zhu, I. F. Akyildiz and G.S. Kuo, "STOD-RP: A Spectrum-Tree Based On-Demand Routing Protocol for Multi-Hop Cognitive Radio Networks". Global Telecommunication Conference 2008. Pages 1-5. 2008.
- [106] A. C Talay and D. T Altılar, "United Nodes: Cluster-based routing protocol for mobile cognitive radio networks", IET Communication 2011, Vol.5, Issue 15, pp. 2097 – 2105.
- [107] W. Jiang, H. Cui, and J. Chen: "Spectrum-aware cluster-based routing protocol for multiple-hop cognitive wireless network". Proc. IEEE Int. Conf. on Communications Technology and Applications (ICCTA'09), 16–18 October 2009, pp. 288–294.
- [108] N. Ailon, R. Jaiswal, and C. Monteleoni. "Streaming k-means approximation". In Advances in Neural Information Processing Systems, 2009.
- [109] Bahmani, B. Moseley, A. Vattani, R. Kumar, and S. Vassilvitskii. "Scalable k-means++". VLDB Journal, 2012.
- [110] F. Chamroukhi, "Projet 3: Algorithme des centres moblies (K-means) pour la classification automatique", Licence 2 Sciences Pour l'Ingénieur, Université de Toulon, 2014.
- [111] Arthur and S. Vassilvitskii. "k-means++: the advantages of careful seeding". In Proceedings of the eighteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms, pages 1027–1035, Philadelphia, PA, USA, 2007. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [112] Y. Zhang, J. Zheng and H. Chen, "Cognitive Radio Networks: Architectures, Protocols, and Standards", CRC Press, 2010. <http://dx.doi.org/10.1201/EBK1420077759>
- [113] Kim, L. Le, and E. Hossain, "Joint rate and power allocation for cognitive radios in dynamic spectrum access environment", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 7, no. 12, pp. 5517–5527, 2008.
- [114] M. A. McHenry, "NSF spectrum occupancy measurements project summary", Shared Spectrum Company Report, Vienna, August 2005.
- [115] Java Agent Development Framework. [online] <http://jade.tilab.com/> (Accessed 3 Jun 2014).
- [116] H. Zheng and C. Peng, "Collaboration and fairness in opportunistic spectrum access", in Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC '05), pp. 3132–3136, Seoul, Korea, May 2005.

Résumé

La récente évolution de la technologie sans fil suit un rythme effréné dans notre société moderne. Cette croissance explosive des services sans fil engendre une forte demande en termes de spectre radio, suscitant ainsi une pénurie de la ressource spectrale. La radio cognitive est apparue comme un nouveau paradigme pour améliorer l'utilisation du spectre radio en permettant d'y accéder de manière opportuniste. Cependant, la mise en œuvre du concept cognitif soulève des défis uniques en raison de leur coexistence avec les réseaux primaires ainsi que les diverses exigences de qualité de service. C'est dans ce contexte que les fonctions de la gestion de spectre sont nécessaires pour le bon fonctionnement de la radio cognitive afin d'éviter les collisions et les interférences et maximiser l'utilisation du spectre. Par ailleurs, La vertu dynamique de ce type de réseau pose de nouveaux défis techniques sur la conception de son algorithme de routage d'où la nécessité de concevoir de nouveaux protocoles de routage appropriés à cet environnement cognitif. L'objectif de cette thèse est de proposer de nouvelles solutions aux problèmes de la gestion de spectre et routage dans les réseaux radio cognitive. En effet, La première solution se focalise sur la gestion intelligente de spectre où l'idée de coopération multi-agents entre les utilisateurs est mise en place dans le réseau radio cognitive qui est décomposé en clusters en utilisant une technique de regroupement par apprentissage. En outre, la deuxième solution qui s'intéresse au problème de routage se base également sur le clustering par la proposition d'un protocole de routage qui se comporte d'une manière réactive ou proactive selon les informations acquis par les cluster-heads. Les résultats de simulation obtenus assurent la satisfaction des utilisateurs radio cognitive et prouvent la pertinence et la performance de nos approches.

Mots-clés : Radio cognitive, Gestion de spectre, Protocole de routage, Système multi-agent, Clustering, Intelligence artificielle.

Abstract

The recent evolution of wireless technology follows a frenetic pace in our modern society. This explosive growth of wireless services generates a high demand in terms of radio spectrum, thereby creating a shortage of spectrum resources. The cognitive radio has emerged as a new paradigm for improving the use of the radio spectrum by allowing access opportunistically. However, the implementation of cognitive concept raises unique challenges because of their coexistence with the primary networks and the various quality-of-services requirements. In this context, the functions of spectrum management are necessary for the proper operation of cognitive radio to avoid collisions and interference and maximize the use of the spectrum. Furthermore, the dynamic virtue of this type of network poses new technical challenges for the design of its routing algorithm; hence the need to design appropriate new routing protocols in this cognitive environment. The objective of this thesis is to propose new solutions to the management of spectrum and routing in cognitive radio networks. Indeed, the first solution focuses on the intelligent management of the spectrum where the idea of multi-agent cooperation between users is implemented in a cognitive radio network which is divided into clusters using a clustering technique by Learning. Additionally, the second solution that focuses on the routing issue is also based on clustering by the proposal of a hierarchical routing protocol that behaves in a reactive or proactive manner according to information acquired by cluster-heads. The simulation results obtained ensure the satisfaction of cognitive radio users and prove the relevance and performance of our approaches.

Key-words: Cognitive radio, Spectrum management, Routing protocol, Multi-agent system, Clustering, Artificial intelligence.

ملخص

التطورات الاخيرة التي عرفتها التكنولوجيا اللاسلكية تتبع ايقاعا متسارعا في مجتمعنا المعاصر. هذا النمو الهائل للخدمات اللاسلكية يولد ارتفاع الطلب من حيث الطيف الترددي مما يخلق نقصا في موارد الطيف. وقد برز الراديو المعرفي كنموذج جديد لتحسين استخدام الطيف الترددي من خلال استعماله بطريقة نفعية. ومع ذلك، فإن تنفيذ مفهوم الراديو المعرفي يثير تحديات فريدة من نوعها بسبب تعايشهم مع الشبكات الرئيسية ومختلف متطلبات جودة الخدمة. وفي هذا السياق فإن وظائف تسيير الطيف ضرورية لتحسين عمل الراديو المعرفي من اجل تجنب التصادم والتداخلات وتحقيق الاستفادة القصوى من الطيف. وعلاوة على ذلك، في ظل ديناميكية هذا النوع من الشبكات تظهر تحديات تقنية جديدة لتصميم خوارزمية التوجيه الخاص به، ومن هنا جاءت الحاجة لتصميم بروتوكولات توجيه جديدة مناسبة لهذه البيئة المعرفية. الهدف من هذه الرسالة هو اقتراح حلول جديدة لتسيير الطيف والتوجيه في شبكات الراديو المعرفي. في الواقع، يركز الحل الأول على التسيير الذكي للطيف الذي يتم فيه تنفيذ فكرة التعاون متعدد الوكلاء بين المستخدمين في شبكة الراديو المعرفي التي تنقسم إلى مجموعات باستخدام تقنية التجمع التعليمي. بالإضافة إلى ذلك، يستند الحل الثاني أيضا على المجموعات لحل مسألة التوجيه باقتراح بروتوكول التوجيه الذي يتصرف بطريقة رد الفعل أو بطريقة استباقية وفقا للمعلومات التي تحصل عليها رؤساء المجموعات. نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها تضمن ارضاء مستخدمي الراديو المعرفي وتثبت أهمية وفعالية حلولنا المقترحة.

الكلمات الرئيسية : الراديو المعرفي، تسيير الطيف، بروتوكول التوجيه، نظام متعدد الوكلاء، التجمع، الذكاء الاصطناعي.