

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ALLOCATION DYNAMIQUE DES BANDES SPECTRALES DANS LES RÉSEAUX
SANS-FIL À RADIO COGNITIVE

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INFORMATIQUE

PAR
AHMED BEN DHAOU

SEPTEMBRE 2011

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout d'abord mon professeur et directeur de recherche, Professeur Wessam Ajib, de m'avoir montré l'intérêt, mais aussi l'exigence de la recherche en informatique. Merci pour sa disponibilité, sa patience et la pertinence de ses remarques tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Je tiens à remercier aussi toute l'équipe pédagogique de l'Université du Québec à Montréal et les intervenants professionnels responsables de la formation Maîtrise en Informatique. La qualité des cours ainsi que les conditions de travail et d'encadrement au sein du département d'informatique m'auront été très bénéfiques.

J'exprime ma profonde gratitude à ma famille en Tunisie pour leur encouragement et tout leur apport qui n'était pas moindre.

Je tiens aussi à remercier mon ami, M. Elnahdi Driouch, pour le travail exemplaire lors de la réalisation de notre article de recherche et pour ses conseils et son appui tout au long de ma formation.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	viii
RÉSUMÉ	ix
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I	
INTRODUCTION, MOTIVATION ET PROBLÉMATIQUE	6
1.1 La radio cognitive	6
1.1.1 La capacité cognitive	6
1.1.2 L'auto-configuration de la radio cognitive	9
1.1.3 La gestion spectrale	12
1.1.4 La mobilité spectrale	12
1.1.5 L'architecture des réseaux de radios cognitives	13
1.1.6 Les RRC opérant sur des bandes spectrales licenciées ou non-licenciées	16
1.2 Motivation	18
1.3 Problématique : le partage des bandes spectrales dans les réseaux de radios cognitives	20
CHAPITRE II	
ÉTAT DE L'ART	22
2.1 Le partage des bandes spectrales	23
2.2 Les techniques de partage spectral	24
2.3 Le partage spectral au sein d'un réseau de radios cognitives	28
2.4 Le partage spectral entre différents réseaux de radios cognitives	29
2.5 Théorie des graphes	31
2.5.1 Graphe non-orienté	32

2.5.2	Définitions	33
2.5.3	Problème de coloration des sommets	33
2.6	Les approches d'allocation des bandes spectrales dans les réseaux de radios cognitives	35
2.6.1	Les approches basées sur la théorie des graphes	36
2.6.2	Les approches basées sur la théorie des jeux	41
2.6.3	Avantages et inconvénients des approches	41
CHAPITRE III		
CONTRIBUTION		43
3.1	Modèle du système	43
3.2	Description de la proposition	49
3.2.1	Problème de coloriage avec liste de couleurs valuées	49
3.2.2	Application de la formulation au réseau secondaire	51
3.2.3	L'algorithme glouton de partage de spectre : GSSA	53
3.2.4	Approche centralisée et défis liés à l'implémentation	56
3.3	Conclusion	57
CHAPITRE IV		
ÉVALUATION DES PERFORMANCES PAR SIMULATIONS		58
4.1	Outil et paramètres de simulation	58
4.1.1	Outil de simulation	58
4.1.2	Paramètres utilisés	58
4.2	Résultats et discussions	60
CONCLUSION		66
Bibliographie		68

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1 Cycle cognitif, FR désigne la fréquence radio. Figure adaptée de l'article de Akyildiz et al., 2006	8
1.2 Exemple de trous spectraux. Figure adaptée de l'article de Akyildiz et al., 2006	8
1.3 Fonctionnalités de communication des RRC (réseau de radios cognitives). Figure adaptée de l'article de Akyildiz et al., 2006	11
1.4 Coexistence entre deux types de réseau : réseau primaire et réseau secondaire. Figure adaptée de l'article de Akyildiz et al., 2006	15
1.5 Réseau à radio cognitive opérant sur les bandes spectrales licenciées. Figure adaptée de l'article de Akyildiz et al., 2006	17
1.6 Réseau à radio cognitive opérant sur les bandes spectrales non licenciées. Figure adaptée de l'article de Akyildiz et al., 2006	18
2.1 L'utilisation spectrale dans les États-Unis d'Amérique. Figure adaptée de l'article de Akyildiz et al., 2006	23
2.2 Réseau à radio cognitive opérant sur les bandes spectrales non licenciées. Figure adaptée de l'article de Akyildiz et al., 2006	28
2.3 Un exemple de graphe non-orienté d'ordre $ G = 8$ avec $V = \{1, \dots, 8\}$ sommets et $E = \{\{1, 3\}, \{2, 8\}, \{4, 3\}, \{4, 6\}, \{4, 7\}, \{5, 8\}, \{6, 3\}, \{6, 7\}, \{6, 8\}\}$ ou $\ G\ = 9$ arêtes	32
2.4 (a) Un coloriage de graphe valide et (b) Un coloriage de graphe invalide	34
2.5 Exemples de la coloration des sommets d'un graphe : (a) coloration avec le nombre optimal de couleurs, (b) coloration possible mais non optimale	35
2.6 (a) 8 URC qui communiquent entre eux en paires; les lignes en gras représentent les liens de transmission de données entre les URC et les lignes en pointillé représentent l'interférence entre deux URC. (b) La représentation en graphe de (a).	37

3.1	Un scénario de partage de spectre dans lequel deux paires émetteurs/récepteurs secondaires (US-Tx, US-Rx) coexistent avec un lien primaire (UP-Tx, UP-Rx)	45
3.2	Graphe coloré en maximisant la somme des poids des sommets choisis.	51
3.3	Un exemple de réseau secondaire modélisé en graphe, où 1,2,3 et 4 représentent les liens secondaires. A,B et C représentent les bandes spectrales. (2;3;0,4), (4;0,1;2), (2;1;4) et (0,3;0,2;5) représentent les débits maximaux (les poids) de chaque lien sur les trois bandes spectrales.	53
3.4	Schéma-bloc de l'algorithme GSSA de partage de spectre	55
4.1	Un exemple d'une cellule avec 20 communications secondaires et 8 communications primaires	59
4.2	Le débit global du réseau de radios cognitives en fonction des transmissions secondaires	62
4.3	Le débit global du réseau de radios cognitives en fonction des bandes spectrales disponibles	63
4.4	Le débit moyen de chaque transmission secondaire	64
4.5	Comparaison du débit global du système entre une recherche exhaustive optimale et l'algorithme GSSA	65

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
2.1 Comparaison des différents paradigmes des RRC. Tableau adapté de l'article de Goldsmith et al., 2009	27

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AUP	Allocation Uniforme de Puissance
BS	Bande Spectrale
BSL	Bande Spectrale Licenciée
BSNL	Bande Spectrale Non-Licenciée
CDMA	Accès multiple à répartition par code (<i>Code Division Multiple Access</i>)
CLCV	Coloriage avec Liste de Couleurs Valuées
FCC	Commission Fédérale des Communications (<i>Federal Communications Commission</i>)
FR	Fréquence Radio
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
ISM	Industrielle, Scientifique et Médicale
MAC	Couche de Contrôle d'accès au support (<i>Media Access Control</i>)
QdS	Qualité de Service
RC	Radio Cognitive
RL	Radio Logicielle (<i>Software Defined Radio</i>)
RRC	Réseau de Radios Cognitives
SINR	Rapport du Signal sur Bruit plus Interférence
SNR	Rapport signal bruit (<i>Signal-to-Noise Ratio</i>)
TDMA	Accès multiple à répartition de temps (<i>Time Division Multiple Access</i>)
UP	Utilisateur Primaire
US	Utilisateur Secondaire
URC	Utilisateur à Radio Cognitive

RÉSUMÉ

Dans ce document, nous proposons un algorithme heuristique efficace pour résoudre le problème de partage spectral dynamique dans les réseaux de radios cognitives. Cet algorithme fonctionne selon les principes du paradigme de transmissions cognitives simultanées (en anglais *underlay*) où des utilisateurs primaires et des utilisateurs secondaires transmettent simultanément sur la même bande spectrale. L'algorithme proposé est basé sur un modèle théorique de graphe. Premièrement, le réseau de radios cognitives est modélisé en un graphe dont les sommets possèdent des poids. Le problème de partage spectral se réduit à colorier les sommets du graphe. Les décisions de partage spectral sont prises au niveau d'un serveur spectral qui coordonne les transmissions secondaires afin de trouver les paires (transmission secondaire/bande spectrale) qui maximisent le débit global du système. Le serveur spectral est aussi responsable de protéger les transmissions des utilisateurs primaires de l'interférence causée par les transmissions des utilisateurs secondaires. La réussite de cette tâche se base sur une allocation appropriée des puissances de transmission pour les utilisateurs secondaires. Grâce à des simulations bien élaborées, nous démontrons que les performances de l'algorithme proposé en terme de débit global sont proches de celles de l'algorithme optimal. Les performances de notre algorithme illustrent le gain en performances dû à une augmentation de la diversité de sélection de bande passante et à une diversité de sélection d'utilisateurs secondaires.

Mots clés : algorithme de partage spectral, réseau de radios cognitives, théorie des graphes, systèmes de communication sans fil, simulation des réseaux.

INTRODUCTION

Les réseaux sans fil prennent de l'importance au fil des ans. En 1907, l'inventeur et physicien italien Guglielmo Marconi réalise le premier système télégraphe sans fil qui traverse l'océan Atlantique. Voilà maintenant une centaine d'années qui se sont écoulées et nous vivons l'impact de cet événement dans nos vies actuelles. La croissance fulgurante de l'utilisation des systèmes de communication sans fil et la forte expansion de l'Internet mobile dans le monde entier ont poussé les chercheurs à améliorer les performances de ces réseaux. L'évolution des systèmes de communication sans fil est marquée par l'apparition de nouveaux services et la venue de nouveaux appareils intelligents et conscients de l'environnement qui les entoure. Ces appareils sont capables de déterminer comment communiquer à la volée grâce à un usage dynamique des bandes spectrales (BS) pour améliorer leur connectivité et leur capacité.

En 1998, à l'institut royal de technologie KTH, Joseph Mitola III expose ses travaux sur une radio qui est consciente de l'environnement électromagnétique, qui est capable de modifier le comportement de sa couche physique et qui peut adopter des stratégies complexes (Mitola et Maguire, 1999). Radio cognitive (RC) est le nom de cette nouvelle approche de communication dans les réseaux sans fil. La radio cognitive a fait l'objet d'un intérêt particulier comme étant une technologie qui peut améliorer les performances des réseaux sans fil et l'efficacité de l'usage des BS.

En mai 2003, la Commission fédérale des communications (FCC) des États-Unis d'Amérique a convoqué des chercheurs pour créer un atelier, dans lequel l'impact de la RC sur l'utilisation spectrale est examiné et les problèmes liés à la réglementation de la RC sont étudiés. Au cours de cet atelier, Laren Van Wazer, conseiller spécial chez le bureau d'ingénierie et technologie de la FCC, a dit que la FCC désire « améliorer l'accès aux BS à travers une meilleure utilisation du temps, de la fréquence, de la puissance, de la bande passante et l'espace » et qu'elle croit profondément que la RC possède le potentiel d'accomplir cet objectif. Cependant, la FCC exige de bien clarifier les points

suivants (Neel *et al.*, 2004) :

- quels sont les paramètres d'opération nécessaires pour avoir la capacité d'adaptation et de flexibilité ;
- est-ce que la fiabilité des systèmes traditionnels sera affectée par l'incorporation de la RC ; et
- est-ce que son utilisation sera bénéfique ?

En d'autres termes, la RC va garantir une bande passante plus large pour les utilisateurs à radio cognitive (URC), à travers les différentes architectures hétérogènes sans fil. Cela est possible grâce aux techniques d'accès dynamique au spectre. Dans les réseaux sans fil actuels, l'allocation du spectre se fait de manière statique et ce sont des agences gouvernementales qui les allouent aux opérateurs détenteurs de licence. Récemment, dû à l'augmentation du volume d'utilisation du spectre électromagnétique, cette politique d'allocation a conduit à un encombrement dans certaines parties du spectre, tandis qu'une large portion allouée de ces BS est utilisée sporadiquement, ce qui conduit à une sous-utilisation spectrale (Akyildiz *et al.*, 2008). C'est pourquoi des techniques d'accès dynamique au spectre ont été proposées pour résoudre ces problèmes d'inefficacité spectrale. La technologie la plus appropriée pour relever ce défi est la radio cognitive. Cette radio est capable de partager les BS d'une manière opportuniste avec les utilisateurs primaires (UP) détenteurs de licence. Les réseaux de radios cognitives (RRC) ont la capacité de fournir une bande passante plus grande pour les utilisateurs mobiles grâce aux techniques d'accès dynamique et grâce aux architectures des réseaux sans fil hétérogènes. La réalisation de cet objectif (améliorer l'utilisation spectrale) est faisable uniquement par le biais de techniques dynamiques et efficaces de gestion des BS.

Certes la RC est une nouvelle approche qui favorise une meilleure utilisation des bandes spectrales, mais elle requiert l'intervention d'une autre technologie qui est la radio logicielle (*software defined radio*). Le principe de la radio logicielle (RL) est de permettre à un même système matériel d'exécuter plusieurs fonctions radios différentes. Pour y arriver, l'un des fondements du RL est de positionner la conversion entre les modes

analogiques et numériques aussi proches que possible de l'antenne, aussi bien à l'émission qu'à la réception. Ainsi, la RL peut tirer profit de la flexibilité, mais aussi des moyens de conception évolués du monde numérique. D'autre part, cette RL pousse à son extrême le besoin en flexibilité des équipements. La reconfiguration n'est plus ici une option ou une fonction évoluée, mais un élément intrinsèque.

Grâce à la RL, la réalisation de la RC devient possible et faisable. La RL offre des fonctions essentielles pour le bon fonctionnement de la RC. Parmi ces fonctions, nous pouvons citer la détection spectrale, le partage spectral, la décision spectrale et la mobilité spectrale. Ces fonctions sont regroupées dans ce qu'on appelle la gestion spectrale dans les réseaux de radios cognitives (Akyildiz *et al.*, 2008). Dans ce mémoire, nous insistons sur le partage spectral car il est certain qu'une allocation efficace des ressources améliore considérablement l'utilisation spectrale. Le partage spectral dans les RRC est une tâche considérée très fastidieuse. Plusieurs chercheurs exposent leurs travaux et jusqu'à ce jour, une solution optimale reste à trouver. Le partage spectral permet aux URC ou utilisateurs secondaires (US), d'accéder aux bandes spectrales licenciées quand ces dernières ne sont pas utilisées par les UP. Il existe plusieurs paradigmes d'accès dynamique aux BS que nous présentons par la suite dans ce mémoire.

Dans ce document, nous proposons un algorithme heuristique de partage dynamique des bandes spectrales dans les réseaux de radios cognitives. L'environnement radio de notre système supporte le paradigme de transmissions cognitives simultanées de partage des bandes spectrales, connu en anglais sous le nom *underlay*. Ce paradigme stipule que les URC peuvent transmettre en même temps que les UP sur la même bande spectrale, en se pliant à certaines conditions imposées par les UP. L'algorithme que nous proposons est basé sur un modèle théorique de graphe. La première étape consiste à modéliser le réseau de radios cognitives en graphe, où les sommets du graphe représentent les communications (ou liens) entre un émetteur URC et un récepteur URC. Ces sommets possèdent une liste de couleurs qui représentent les bandes spectrales disponibles pour chaque communication. Chaque couleur est munie d'un poids qui représente la capacité maximale possible de chaque bande spectrale. Ensuite, le problème de partage spectral

se résume à trouver et colorier les sommets du graphe que nous avons construit. Les décisions du partage spectral sont prises par un serveur spectral qui coordonne les transmissions des URC afin de trouver les meilleures paires transmission/bande spectrale qui maximisent le débit global de notre système. Ce serveur spectral est aussi responsable de protéger les transmissions des UP de l'effet indésirable, à savoir, l'interférence causée par les transmissions des URC. Cette protection est réalisée grâce à une allocation de puissance appropriée aux transmissions actives des URC. Enfin, nous montrons, grâce à des simulations, l'amélioration des performances apportée par notre algorithme proposé en terme de débit global du système. Cette amélioration de débit global est due à la capacité de notre algorithme à obtenir une plus grande diversité en sélectionnant judicieusement les transmissions à activer.

La suite de ce document est organisée comme suit. Le premier chapitre donne une introduction à la radio cognitive. En première partie, nous présentons les principales qualités de cette nouvelle technologie et les avantages liés à son adoption. Par la suite, nous dévoilons nos motivations pour étudier cette nouvelle approche. Enfin, dans la dernière partie, nous exposons notre plan de travail et l'objectif à atteindre ainsi que les défis que nous avons relevés durant l'élaboration de ce document. Dans le deuxième chapitre, nous présentons les travaux publiés dans le domaine d'allocation des bandes spectrales dans les réseaux de radios cognitives. Ce chapitre est composé de trois parties. Dans la première partie, nous décrivons le problème de partage spectral dans les RRC. Dans la deuxième partie, nous présentons les principes de la théorie des graphes utilisés par nous et par d'autres chercheurs pour résoudre ce problème de partage. Enfin, dans la troisième partie, nous présentons les approches utilisant la théorie des graphes et la théorie des jeux qui ont été développées par d'autres chercheurs. Par la suite, nous présentons dans le troisième chapitre notre nouveau algorithme pour résoudre le problème d'allocation efficace des bandes spectrales aux utilisateurs secondaires dans les RRC. Nous présentons le modèle du système utilisé avant de donner les principales définitions de la théorie des graphes qui seront utilisées dans le reste du chapitre. Nous formulons par la suite le problème d'ordonnement en tant que problème de coloration des sommets dans un graphe. Ensuite,

nous détaillons les différentes étapes de l'algorithme heuristique proposé. Finalement, dans le dernier chapitre, nous montrons l'efficacité de notre algorithme au moyen des simulations réalisées en utilisant l'environnement de développement MATLAB avant de conclure ce mémoire.

CHAPITRE I

INTRODUCTION, MOTIVATION ET PROBLÉMATIQUE

La prolifération rapide des télécommunications sans fil a donné naissance à de nouvelles technologies très excitantes. L'idée d'une radio cognitive pour les systèmes sans fil a été présentée, pour la première fois, dans un séminaire à l'institut royal de technologie KTH en 1998 par Joseph Mitola III, ensuite, dans sa thèse (Swami *et al.*, 1999) et finalement dans l'article de recherche (Mitola et Maguire, 1999). L'apparition de la radio cognitive a sollicité beaucoup d'intérêt dans le domaine de communication sans fil. La radio cognitive est une nouvelle approche des communications sans fil dont les émetteurs-récepteurs radio sont combinés intelligemment avec des capteurs (Lawton, 2010). Ces émetteurs-récepteurs radio sont dotés d'une adaptabilité à l'égard de l'environnement radio où ils se trouvent. Cette adaptabilité leur permet d'élargir leurs champs d'opérabilité. Ces émetteurs-récepteurs radio sont capables de surveiller les transmissions des UP et l'environnement radio, mais aussi de changer les paramètres de leurs transmissions, telles que la fréquence, la puissance de transmission, la modulation et les protocoles, si nécessaire pour réussir ou améliorer l'efficacité de la communication. Dans ce chapitre, nous allons présenter les particularités de la radio cognitive, la théorie qui se cache derrière ainsi que les techniques qui mettent en évidence ses avantages. Ensuite nous présentons les arguments qui nous encouragent à étudier et utiliser cette nouvelle approche. Enfin, nous terminerons par la présentation de la problématique que nous essayons de résoudre.

1.1 La radio cognitive

1.1.1 La capacité cognitive

La radio cognitive interagit avec son environnement en tout temps et à la volée pour déterminer les valeurs idéales des paramètres de communications. Afin de réaliser cette

interaction continue dans le temps, la RC doit détecter les changements subis par son environnement radio et s'y adapter dynamiquement pour empêcher l'interruption de la communication, ou pour améliorer la qualité de la transmission. En conséquence, la RC doit réaliser plusieurs fonctions regroupées dans trois étapes. La première et importante étape est la détection spectrale. La RC surveille les bandes spectrales qui sont à sa portée, capture leurs informations, détecte les trous spectraux et détecte la présence des utilisateurs qui opèrent sur les bandes licenciées. La seconde étape est l'analyse de la bande spectrale. Durant cette phase, les caractéristiques des trous spectraux détectés sont analysées. Cette analyse détermine les meilleurs trous spectraux en termes de seuil d'interférence causée aux utilisateurs primaires, de la qualité des bandes de fréquences, de la capacité du canal, de la durée de disponibilité de la bande spectrale et finalement de la position de l'émetteur par rapport au récepteur. La dernière étape consiste dans la prise de décision spectrale, c'est-à-dire, la RC sélectionne le débit nécessaire pour le transfert des données, le mode de transmission adéquat et la bande passante de la transmission. Après ces trois étapes, la RC sélectionne le spectre approprié selon les caractéristiques et les besoins de l'utilisateur. Ces étapes sont connues dans la littérature comme étant le cycle cognitif représenté par la Figure 1.1 adaptée de l'article (Akyildiz *et al.*, 2006).

Le résultat de ce cycle cognitif est une ou plusieurs bandes spectrales prêtes à être utilisées pour transmettre des données. Ces bandes spectrales sont l'ensemble des trous spectraux détectés. On peut voir dans la Figure 1.2 un exemple de ces trous spectraux. Étant donné la nature dynamique de l'environnement radio, la bande spectrale choisie peut être altérée suite à l'apparition d'un utilisateur primaire ou bien suite à la mobilité de l'utilisateur ou encore suite à une variation du trafic. Ce changement spatio-temporel qui se produit est géré par la RC. Si le spectre utilisé devient indisponible, la RC, grâce à sa surveillance continue de son environnement, fait face à cet événement en changeant de bande spectrale d'une manière fluide, sans coupure et avec le minimum de pertes. Ce mécanisme est connu sous le nom de la mobilité spectrale. Nous présenterons ce mécanisme plus en détail dans la sous-section 1.1.4.

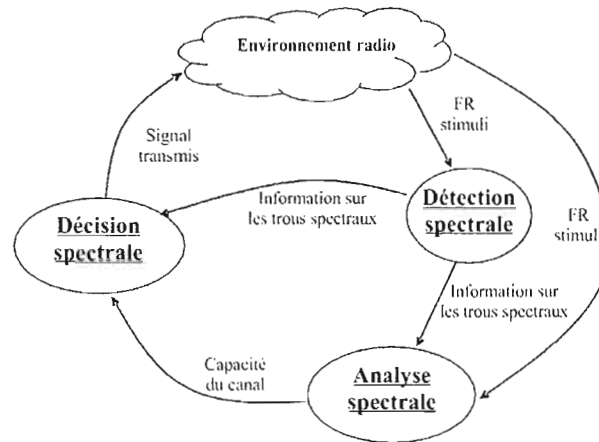


FIGURE 1.1: Cycle cognitif, FR désigne la fréquence radio. Figure adaptée de l'article (Akyildiz *et al.*, 2006)

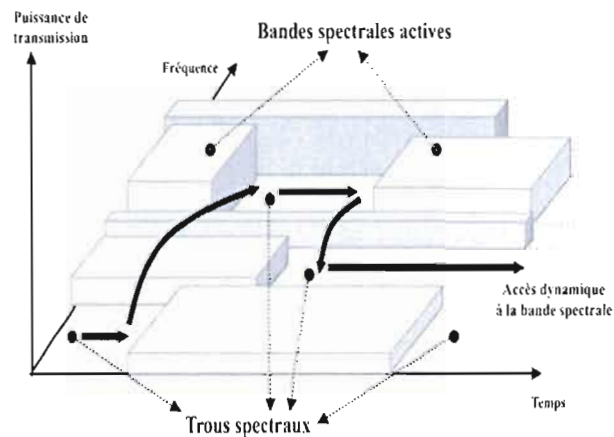


FIGURE 1.2: Exemple de trous spectraux. Figure adaptée de l'article (Akyildiz *et al.*, 2006)

Nous avons choisi une définition qui résume bien cette capacité cognitive et qui décrit fidèlement la radio cognitive (Haykin, 2005) :

Cognitive radio is an intelligent wireless communication system that is aware of its surrounding environment (i.e., outside world), and uses the methodology of understanding-by-building to learn from the environment and

adapt its internal states to statistical variations in the incoming radio frequency stimuli by making corresponding changes in certain operating parameters (e.g., transmit power; carrier-frequency, and modulation strategy) in real-time, with two primary objectives in mind : (i.) highly reliable communication whenever and wherever needed and (ii.) efficient utilization of the radio spectrum¹.

1.1.2 L'auto-configuration de la radio cognitive

La RC est capable de s'auto-configurer dynamiquement en ajustant ses paramètres de transmission en temps réel en n'important aucune modification à ses composantes matérielles. Cette caractéristique est la faculté majeure qui permet à la RC de s'ajuster à l'environnement dynamique où elle opère. D'après le rapport de la FCC, les paramètres qui doivent être reconfigurables sont les suivants :

Fréquence d'opération : la RC est capable de changer de fréquence d'opération quand cette dernière devient indisponible. Le choix de la nouvelle fréquence est basé sur l'information collectée de l'environnement radio. La fréquence la plus appropriée est sélectionnée et la communication est réalisée sur cette nouvelle fréquence.

Modulation : la RC reconfigure son schéma de modulation selon les besoins de l'utilisateur et selon les conditions de la bande spectrale. Dans le cas des applications telles que la voix sur IP, la RC doit sélectionner le schéma de modulation qui garantit la meilleure efficacité spectrale (débit le plus élevé). Dans le cas des applications qui ne supportent pas un taux d'erreur élevé, la RC doit sélectionner le schéma de modulation qui garantit le taux d'erreur le plus bas.

Puissance de transmission : lors du changement de la bande passante ou lors d'un déplacement de l'émetteur ou du récepteur, les paramètres de transmission incluant

1. La radio cognitive est un système de communication sans fil intelligent conscient de son environnement (c.-à-d. monde extérieur), et qui utilise la méthodologie de la compréhension-par-construction pour apprendre de son environnement. Cette radio cognitive adapte ses états internes aux variations statistiques de la fréquence radio lors de l'arrivée d'une source de stimulation. L'adaptation est effectuée en changeant certains paramètres (par exemple, la puissance de transmission, la fréquence porteuse et la stratégie de modulation) en temps réel, et en visant deux objectifs principaux : (i.) une communication fiable et (ii.) une utilisation efficace du spectre radio

la puissance de transmission changent de manière autonome. La nouvelle puissance de transmission est choisie selon les nouvelles contraintes que la RC doit respecter afin d'utiliser les BS d'une manière opportuniste. Le contrôleur de puissance est l'entité qui rend possible cet ajustement de puissance tout en s'assurant que les seuils d'interférence causée aux utilisateurs primaires ne soient pas dépassés dans l'environnement radio. Quand les besoins de la transmission sont satisfaits, et que cette dernière n'a plus besoin d'avantage de puissance, le contrôleur réduit la puissance pour (i) permettre à d'autres usagers d'utiliser la même BS et (ii) diminuer l'interférence causée aux autres transmissions secondaires.

Technologie de communication : dans une zone urbaine, il existe plusieurs types de réseaux, donc plusieurs technologies de communication. Un des aspects avantageux de la RC est l'interopérabilité.

Les paramètres de transmission de la RC peuvent être modifiés ou reconfigurés au besoin et à n'importe quel moment de la transmission. Ces paramètres s'accordent avec l'environnement spectral de la RC. En d'autres termes, si la fréquence d'opération subit des changements, les paramètres précédemment mentionnés (modulation, puissance de transmission) changent aussi. Les paramètres chez l'émetteur et le récepteur se reconfigurent aussi en choisissant le protocole et les techniques de modulation adéquates pour s'échanger des données.

Comme on vient de le mentionner précédemment, la RC dispose d'un ensemble de fonctions qui lui sont propres et qui lui donnent accès à plusieurs types de réseaux et donc des protocoles différents. Pour la RC, cette diversité est supportée par ses fonctions, sauf qu'il y a toujours l'envers de la médaille. L'accès dynamique aux bandes spectrales n'est pas supporté par les protocoles traditionnels. Ces derniers ont été conçus pour opérer sur des bandes spectrales allouées d'une manière statique et exclusive (pas de partage). Cela engendre une dégradation des performances lors de l'utilisation de ces protocoles classiques dans les RRC, et d'où la nécessité de développer de nouveaux protocoles qui sauront tirer avantage des fonctionnalités de la RC.

Dans la Figure 1.3 adaptée de l'article (Akyildiz *et al.*, 2006), les auteurs décrivent un modèle qui illustre l'interaction entre les différentes couches de communication du RRC. L'approche multicouche est la plus utilisée pour garantir les fonctionnalités de la RC. D'après le modèle présenté, on constate que le partage et la détection du spectre sont deux fonctions qui doivent coopérer pour améliorer l'efficacité spectrale. La nécessité de coopération s'explique par le fait que le partage de spectre dépend de la capacité de la RC à détecter la bande spectrale vacante, d'où le besoin d'un continuel échange entre la couche physique et la couche liaison. D'autre part, on remarque aussi que la gestion spectrale et la mobilité spectrale nécessitent des informations de toutes les couches du modèle de communication en raison de la nature dynamique du spectre.

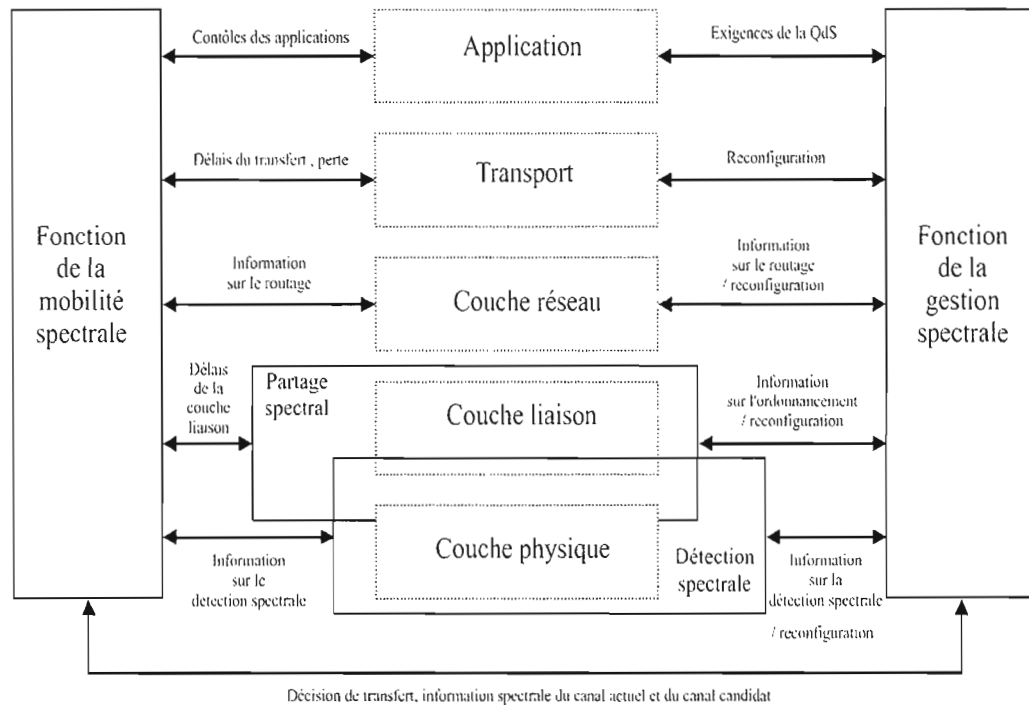


FIGURE 1.3: Fonctionnalités de communication des RRC (réseau de radios cognitives). Figure adaptée de l'article (Akyildiz *et al.*, 2006)

1.1.3 La gestion spectrale

Les bandes spectrales inutilisées ont des caractéristiques différentes les unes des autres. Ces caractéristiques sont la fréquence d'opération de la bande spectrale, le débit et le temps. Toutes ces informations changent au cours du temps vu la nature dynamique de l'environnement radio. C'est dans ce contexte que (Akyildiz *et al.*, 2006) ont présenté les nouvelles fonctions requises pour gérer les ressources spectrales dans les RRC. Ces fonctions sont la détection spectrale, l'analyse spectrale et la décision spectrale. Dans cette sous-section, nous présentons l'analyse spectrale et la décision spectrale.

L'analyse spectrale : elle permet de caractériser les différentes bandes spectrales en termes de fréquence d'opération, de débit, de temps et de l'activité de l'UP. Cette caractérisation sert à répondre aux exigences de l'URC. Des paramètres supplémentaires viennent compléter cette caractérisation, à savoir, le niveau d'interférence, le taux d'erreur du canal, les évanouissements, le délai et le temps d'occupation de la bande spectrale par un URC.

La décision spectrale : après que toutes les bandes spectrales aient été catégorisées et classifiées, on applique un ensemble de règles décisionnelles pour obtenir la ou les bandes spectrales les plus appropriées à la transmission en cours, en tenant compte des exigences de l'URC.

1.1.4 La mobilité spectrale

La mobilité spectrale est définie comme étant le processus de changement de fréquence d'opération par un URC. Ce processus est enclenché lors de la détérioration de la qualité de transmission sur la bande spectrale ou lors de la détection d'un UP. À ce moment-là, les deux URC (émetteur/récepteur) devront évacuer la BS et trouver une autre BS disponible pour continuer la communication. Dans ce contexte, le changement de fréquence (connu en anglais sous le nom de *spectrum handoff*) doit être redéfini pour mieux s'intégrer aux RRC. Les protocoles des différentes couches doivent s'adapter aux paramètres de la nouvelle fréquence d'opération à chaque fois que les URC changent de fréquence.

L'objectif de la mobilité spectrale est d'assurer une transition fluide et rapide lors du changement de fréquence. Ceci est essentiel pour que les applications des URC subissent le moins de dégradation possible dans leurs performances durant la mobilité spectrale. Les auteurs dans (Akyildiz *et al.*, 2006) soulignent qu'il est essentiel que les protocoles de gestion aient connaissance de la durée de la mobilité spectrale. Cette information est fournie par les algorithmes de détection spectrale. Dès la disponibilité de la durée de la mobilité spectrale, les algorithmes s'assurent que la communication en cours subisse le moins de dégradation possible lors du changement de fréquence.

1.1.5 L'architecture des réseaux de radios cognitives

Une description détaillée de l'architecture des RRC est primordiale pour développer des protocoles efficaces de communication. Ces protocoles serviront par la suite à supporter les capacités cognitives qu'on a précédemment mentionnées. Les éléments qui composent les RRC sont représentés dans la Figure 1.4 adaptée de l'article (Akyildiz *et al.*, 2006). Dans cet article, les auteurs décomposent le RRC en deux réseaux distincts : primaire et secondaire.

Le réseau primaire : est le réseau doté d'une licence pour utiliser certaines bandes spectrales. Le réseau primaire a acquis ce droit à travers l'achat de licences des agences gouvernementales. On peut citer comme exemples les réseaux cellulaires, les réseaux de diffusion télé, etc. Le réseau primaire est composé des éléments suivants :

Un utilisateur primaire : (dit utilisateur licencié) est un utilisateur qui détient une licence pour opérer sur des bandes spectrales qui lui sont réservées. L'accès est contrôlé uniquement par ses stations de base et ne doit pas subir d'interférence extérieure nuisible. Les UP ne doivent subir aucune modification pour permettre la coexistence avec les utilisateurs ou réseaux de radios cognitives ou leurs stations de base.

Une station de base primaire : (dite station de base licenciée) est une infra-

structure fixe du réseau primaire qui possède une licence pour opérer sur la bande spectrale (par exemple les stations de base des systèmes cellulaires). Ces stations de bases sont conçues pour ne pas avoir à partager le spectre avec aucune entité extérieure au système, en l'occurrence, les URC. Cependant, il peut exister des stations de bases licenciées qui reconnaissent les protocoles des URC.

Le réseau secondaire : (dit réseau de radios cognitives, réseau à accès dynamique, ou bien réseau non licencié) 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 1.4. Ils se composent des éléments suivants :

Un utilisateur à radio cognitive : (dit utilisateur non licencié ou utilisateur secondaire) n'a pas de licence pour transmettre sur la bande spectrale. Cependant, grâce aux fonctionnalités additionnelles dont ils disposent, ces utilisateurs pourront partager la bande spectrale avec les utilisateurs primaires à condition de ne pas nuire leurs transmissions ou bien profiter de leur absence pour transmettre.

Une station de base secondaire : (dite station de base non licenciée) est une infrastructure fixe avec des capacités cognitives. L'URC se connecte à la station de base secondaire pour accéder à d'autres réseaux ou services.

Un serveur spectral : (en anglais *spectrum server*) est une entité du RRC qui sert à partager les ressources spectrales entre différents URC dans le même réseau. Ce serveur est connecté aux réseaux secondaires et agit comme un gestionnaire d'information spectrale. Dans un RRC, un URC peut être élu par les autres URC pour remplir les tâches du serveur spectral. L'élection de ce serveur dépend essentiellement de l'emplacement de ce dernier et de ses capacités à réaliser une détection spectrale quasi parfaite.

Un courtier spectral : (en anglais *spectrum broker*) est une entité du RRC qui partage les ressources spectrales entre différents RRC. Ce serveur est connecté

à plusieurs RRC et agit comme un gestionnaire d'information spectrale.

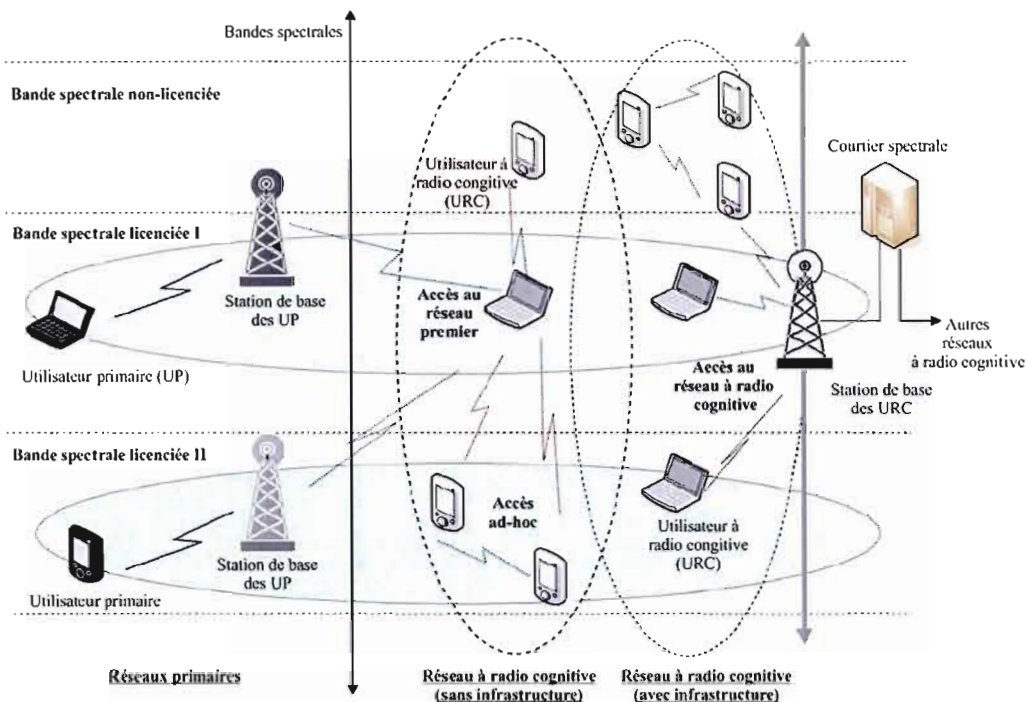


FIGURE 1.4: Coexistence entre deux types de réseau : réseau primaire et réseau secondaire. Figure adaptée de l'article (Akyildiz *et al.*, 2006)

Selon l'architecture présentée dans (Akyildiz *et al.*, 2006), le RRC est un ensemble de plusieurs types de réseaux qui coexistent sur les mêmes bandes spectrales. À cause de cette hétérogénéité, il existe différents types d'accès à ces réseaux.

Accès au RRC : les URC accèdent à leur station de base en utilisant les spectres licenciés ou non licenciés.

Accès au réseau ad-hoc de radios cognitives : les URC peuvent communiquer entre eux à travers des connexions ad-hoc sur des spectres licenciés ou non licenciés.

Accès au réseau licencié : les URC accèdent à la station de base des UP en utilisant les spectres licenciés.

1.1.6 Les RRC opérant sur des bandes spectrales licenciées ou non-licenciés

Dans cette partie, nous allons présenter la différence entre un RRC qui opère sur des bandes spectrales licenciées (BSL) et un RRC qui opère sur des bandes spectrales non licenciées (BSNL). D'après la Figure 2.1, les BSL ne sont pas exploitées continuellement, c.-à-d. qu'il existe la possibilité d'utiliser ces bandes spectrales pour permettre à d'autres réseaux de transmettre des données. Ces bandes spectrales libres sont connues dans la littérature comme étant les trous spectraux. Grâce à ces trous spectraux, les RRC peuvent communiquer d'une manière opportuniste en utilisant les techniques de communication intelligente qu'on a présentées précédemment. Un modèle d'un RRC qui coexiste avec un réseau primaire (RP) est modélisé dans la Figure 1.5. Ces RRC partagent avec les réseaux primaires les bandes spectrales tant que celles-ci sont libres. On peut remarquer ici l'importance de bien détecter ces possibilités afin de réaliser des transmissions avec succès sans générer d'interférence aux utilisateurs primaires de la bande spectrale. D'autre part, les réseaux primaires ne font aucun effort pour protéger les transmissions des URC de l'interférence qu'ils génèrent, d'où la nécessité de développer des techniques pour éviter ces interférences. Enfin, lorsque les UP deviennent actifs, les URC doivent évacuer le canal et trouver une autre bande spectrale libre pour continuer la transmission sans interruption. Un exemple de RRC opérant sur des bandes spectrales licenciées est illustré dans la Figure 1.5.

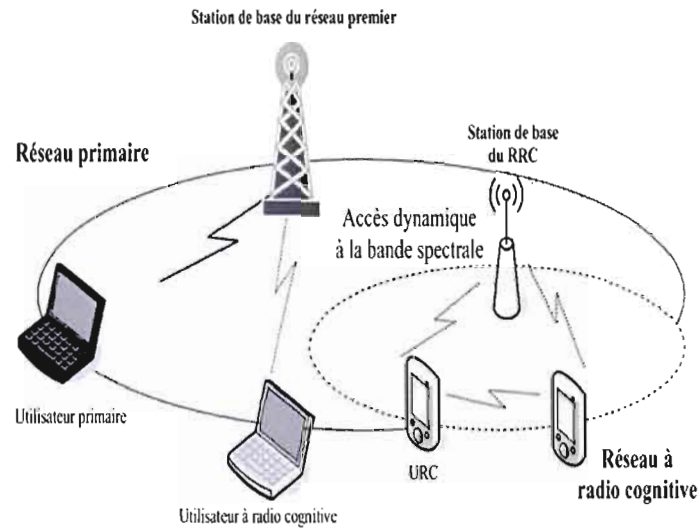


FIGURE 1.5: Réseau à radio cognitive opérant sur les bandes spectrales licenciées. Figure adaptée de l'article (Akyildiz *et al.*, 2006)

Les bandes spectrales non licenciées sont connues sous le nom de bandes industrielles, scientifiques et médicales (bandes ISM). L'usage de ces bandes devient de plus en plus important dans les nouvelles technologies de communication sans fil comme le Wi-Fi. Cependant, il reste beaucoup de problèmes à résoudre pour pouvoir partager le spectre entre les différents RRC efficacement. Étant donné l'absence de réseaux primaires, les RRC ont tous le même droit d'accès à ces bandes ISM. Sur ces bandes, le comportement du RRC est différent de celui des RRC opérant sur les bandes spectrales licenciées. Le comportement des RRC sur les bandes licenciées se résume à détecter le plus efficacement possible les transmissions des UP tandis que sur les bandes ISM, les RRC se disputent les bandes spectrales entre eux sans se soucier de l'interférence causée aux autres RRC. L'augmentation du nombre des RRC sur la même bande et dans la même région diminue la bande passante disponible à chaque utilisateur, d'où le besoin de développer des algorithmes sophistiqués et performants pour améliorer l'efficacité spectrale, fournir une Qualité de Service (QoS) et être équitable entre les différents RRC. Le travail qui retient notre attention et qui traite du partage de spectre dans les RRC qui opèrent sur les

bandes non licenciées est celui de (Etkin *et al.*, 2007). Les auteurs proposent des protocoles de partage de spectre basés sur la théorie des jeux. Un exemple de RRC opérant sur des bandes ISM est illustré dans la Figure 1.6.

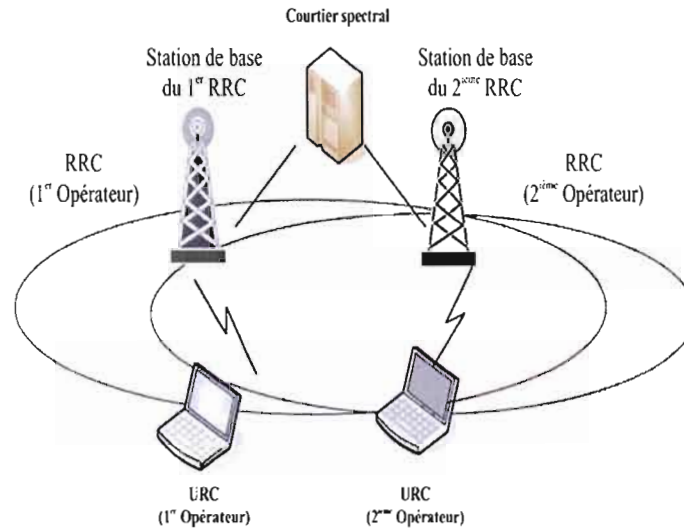


FIGURE 1.6: Réseau à radio cognitive opérant sur les bandes spectrales non licenciées. Figure adaptée de l'article (Akyildiz *et al.*, 2006)

1.2 Motivation

Présentement, dans les réseaux sans fil, nous remarquons la nécessité d'une plus grande bande passante pour satisfaire les exigences des applications multimédias et autres. Cette demande en débit, qui ne cesse d'augmenter, a incité les chercheurs à trouver de nouvelles techniques et de nouveaux algorithmes pour aider à combler la demande. Nous avons présenté dans la section précédente les RRC qui sont basés sur le nouveau paradigme de communication sans fil de la radio cognitive. Dans cette section nous discutons les motivations pour étudier cette nouvelle technologie et les avantages que cette dernière nous offre.

Actuellement, les bandes spectrales sont allouées aux réseaux sans fil de manière statique, d'après la FCC (Richard Engelman, 2002). Cette allocation est trop coûteuse en termes d'argent et de bandes spectrales. Ces agences gouvernementales, telles que la FCC, ont décidé de permettre à d'autres réseaux d'utiliser ces bandes spectrales lorsqu'elles sont disponibles sans interférer avec les utilisateurs détenteurs de licence. Dans la technologie de la radio cognitive, la FCC a trouvé la réponse à ses besoins en terme de déréglementation du spectre. Les enjeux financiers ont, là encore, motivé la majorité des travaux de recherche. D'ailleurs, pour la majorité des chercheurs, la radio cognitive se réduit à l'amélioration de l'utilisation des ressources spectrales (Haykin, 2005). Partant du constat que le spectre n'était majoritairement utilisé qu'une fraction du temps en fonction du lien, la FCC a ouvert la porte à des méthodes d'accès opportuniste aux bandes spectrales, pour des utilisateurs secondaires dans certaines bandes déjà allouées, comme les bandes télé ou bandes allouées aux réseaux cellulaires GSM. De nombreux travaux portent sur les aspects associés à cette opportunité. Cela va de la vente aux enchères du spectre (Chen *et al.*, 2010), à la détection de la bande spectrale libre (Haykin *et al.*, 2009), en passant par la prédiction du trafic (Thilakawardana et Moessner, 2007). La sous-utilisation spectrale et l'autorisation des agences gouvernementales ont encouragé les chercheurs à travailler pour trouver une meilleure gestion spectrale en développant de nouvelles techniques d'accès aux bandes spectrales. Avec la venue de la radio cognitive présentée dans la section 1.1, l'utilisation de cette ressource spectrale sera considérablement plus efficace, car ce nouveau paradigme offre un ensemble de fonctionnalités avancées qui sont la détection spectrale, la gestion spectrale, la mobilité spectrale et enfin le partage spectral. Ces fonctionnalités contribueront à l'obtention d'un débit plus élevé et d'une meilleure utilisation spectrale au sein des RRC. Dans ce travail, nous mettons l'accent sur l'une de ces fonctionnalités à savoir le partage des bandes spectrales. Ce partage permet aux utilisateurs à radio cognitive d'accéder dynamiquement aux bandes spectrales licenciées des utilisateurs primaires, ou bien en négociant avec eux ou bien en adoptant une approche opportuniste. Nous avons trouvé dans la littérature que les RRC nécessitent des algorithmes de partage spectral efficaces et peu complexes vu que les décisions doivent se faire d'une manière précise et très rapide pour des perfor-

manances élevées qui respectent les exigences en qualité de service. Les algorithmes doivent respecter ces exigences surtout en termes de délai et de débit. Entre autres, pour trouver une solution qui se rapproche de l'optimal nous avons besoin de satisfaire les deux besoins suivants :

- premièrement, trouver une modélisation simple et efficace des composantes de notre réseau telles que les liens de transmissions secondaires et les bandes spectrales disponibles et
- deuxièmement, formuler un algorithme à faible complexité et simple à implémenter.

La technologie de la radio cognitive offre aux utilisateurs sans fil une modulation adaptative, une plus grande plage de fréquences pour transmettre et un contrôle sur la puissance de transmission. Toutes ces qualités font en sorte que cette technologie soit la clé pour résoudre la sous-utilisation du spectre dans certains endroits et l'eucombement des usagers dans d'autres endroits spectraux et pour améliorer le débit au sein du RRC. Dans ce mémoire, nous présentons un algorithme pour résoudre le problème de l'allocation spectrale au sein des RRC en nous basant sur la théorie des graphes.

1.3 Problématique : le partage des bandes spectrales dans les réseaux de radios cognitives

Dans la section 1.1, nous avons présenté les RRC, les possibilités que cette nouvelle technologie peut offrir et les défis qu'il faut résoudre pour exploiter au mieux ces possibilités. Parmi tous les défis cités, nous allons contribuer à la résolution du problème de partage des bandes spectrales dans les RRC. En outre, le partage prend une importance majeure dans les RRC, car sans une solution efficace et performante, nous ne pouvons ni améliorer l'utilisation spectrale ni fournir un meilleur débit au sein des RRC. En effet, en exploitant efficacement les techniques que cette radio cognitive offre, nous pourrions garantir une coexistence entre les utilisateurs primaires et les utilisateurs à radio cognitive et de ce fait, nous pouvons améliorer l'utilisation spectrale de notre système tout

en protégeant les transmissions des utilisateurs primaires de l'interférence causée par les transmissions des utilisateurs secondaires. De plus, avec un partage efficace, nous permettons à un plus grand nombre d'utilisateurs de profiter de ces bandes spectrales qui sont souvent sous-utilisées tout en respectant les contraintes de transmission des utilisateurs primaires. Par conséquent, nous pouvons dire que le débit global sera meilleur que le débit global d'un réseau sans fil qui utilise une allocation fixe des bandes spectrales et qui n'utilise pas continuellement ses ressources. Il est clair que cette augmentation du nombre d'utilisateurs aura d'autres conséquences néfastes aux utilisateurs primaires ou aux autres usagers secondaires quand les utilisateurs secondaires agissent librement sans la surveillance du serveur spectral.

Dans ce travail, nous concevons un algorithme efficace de partage des bandes spectrales entre différents utilisateurs secondaires d'un même RRC basé sur la théorie des graphes. Nous avons nommé notre algorithme, l'algorithme glouton de partage spectral (en anglais, *Greedy Spectrum Sharing Allocation*, ou (GSSA)). Cet algorithme utilise la technique de transmissions cognitives simultanées (*underlay*) que nous avons présentée à la Section 1.1. Premièrement, le RRC est modélisé en un graphe. Chaque sommet dans le graphe possède un poids. Ensuite, le problème de partage des bandes spectrales se transforme en un problème de coloriage du graphe. Deuxièmement, les décisions de partage spectral sont transmises aux URC par le serveur spectral. Cette entité coordonne les transmissions des usagers secondaires en trouvant les paires transmission/bande spectrale qui maximisent le débit global du réseau. De plus, ce serveur protège les utilisateurs primaires des interférences générées en fixant les puissances des transmissions des usagers secondaires. En dernier lieu, nous étudions par simulation les performances du GSSA.

CHAPITRE II

ÉTAT DE L'ART

Grâce au développement des réseaux sans fil, ces derniers peuvent fournir des meilleurs services que les réseaux filaires. On peut citer les réseaux de la téléphonie mobile, les réseaux de télévision et bien d'autres. Tous ces réseaux communiquent via différentes bandes spectrales du spectre électromagnétique. L'utilisation du spectre est réglementée par des agences gouvernementales. Au Canada, Industrie Canada (IC) s'occupe de l'attribution des licences, aux États-Unis d'Amérique c'est la commission fédérale de communication FCC. Dans le document (IC, 2001), on peut voir l'attribution des fréquences radioélectriques au Canada. D'après ces agences gouvernementales, le spectre est une ressource naturelle sous-utilisée. La Figure 2.1 représente une distribution de la puissance du signal sur une large portion du spectre. On constate que le spectre est utilisé sporadiquement et que cette utilisation est concentrée sur certaines portions du spectre tandis que d'autres restent inutilisées. Pour améliorer l'utilisation des ressources spectrales par la radio cognitive (Haykin, 2005), il faut partager efficacement les bandes spectrales entre les différents systèmes. Dans ce chapitre, nous présentons le problème de partage spectral comme il a été défini dans les articles scientifiques, ensuite nous nous intéressons aux travaux qui nous ont précédés pour résoudre le problème de partage des bandes spectrales dans les RRC. Nous avons regroupé ces approches d'allocation en deux groupes distincts : les approches basées sur la théorie des graphes et les approches basées sur la théorie des jeux. Enfin, nous discutons des avantages et des inconvénients de chaque approche.

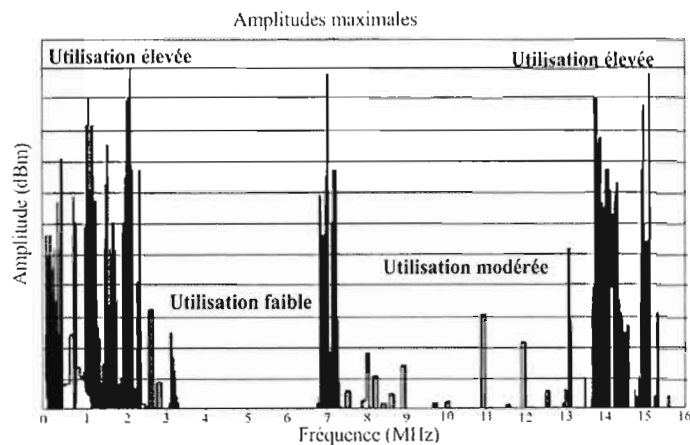


FIGURE 2.1: L'utilisation spectrale dans les États-Unis d'Amérique. Figure adaptée de l'article (Akyildiz *et al.*, 2006)

2.1 Le partage des bandes spectrales

Dans les RRC, le partage des bandes spectrales entre différents RRC ou au sein d'un même RRC est un défi majeur. D'après (Akyildiz *et al.*, 2006), le partage des bandes spectrales est vu comme un problème similaire au problème d'accès au support dans les réseaux sans fil traditionnels. La nature des RRC fait que le partage des bandes spectrales est particulier à cause de la coexistence des URC avec les UP et la disponibilité d'une large bande spectrale. Dans cette section, nous allons présenter les différents défis soulevés dans la littérature et décrire les solutions proposées ainsi que les principaux travaux de recherches dans ce domaine.

Le partage des bandes spectrales dans les RRC est composé de cinq étapes primordiales qui sont la détection spectrale, l'allocation spectrale, l'accès à la bande spectrale, l'établissement d'une liaison entre l'émetteur et le récepteur et la mobilité spectrale.

1. La détection spectrale : l'URC doit impérativement être conscient de l'usage spectral de son voisinage, autrement dit il doit connaître la disponibilité de la bande spectrale. Dans (Akyildiz *et al.*, 2006), les auteurs offrent une revue de littérature des

travaux qui ont été accomplis dans ce domaine.

2. L'allocation spectrale : l'URC alloue la bande spectrale en se basant sur l'information récoltée à l'étape précédente. Cette allocation dépend aussi des règles internes et externes des réseaux primaires et des réseaux équipés de radio cognitive. Par conséquent, la conception de règles d'allocation efficaces est un thème de recherche important.
3. L'accès à la bande spectrale : dans les RRC, l'accès à la bande spectrale doit être coordonné pour éviter les collisions entre les différents utilisateurs.
4. L'établissement d'une liaison entre l'émetteur et le récepteur : après les trois étapes précédentes, nous obtenons une bande spectrale prête pour acheminer les données entre deux URC. Le récepteur doit être avisé du choix du canal, d'où la nécessité d'un protocole qui assure l'établissement de connexion entre l'émetteur et le récepteur (en anglais *transmitter-receiver handshake protocol*). Ce protocole est essentiel pour réaliser des transmissions efficaces dans les RRC, il peut être implémenté au niveau du serveur spectral qui se chargera d'informer le récepteur de la bande spectrale choisie.

Le travail de recherche actuel se concentre à fournir des solutions pour les différentes étapes qu'on vient de citer. Dans la sous-section 2.2, nous classifions les techniques de partage spectral et nous décrivons les résultats de ces techniques dans les RRC. Dans les sections 2.3 et 2.4, nous présentons, respectivement, les solutions de partage spectral dans le même RRC et les solutions de partage spectral entre multiples RRC.

2.2 Les techniques de partage spectral

Les auteurs dans (Akyildiz *et al.*, 2006) ont fourni une classification des techniques de partage spectral en se basant sur les trois critères suivants : l'architecture du réseau, le comportement des URC vis-à-vis l'accès spectral et les techniques d'accès aux bandes spectrales.

La première classification des techniques de partage spectral dans les RRC est basée sur l'architecture du réseau.

- *Partage spectral dans une architecture centralisée* : dans cette approche, le serveur spectral contrôle l'allocation et les procédures d'accès aux bandes spectrales. En plus de ces fonctions, un modèle de détection spectrale distribué est implémenté au niveau de chaque URC. Les données récoltées sur les bandes spectrales sont ensuite acheminées au serveur spectral afin d'être exploitées pour efficacement construire la table d'allocation spectrale.
- *Partage spectral dans une architecture distribuée* : dans certains cas, l'établissement d'une infrastructure centralisée est impossible d'où le recours à une solution distribuée. Par conséquent, l'allocation et l'accès aux bandes spectrales se font localement c.-à-d. que chaque utilisateur décide les bandes spectrales qu'il utilisera en se basant sur sa détection spectrale individuelle.

La seconde classification des techniques de partage spectral dans les RRC est basée sur le comportement des URC vis-à-vis l'accès spectral. Le comportement qui nous intéresse est la prise en considération, par un URC, de l'effet de sa communication sur ses voisins cognitifs. Cela est connu dans la littérature comme étant un partage spectral coopératif ou non coopératif (Akyildiz *et al.*, 2006).

- *Partage spectral coopératif* : en adoptant un comportement coopératif, les URC partagent entre eux les mesures d'interférence de chaque utilisateur. Ensuite, les algorithmes d'allocation spectrale allouent les bandes spectrales aux différents URC en se basant sur ces mesures. Les solutions coopératives nécessitent en général une architecture centralisée, comme dans (Brik *et al.*, 2005), bien qu'une solution décentralisée soit possible, comme dans (Huang *et al.*, 2005).
- *Partage spectral non coopératif* : dans ce type de partage, chaque URC s'intéresse seulement à maximiser son gain sans se soucier de l'interférence générée aux autres nœuds. Cette solution de partage est souvent désignée comme solution *égoïste*. Les auteurs (Zhao *et al.*, 2005b) proposent des protocoles décentralisés pour accéder

au médium dans les réseaux de radios cognitives où une détection partielle des bandes spectrales permet aux URC de réaliser leurs transmissions. D'autre part, les solutions non coopératives nécessitent moins de messages de contrôle. Cela ne veut pas dire forcément un meilleur débit mais plutôt une meilleure utilisation des bandes spectrales disponibles.

L'environnement spectral est très dynamique. Donc, pour réussir à transmettre avec succès, les RRC doivent adapter leurs techniques d'accès afin de mieux s'intégrer dans l'environnement où ils opèrent. Dans la littérature, les paradigmes des RRC sont connus (en anglais, *underlay*, *overlay* et *interweave*). Les définitions de ces paradigmes diffèrent d'un chercheur à un autre. Dans notre travail nous allons considérer les définitions données dans l'article de (Goldsmith *et al.*, 2009). Nous présentons, dans le tableau 2.1, la troisième classification des techniques de partage spectral dans les RRC.

Tableau 2.1: Comparaison des différents paradigmes des RRC. Tableau adapté de l'article de Goldsmith et al., 2009

Transmission cognitive simultanée (underlay)	Transmission cognitive non simultanée (overlay)	Transmission dite (interweave)
<p>Les émetteurs URC connaissent le seuil d'interférence tolérable par les récepteurs primaires.</p>	<p>Les URC connaissent le gain du canal, la table de codage et les messages des UP.</p>	<p>L'information sur les trous spectraux (temps, espace et fréquence) est connue des URC.</p>
<p>Les URC peuvent transmettre en même temps que les UP tant qu'ils respectent le seuil d'interférence.</p>	<p>Les URC peuvent transmettre en même temps que les UP. En contre-partie, les URC doivent consacrer une partie de leur puissance de transmission pour acheminer les messages des UP.</p>	<p>En cas d'une détection spectrale erronée, les URC transmettent simultanément avec les UP. Sinon, les URC ne transmettent pas.</p>
<p>La puissance de transmission des URC est limitée par la contrainte d'interférence.</p>	<p>Les émetteurs peuvent transmettre à n'importe quelle puissance. Pour compenser l'interférence causée aux UP, les URC doivent acheminer les messages des UP.</p>	<p>La puissance de transmission des URC est limitée par la portée de la détection spectrale du trou.</p>

2.3 Le partage spectral au sein d'un réseau de radios cognitives

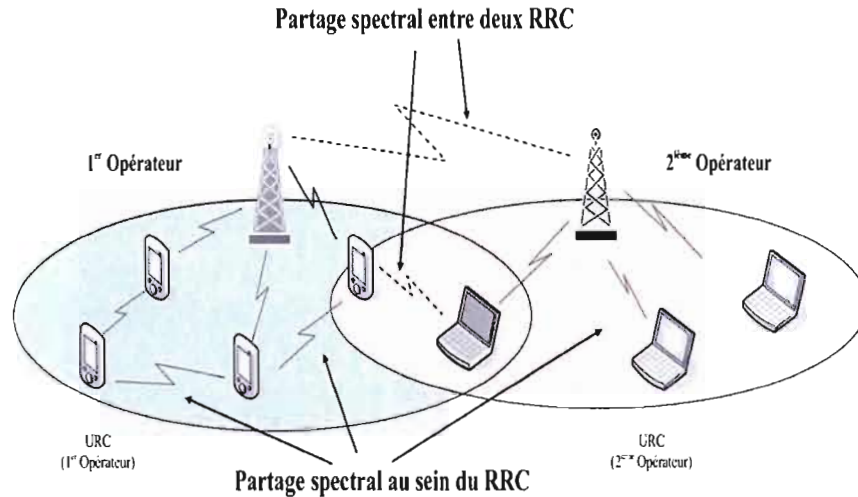


FIGURE 2.2: Réseau à radio cognitive opérant sur les bandes spectrales non licenciées. Figure adaptée de l'article (Akyildiz *et al.*, 2006)

Le partage spectral au sein du même réseau ou intra réseau a connu un intérêt majeur de la part des chercheurs. Comme nous l'avons mentionné, dans les sections précédentes, les URC partagent les BS avec les UP d'une manière opportuniste sans causer d'interférence nuisible à ces derniers. Les auteurs de (Akyildiz *et al.*, 2006) offrent une riche revue de littérature du travail qui a été fait dans ce domaine ainsi que les solutions proposées, tout en les regroupant selon la classification de la section 2.2.

- *Partage coopératif* : un modèle coopératif basé sur un arrangement local ou *local bargaining* entre les URC partageant les mêmes bandes spectrales est proposé par (Cao et Zheng, 2005). Dans ce travail, l'utilisation spectrale et l'équité sont les deux points importants traités par les auteurs. Pour garantir l'équité, la solution proposée est de construire des groupes selon une limite de pauvreté qui assure une allocation spectrale minimale pour chaque utilisateur dans le groupe. En comparant les résultats obtenus avec un modèle qui ne regroupe pas les usagers selon une

limite de pauvreté, les auteurs ont trouvé que leur solution est moins complexe et offre des résultats similaires à ceux obtenus avec une solution centralisée basée sur le coloriage des graphes. Pour leur part, les auteurs (Zhao *et al.*, 2005a) offrent une solution qui étudie le partage spectral au sein de groupes locaux.

- *Partage non coopératif* : un modèle opportuniste de gestion spectrale est proposé par les auteurs (Zheng et Cao, 2005), où les URC allouent les bandes spectrales en se basant sur leurs voisins et sur l'observation des modèles d'interférence. Dans ce modèle nommé par les auteurs *device centric spectrum management scheme (DCSM)*, le coût ajouté (en anglais *overhead*) généré par la communication est minimisé grâce aux règles d'allocation spectrale. Au final, les URC allouent les bandes spectrales en se basant sur leurs observations et en respectant les règles d'allocation, au lieu de collaborer avec les autres URC. Dans le cas d'une contention (lorsque deux URC à proximité choisissent la même bande spectrale), des techniques d'accès aléatoires sont appliquées pour résoudre la contention. La comparaison entre ce modèle et un modèle coopératif montre une dégradation négligeable des performances. Cependant, le coût ajouté est considérablement réduit.

2.4 Le partage spectral entre différents réseaux de radios cognitives

Les RRC sont des réseaux qui fournissent un accès opportuniste aux bandes spectrales licenciées pour les usagers dépourvus de licence. Avec cette configuration, plusieurs systèmes peuvent coexister dans la même zone géographique et sur la même bande spectrale comme le montre la Figure 2.2. Dans ce qui suit, nous nous intéressons aux solutions proposées pour résoudre ce partage spectral inter réseaux dans deux modèles d'architectures différentes : centralisée et distribuée.

- *Architecture centralisée* : la première approche pour résoudre ce partage a été proposée par (Jing et Raychaudhuri, 2005) où la coexistence des deux réseaux IEEE 802.11b et IEEE 802.16a est surveillée par un protocole connu sous le nom de *common spectrum coordination channel (CSCC) etiquette protocol*. Afin de gérer

la coexistence entre les deux réseaux, les utilisateurs s'échangent les messages de contrôle CSCC. Chaque usager détermine la bande spectrale qu'il peut utiliser pour transmettre ses données tout en évitant d'interférer avec ses voisins. Dans le cas où la sélection du canal risque de causer de l'interférence, un algorithme d'allocation de puissance est déployé pour éliminer cette interférence. En utilisant le protocole CSCC dans un scénario où il existe des bandes spectrales disponibles, les auteurs ont obtenus de 35 à 160% d'amélioration de débit. En supposant que les nœuds sont regroupés autour du point d'accès, chose très probable dans les réseaux IEEE 802.11b, le débit réalisé par le protocole CSCC s'améliore. Malgré l'originalité de l'idée, la solution proposée est considérée comme incomplète, car elle suppose que les utilisateurs des deux types de réseaux sont équipés d'une interface à radio cognitive et d'un contrôle radio à bande étroite et elle suppose aussi que le réseau est à faible débit binaire.

Dans le travail de (Ileri *et al.*, 2005), le problème est abordé d'une autre manière. Au lieu de se disputer les bandes spectrales, les opérateurs des RRC se disputent les usagers. Cela dit, un serveur central est proposé pour coordonner les demandes des différents opérateurs des RRC. Cette entité est nommée par les auteurs *spectrum policy server* (SPS). Dans ce modèle, chaque opérateur enchérit pour les bandes spectrales en indiquant le montant qu'il est prêt à payer pour la durée de l'utilisation. Le SPS alloue ensuite les bandes spectrales en maximisant son profit de ces enchères. En dernière étape, les opérateurs proposent des offres aux utilisateurs, et ces derniers décident quel opérateur acheminera le mieux leurs transmissions. En comparant ce modèle d'enchère à un modèle qui alloue des parts égales de spectre, les auteurs ont obtenu un meilleur débit et un très bon revenu pour le serveur central SPS tout en minimisant les dépenses des utilisateurs équipés d'une interface radio cognitive. Ce travail offre une nouvelle perspective dans les RRC en incorporant la compétition pour les utilisateurs.

- *Architecture distribuée* : un modèle distribué de partage spectral pour les fournisseurs de services Internet sans fil, en anglais *Wireless Internet service provider* (WISP), est proposé par (Marias, 2005), dans une QoS distribuée basée sur la

réserve dynamique de canal, est proposée pour résoudre ce type de partage. En anglais, le nom donné par l'auteur est *distributed QoS based dynamic channel reservation* (D-QDCR). L'idée principale du D-QDCR est que les stations de base des fournisseurs se disputent les bandes spectrales disponibles entre elles en se basant sur les exigences en QoS de ses utilisateurs. Comme le travail de (Jing et Raychaudhuri, 2005), le canal de contrôle et le canal de données sont séparés. L'unité d'allocation dans le modèle D-QDCR est le *Q-frame*. Lors de l'allocation d'une *Q-frame* par la station de base, cette dernière utilise le canal de contrôle et le canal de données qui lui sont alloués pour la coordination et la transmission des données entre ses usagers. Dans cette solution, le volume de données et les exigences des utilisateurs en QoS sont les critères qui influencent la priorité d'accès aux bandes spectrales de chaque station de base. De plus, l'auteur propose aussi d'autres critères basés sur le type de trafic que l'utilisateur demande. Bien que l'auteur n'a pas fourni des évaluations approfondies de sa solution, le modèle D-QDCR reste tout de même une contribution importante dans le partage spectral inter réseaux. Un protocole similaire appelé *On-Demand spectrum Contention* (ODSC) a été proposé par (Hu *et al.*, 2008) pour résoudre le partage spectral dans les réseaux IEEE 802.22. Ce protocole emploie les messages MAC d'une manière interactive sur un canal de communication réservé aux messages de contrôle inter réseau.

2.5 Théorie des graphes

La théorie des graphes permet d'exprimer les problèmes mathématiques complexes en graphes et les résoudre par la suite avec un ensemble d'outils et de règles bien structurés dans le but d'obtenir une solution proche de l'optimal. Cette discipline est en perpétuelle évolution et diversification. Elle représente l'un des outils d'optimisation les plus sollicités et les plus performants pour résoudre les problèmes d'allocation de ressource dans les réseaux sans fil. La simplicité de la représentation des problèmes complexes et la clarté

des solutions obtenues sont sûrement les raisons qui motivent les chercheurs à adopter cette approche pour optimiser leurs résultats scientifiques.

2.5.1 Graphe non-orienté

Un graphe non-orienté est composé d'une paire d'ensembles $G = (V, E)$ telle que $E \subseteq [V]^2$. Les éléments de E sont des sous-ensembles non-ordonnés de V formés de deux éléments (Diestel, 2005). Pour éliminer toute confusion $V \cap E = \emptyset$. Les éléments de V sont les sommets du graphe G et E est l'ensemble de ses arêtes. Le nombre de sommets d'un graphe (dit aussi l'ordre d'un graphe) G est noté $|G|$ et $\|G\|$ représente son nombre d'arêtes. Les graphes peuvent être finis ou infinis dépendamment de leur ordre. Les graphes utilisés dans ce document sont considérés comme finis. La Figure 2.3 représente un exemple d'un graphe non-orienté d'ordre $|G| = 8$ et composé de neuf arêtes $\|G\| = 9$.

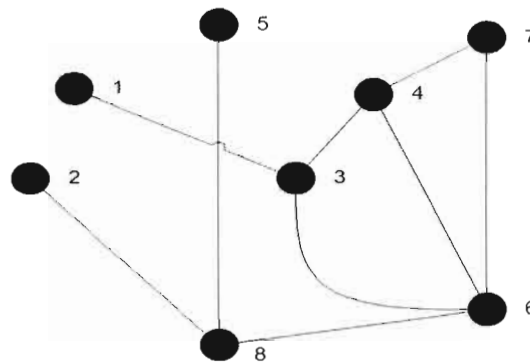


FIGURE 2.3: Un exemple de graphe non-orienté d'ordre $|G| = 8$ avec $V = \{1, \dots, 8\}$ sommets et $E = \{\{1, 3\}, \{2, 8\}, \{4, 3\}, \{4, 6\}, \{4, 7\}, \{5, 8\}, \{6, 3\}, \{6, 7\}, \{6, 8\}\}$ ou $\|G\| = 9$ arêtes

2.5.2 Définitions

- On dit que deux sommets u et v du graphe G sont adjacents, ou voisins, si $a = \{u, v\} \in E$ est une arête de G .
- On dit que deux arêtes e et f de G sont adjacentes si elles ont un sommet en commun.
- On dit que le graphe G est complet si toutes les arêtes de G sont adjacentes deux à deux.
- On dit qu'un sous-ensemble $I \subset V$ (sommets) ou $S \subset E$ (arêtes) est indépendant si les éléments qui le composent sont non-adjacents deux à deux.
- On dit que $G' = \{V', E'\}$ est un sous-graphe de $G = \{V, E\}$ (et G est un super-graphe de G') si et seulement si $V' \subseteq V$ et $E' \subseteq E$. Si $G' \subseteq G$ et G' contient toutes les arêtes $\{u, v\} \in E$ avec $u, v \in V'$, alors G' est un sous-graphe induit de G .
- On dit qu'un graphe $G = \{V, E\}$ est valué si on assigne un nombre réel positif ou négatif à chaque sommet dans V . On appelle ce nombre une valuation ou un poids.
- On dit que $G = \{V, E\}$ est un graphe orienté si chaque arête dans E est orientée d'une extrémité à une autre. Dans ce type de graphes, E est appelé aussi l'ensemble d'arcs. Dans notre travail, nous considérons des graphes non orientés.

2.5.3 Problème de coloration des sommets

Le problème de coloration consiste à colorier le graphe G avec des couleurs disponibles dans C de tel sorte que deux sommets adjacents ne partagent pas la même couleur. La coloration des sommets d'un graphe $G = (V, E)$ est une fonction injective $s : V \rightarrow C$ telle que $s(v) \neq s(u)$ pour tout v et u adjacents. Les éléments de l'ensemble C représentent les couleurs disponibles.

Cherche $s : V \rightarrow C$

tel que si $\{u, v\} \in G$ alors $s(u) \neq s(v)$.

Dans la Figure 2.4 (a), le coloriage de graphe est valide et dans la Figure 2.4 (b) le

coloriage est invalide car il ne respecte pas la condition suivante :

Pour tout $\{u, v\} \in E$, $s(u) \neq s(v)$.

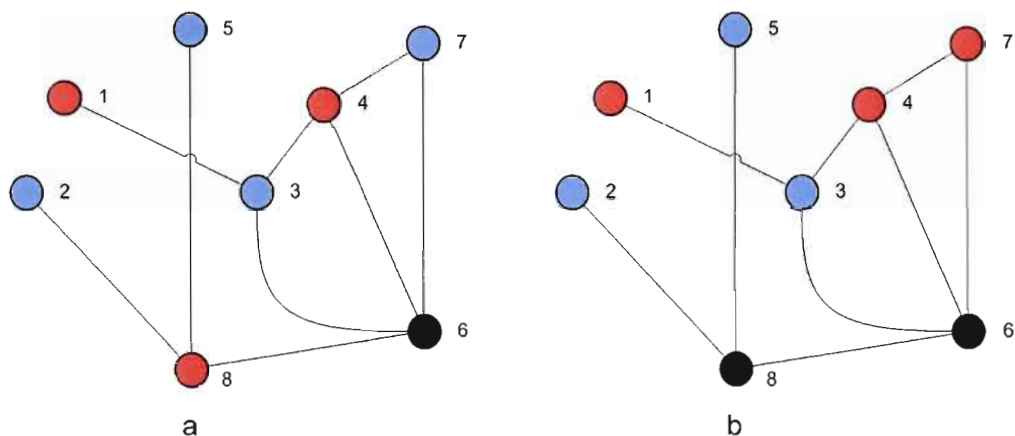


FIGURE 2.4: (a) Un coloriage de graphe valide et (b) Un coloriage de graphe invalide

Un graphe G est dit k -colorable si chacun des sommets de G possède une couleur différente de son voisin. Le nombre des couleurs différentes est inférieur ou égal à k . Le nombre chromatique d'un graphe G est noté $\chi(G)$, et ce nombre représente le nombre minimal de couleurs nécessaire pour colorier les sommets de G de telle façon que deux sommets voisins ne partagent pas la même couleur. D'après la littérature (Garey *et al.*, 1974), ce problème de coloration des sommets est NP-difficile. On ne connaît pas d'algorithmes permettant de trouver la solution optimale en un temps polynomial. D'après (Diestel, 2005), la condition suffisante pour connaître le nombre chromatique $\chi(G)$ d'un graphe G ayant m arêtes est la suivante :

$$\chi(G) \leq \frac{1}{2} + \sqrt{2m + \frac{1}{4}}.$$

En satisfaisant cette condition, nous pouvons présenter un exemple de coloriage de graphe avec $\chi(G)$ minimal et non optimal dans la Figure 2.5.

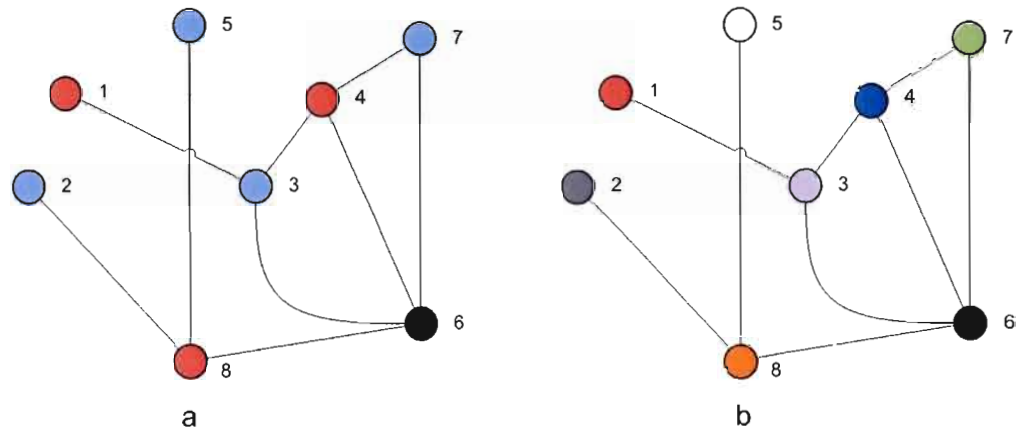


FIGURE 2.5: Exemples de la coloration des sommets d'un graphe : (a) coloration avec le nombre optimal de couleurs, (b) coloration possible mais non optimale

2.6 Les approches d'allocation des bandes spectrales dans les réseaux de radios cognitives

La théorie des graphes et la théorie des jeux sont deux outils mathématiques qui servent à capturer certaines nuances d'une situation réelle et permettent grâce à des règles bien définies et structurées de résoudre des problèmes dans divers domaines. Après avoir présenté les principes de la théorie des graphes dans la section précédente (la théorie des jeux n'est pas présentée en détails car nous ne l'utiliserons pas pour construire notre algorithme), une revue de littérature sur les travaux qui ont utilisé la théorie des graphes ou la théorie des jeux pour résoudre le problème de partage des bandes spectrales est indispensable dans notre travail.

Dans la sous-section 2.6.1, nous analysons les travaux qui ont utilisé la théorie des graphes pour résoudre le problème de partage, tandis que dans la sous-section 2.6.2, nous étudions les travaux qui ont modélisé le problème de partage en un jeu.

2.6.1 Les approches basées sur la théorie des graphes

Dans cette partie, nous présenterons des travaux de recherche utilisant la théorie de graphes pour résoudre le problème d'allocation de ressources dans les RRC. Nous exposerons les principaux apports de cette approche et les principaux résultats obtenus.

Afin de convertir le problème d'allocation des bandes spectrales en un problème de coloriage de graphe, les auteurs de (Khozeimeh et Haykin, 2009) ont construit un graphe G formé par les liens actifs dans le réseau. Ces liens sont les sommets du graphe. Deux sommets dans le graphe sont connectés entre eux si les liens qu'ils représentent interfèrent ensemble. La Figure 2.6 (a) nous montre un exemple de réseau formé de huit URC. Parmi ces huit, quatre émetteurs transmettent des données à leurs récepteurs respectifs. Ces paires forment les liens actifs du RRC. Dans la Figure 2.6 (a), les lignes pointillées symbolisent l'interférence causée par les URC qui se trouvent dans la même zone géographique. Une des contraintes majeures du problème d'allocation des bandes spectrales dans les RRC est l'interférence causée par le voisinage (autres URC actifs). Si deux URC interfèrent entre eux dans la même zone alors ces deux URC ne peuvent pas partager la même bande spectrale en même temps. Le graphe équivalent à l'exemple de réseau donné est représenté dans la Figure 2.6 (b). Après la coloration du graphe avec le minimum de couleurs possible, chaque lien ou transmission recevra une bande spectrale correspondant à la couleur sélectionnée.

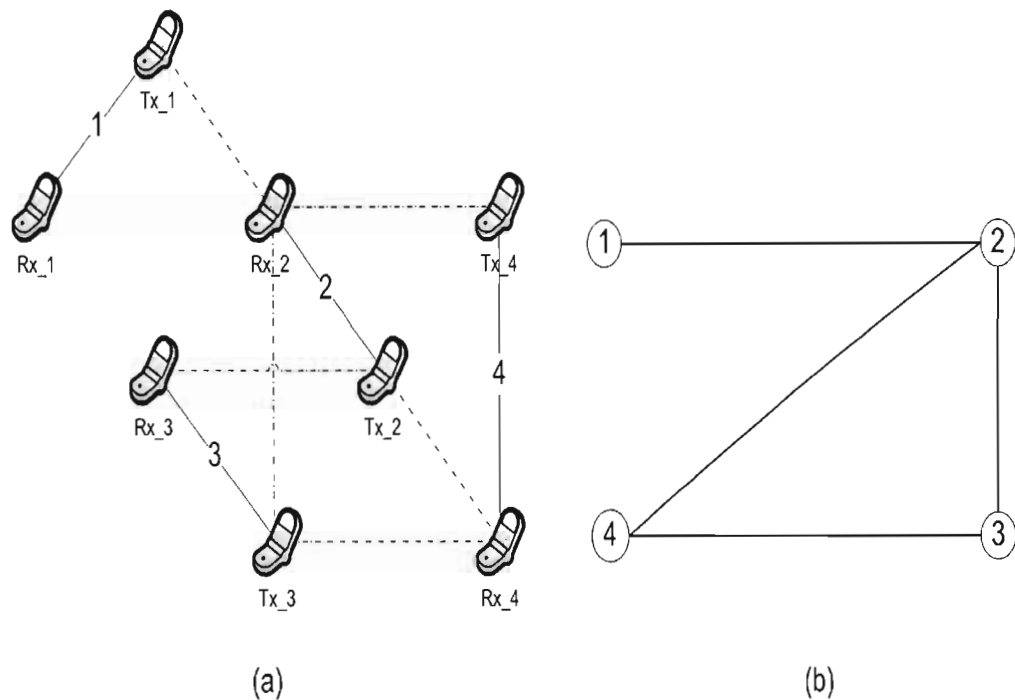


FIGURE 2.6: (a) 8 URC qui communiquent entre eux en paires; les lignes en gras représentent les liens de transmission de données entre les URC et les lignes en pointillé représentent l'interférence entre deux URC. (b) La représentation en graphe de (a).

Dans l'article (Khozeimeh et Haykin, 2009), les auteurs ont fait un survol des différents travaux qui ont traité le problème d'allocation des bandes spectrales en se servant de la théorie des graphes. Ils ont aussi formalisé le problème d'allocation des bandes spectrales d'une façon que nous avons trouvé très intéressante à exploiter pour notre travail que nous présentons dans le deuxième chapitre. Toutefois, ils n'ont présenté ni une solution ni un algorithme pour le résoudre. Dans notre travail, nous utilisons partiellement cette formalisation et nous développons un algorithme dont l'objectif est d'allouer les ressources spectrales entre les différents URC de notre modèle de réseau. Nous présenterons plus en détail l'algorithme proposé GSSA dans le deuxième chapitre.

L'article (Zheng et Peng, 2005) propose également une solution au problème d'allocation des bandes spectrales dans les réseaux de radios cognitives en utilisant la théorie

des graphes. Les auteurs de cet article présentent un algorithme pour allouer les bandes spectrales d'un RRC. Un partage de spectre opportuniste est l'approche adoptée dans leur travail. Cette approche suggère que les URC utilisent les trous spectraux de manière opportuniste sans coopération ni communication avec les utilisateurs primaires. Les URC doivent surveiller l'environnement radio en tout temps pour détecter l'arrivée des UP et éviter d'interférer avec eux. Les utilisateurs secondaires sont modélisés en tant que sommets dans le graphe, les interférences entre deux URC en tant qu'arêtes et finalement les bandes spectrales en tant que couleurs. La bande passante de chaque bande spectrale est différente de l'autre en terme de débit. Pour être fidèles à la réalité, les auteurs ajoutent des poids aux couleurs pour obtenir un graphique similaire à celui de la Figure 3.2. La différence entre notre travail et celui de (Zheng et Peng, 2005) réside dans la désignation des sommets et dans la construction des arêtes. Pour (Zheng et Peng, 2005) les sommets représentent les URC, or pour nous les sommets représentant les liens entre deux URC. Donc, notre modèle de graphe est plutôt comme celui de (Khojcinch et Haykin, 2009). Dans le travail de (Zheng et Peng, 2005), une arête existe entre deux URC si et seulement s'il y a de l'interférence entre ces deux URC. Par conséquent, ces deux URC ne peuvent pas partager la même bande spectrale. Dans notre modélisation du réseau en graphe, une arête entre deux sommets existe si et seulement si l'interférence est supérieure à un certain seuil c.-à-d. en dessous de ce seuil on permet à deux transmissions cognitives ou plus de coexister sur la même bande spectrale. Ce seuil est obtenu par simulation. En partageant la bande spectrale, nous augmentons le nombre d'utilisateurs dans le système augmente et par conséquent, la performance globale du système accroît et l'efficacité spectrale s'améliore.

Le recours à la théorie des graphes dans notre travail et dans le travail de (Zheng et Peng, 2005) a pour but de transformer le modèle de réseau de radios cognitives en un graphe qui capture l'interférence causée par les transmissions des URC et qui capture les bandes spectrales disponibles pour chaque intervalle de temps. Dans notre travail, nous considérons les bandes spectrales orthogonales et nous considérons aussi que les canaux subissent une atténuation, un évanouissement de Rayleigh en plus d'un bruit

blanc Gaussian additif (en anglais *Additive white Gaussian noise* (AWGN)). Ce modèle est plus réaliste que celui de (Zheng et Peng, 2005).

En utilisant une approche opportuniste, les URC peuvent opérer partout sans avoir besoin d'infrastructure ni avoir à payer des frais pour l'utilisation spectrale aux détenteurs de licence (UP). En un mot, cette approche consiste à assurer une gestion spectrale dynamique. La complexité vient du fait que les trous spectraux ne cessent pas de varier dans le temps et dans l'espace. Les URC doivent aussi assurer une détection spectrale par eux-mêmes, ce qui n'est pas toujours une tâche triviale. D'autre part, la probabilité de collision¹ avec les UP n'est pas nulle. Donc, les URC doivent faire en sorte de diminuer cette probabilité et de diminuer la durée d'une collision autant que possible si elle a lieu. La deuxième approche qui est proposée pour résoudre le problème d'allocation des bandes spectrales est présentée dans (Niyato et Hossain, 2008). Malgré que les auteurs utilisent la théorie des jeux pour résoudre le problème d'allocation des bandes spectrales, nous nous intéressons plus tôt à l'approche adoptée. Cette approche consiste à vendre les bandes spectrales aux différents URC lorsque les UP ne les utilisent pas. De l'autre côté, les URC se disputent entre eux l'achat de ces trous spectraux. Dans cette approche la gestion dynamique des bandes spectrales et la détection spectrale sont réalisées par le réseau primaire, ce qui entraîne moins de tâches fastidieuses à réaliser par les URC. Donc, la tâche des URC se résume à négocier les trous spectraux avec les UP. L'autre avantage à mentionner est la diminution voire l'élimination de collision avec les UP grâce à leur gestion des bandes spectrales c.-à-d. qu'ils ne donnent l'accès aux URC que si et seulement si la bande spectrale n'est pas utilisée par un UP.

La gestion dynamique des bandes spectrales est un problème d'optimisation. Les trous spectraux sont altérés au fil du temps et ils se déplacent ce qui rend ce problème dépendant du temps et de l'emplacement. Dans un sens, ce problème d'optimisation est équivalent au problème de coloriage de graphe avec liste comme le suggèrent les auteurs de (Zheng et Peng, 2005). Comme mentionné au début de cette section, trouver une

1. Une collision dans un réseau se produit lorsqu'au moins deux utilisateurs du même réseau qui partagent le même canal tentent d'envoyer des paquets au même moment.

solution exacte et optimale à ce problème est NP-difficile et dans la plupart des cas ce n'est pas réalisable.

D'autre part, les auteurs de (Wang *et al.*, 2009) s'inspirent du travail de (Zheng et Peng, 2005) pour essayer de résoudre le problème de partage des bandes spectrales. Dans le travail de (Wang *et al.*, 2009), les auteurs définissent des règles d'allocation basées sur l'équité entre les différents URC. Ensuite, ils proposent un algorithme centralisé qui utilise les règles d'allocation pour trouver la meilleure solution.

Finalement, les auteurs de (Swami *et al.*, 2008) s'inspirent aussi du travail de (Zheng et Peng, 2005) pour résoudre le problème de partage. La contribution des auteurs consiste dans l'attribution d'une priorité aux bandes spectrales. Ceci permet d'obtenir de la QoS au sein du système.

La distinction qui caractérise notre travail par rapport aux travaux cités se résume dans les deux points suivants.

- Dans les travaux précédents, les auteurs ne considèrent pas la présence d'utilisateurs primaires dans le système pour faciliter la résolution du problème ; or cette supposition est irréaliste. Tandis que dans notre travail, nous avons pris en considération la présence des utilisateurs primaires et nous avons défini les contraintes pour ne pas créer d'interférence au niveau des récepteurs primaires ;
- Le deuxième point consiste dans la définition d'une nouvelle métrique d'interférence simple pour notre travail. Dans les travaux précédents, l'hypothèse utilisée empêche la coexistence de deux transmissions secondaires sur la même bande spectrale ce qui engendre un gaspillage considérable des ressources spectrales. La métrique était zéro ou un pour désigner respectivement l'absence ou la présence d'interférence entre deux transmissions secondaires qui sont sur la même bande spectrale.

2.6.2 Les approches basées sur la théorie des jeux

D'après l'auteur (Rasmusen, 2006), la théorie des jeux est un ensemble d'outils analytiques conçus pour aider à comprendre le phénomène qui se produit lors de la prise de décision entre deux ou plusieurs décideurs. Cette théorie suppose que les décideurs cherchent à atteindre des objectifs bien définis et qu'ils ont une connaissance du comportement des autres décideurs. De plus, les conséquences de ces décisions ou actions peuvent engendrer des pertes ou des gains aux autres décideurs. Autrement dit, les décisions de chaque décideur peuvent affecter les autres. Cette théorie est principalement utilisée en l'économie afin de modéliser, par exemple, la compétition entre plusieurs sociétés qui se disputent des parts de marché. Dans les réseaux, on a recours à cette théorie pour résoudre les problèmes d'allocation des ressources et de routage dans les environnements compétitifs tels que les RRC.

Les auteurs de (Etkin *et al.*, 2007) proposent une modélisation du problème de partage des bandes spectrales en un jeu non coopératif et répétitif dans lequel les joueurs, représentant des transmissions secondaires, cherchent à maximiser leurs gains à chaque nouvelle manche (*game stage*). Dans (Wang *et al.*, 2010), les auteurs proposent une modélisation du problème en une enchère sur la bande passante. Les URC font des offres pour acheter des bandes spectrales et les utilisateurs primaires, suite à ces offres et à leur propre disponibilité, acceptent ou refusent de permettre aux URC d'accéder aux bandes spectrales. Ce modèle est formulé aussi comme étant un jeu non coopératif. Dans (Ji et Liu, 2007), les auteurs proposent une revue de littérature des principaux algorithmes de partage des bandes spectrales utilisant la théorie des jeux.

2.6.3 Avantages et inconvénients des approches

Une bonne gestion spectrale du spectre radio passe par la conception d'un algorithme efficace de partage des bandes spectrales. L'efficacité d'un algorithme dans ce contexte se définit en termes de bonnes performances de transmission et un temps de calcul réduit.

L'algorithme doit satisfaire les exigences des différents URC en termes de QoS et d'équité. Plusieurs algorithmes ont été développés sur une courte période de temps. Ces algorithmes sont essentiellement basés sur la théorie des graphes ou sur la théorie des jeux. Dans ce qui suit, nous discutons les avantages et les inconvénients de chaque approche.

Les algorithmes issus de la théorie des jeux présentent l'avantage d'être des algorithmes distribués qui ne nécessitent pas de point central pour prendre une décision. Cependant, le nombre des messages de signalisation qui servent à synchroniser les usagers secondaires avant de transmettre est très élevé, ce qui crée un gaspillage des ressources dans des messages de contrôle au lieu de se focaliser sur l'envoi réel de données, et une complexité d'implémentation additionnelle. De plus, la stratégie non coopérative des usagers dégrade le débit global dans le système, car chaque usager essaie seulement de maximiser son débit sans vraiment s'intéresser aux autres. Dernier et important point, un temps de calcul élevé découle de la complexité des algorithmes utilisant la théorie des jeux. Ceci n'est pas pratique lorsqu'on a un environnement aussi dynamique que celui des RRC ; à chaque intervalle de temps il y a la possibilité d'apparition d'un utilisateur primaire sur la bande spectrale ce qui fait cette dernière devient inaccessible à un usager secondaire.

Les algorithmes issus de la théorie des graphes nécessitent la présence d'une entité centrale pour y être implémentée. Dépendre d'une entité centrale est le point faible de ces algorithmes. Pour y remédier, on peut penser à élire un URC qui prendra la place d'une station de base lors de l'inexistence de celle-ci. Toutefois, les approches centralisées donnent de meilleures performances et sont simples à implémenter. La rapidité de calcul des algorithmes et l'efficacité de ces derniers nous ont poussés à choisir la théorie des graphes au lieu de la théorie des jeux.

CHAPITRE III

CONTRIBUTION

Dans ce document, nous nous consacrons à étudier les communications opportunistes des utilisateurs à radio cognitive. Les utilisateurs sont des utilisateurs secondaires qui coexistent avec des utilisateurs primaires. Cette coexistence est possible grâce au paradigme *underlay* d'allocation des bandes spectrales que nous avons précédemment présenté. Les utilisateurs primaires ne coopèrent pas avec les utilisateurs secondaires et ils ne leur fournissent aucune information sur leur utilisation des bandes spectrales. L'un des défis majeurs du déploiement d'un réseau de radios cognitives est la conception d'un modèle d'accès aux bandes spectrales qui garantit une sélection dynamique et une allocation de puissance dans un environnement en perpétuel changement. Le modèle efficace serait capable de maximiser les performances du réseau de radios cognitives tout en préservant l'intégrité des transmissions primaires. Une métrique typique pour mesurer l'efficacité d'un réseau est la somme des débits de toutes les transmissions cognitives. Notre travail, que nous présentons dans cette section, consiste à modéliser ce problème de coexistence entre les utilisateurs secondaires et primaires, et ensuite à développer un algorithme qui résout le problème d'allocation des bandes spectrales. La solution présentée dans ce travail est simple, performante, facile à implémenter et rapide à exécuter. Nous détaillerons ces avantages tout au long de ce chapitre.

Ce chapitre est composé de deux sections. Dans la première section, nous présentons le modèle du système étudié et dans la seconde, nous décrivons la solution proposée ainsi que les démarches à suivre pour le développement de l'algorithme.

3.1 Modèle du système

Nous considérons un système de communication sans fil formé de N liens (ou communications). Chaque lien est composé d'une paire de nœuds émetteur/récepteur ayant des aptitudes cognitives. Ces aptitudes sont assurées par une radio logicielle. Dans les

réseaux traditionnels, la transmission est réalisée sur une seule bande spectrale qui est définie par le matériel de communication utilisé. Par contre, une radio logicielle permet aux nœuds d'échanger des données sur différents canaux à l'aide d'un récepteur radio et un émetteur radio principalement réalisés par logiciel. Supposons que deux URC veulent communiquer, l'émetteur et le récepteur se synchronisent sur la même bande spectrale et ajustent leurs paramètres de transmission. Bien évidemment, pour un intervalle de temps t , les URC utilisent un seul canal pour transmettre. La sélection du canal est basée sur l'environnement où les nœuds existent. Dans la suite de ce document, bande spectrale et canal sont deux termes équivalents qui désignent une portion du spectre. Nous appelons aussi la paire émetteur/récepteur secondaire un lien secondaire. Ces liens coexistent avec M autres liens composés de paires émetteur/récepteur et que nous appelons liens primaires (LP).

Tous les liens qui composent notre système existent dans la même région géographique. Par conséquent, ils partagent un nombre fini de bandes spectrales, K . Les liens primaires ont l'exclusivité de transmettre sur le canal pour lequel ils détiennent une licence, et ne doivent, en aucun cas, être dérangés par une transmission secondaire. Nous supposons que chaque émetteur primaire p ($p = 1, \dots, M$) utilise une seule bande spectrale pour effectuer sa transmission, c.-à-d. $M = K$. Pour simplifier les notations, nous désignons par p à la fois l'indice du lien primaire ainsi que de la bande spectrale sur laquelle il effectue sa transmission. Nous supposons aussi qu'il existe un nombre très important d'émetteurs secondaires par rapport au nombre de bandes spectrales disponibles (c.-à-d. $N \gg K$). Ces émetteurs cherchent à acquérir le droit d'émettre sur un des K bandes disponibles.

Nous considérons que le temps est divisé en intervalles selon un modèle classique d'accès multiple à répartition de temps, en anglais *Time Division Multiple Access* (TDMA). Les ressources spectrales sont allouées indépendamment dans chaque intervalle. Au début de chaque intervalle, le serveur spectral se réserve le droit de choisir l'ensemble des liens secondaires qui seront activés durant cet intervalle. Ainsi, le serveur spectral décide d'une manière centralisée le partage de spectre dans le but de maximiser une fonction objective. Cette dernière peut représenter n'importe quel critère de performance tel que le niveau

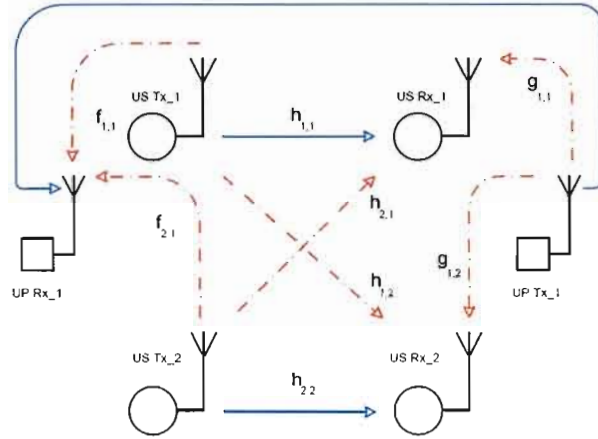


FIGURE 3.1: Un scénario de partage de spectre dans lequel deux paires émetteurs/récepteurs secondaires (US-Tx, US-Rx) coexistent avec un lien primaire (UP-Tx, UP-Rx)

d'équité du système ou la satisfaction des exigences en qualité de service. Toutefois, nous avons opté pour une fonction objective qui représente les performances en termes de débit global du système. Un lien secondaire activé devra transmettre sur la même bande spectrale durant tout l'intervalle de temps. La Figure 3.1, représente un scénario de partage de spectre composé de deux liens secondaires et un lien primaire. Dans cette figure, le serveur spectral devra choisir au plus deux liens secondaires à être activés dans la même bande spectrale $p = 1$ qu'utilise le lien primaire 1. L'ensemble des liens à activer doit être un des ensembles suivants : \emptyset , $\{1\}$, $\{2\}$ ou $\{1, 2\}$. Les différents coefficients présents sur la figure seront utilisés dans les équations qui suivent et seront détaillés par la suite.

Le signal reçu au nœud récepteur du lien secondaire i , ($i = 1, \dots, N$) utilisant la bande spectrale p est donné par l'équation suivante :

$$y_i = \sqrt{P_i} h_{i,i} x_i + \sum_{j \in S_p, j \neq i} \sqrt{P_j} h_{j,i} x_j + \sqrt{P_p} g_{p,i} x_p + z_i, \quad (3.1)$$

où x_i et P_i sont respectivement le signal envoyé et la puissance de transmission sur le lien secondaire i . z_i représente le bruit blanc Gaussien additif modélisé par une variable complexe suivant une distribution Gaussienne de moyenne nulle et de variance $\sigma_{z_i}^2$. Nous

désignons par $h_{i,i}$ le coefficient du canal entre l'émetteur et le récepteur du lien secondaire i , $h_{j,i}$ le coefficient du canal entre l'émetteur secondaire du lien j et le récepteur du lien secondaire i et $g_{p,i}$ le coefficient du canal entre l'émetteur primaire du lien p et le récepteur secondaire du lien i . On dénote aussi par S_p l'ensemble des liens secondaires activés dans la même bande spectrale p .

Le second terme dans l'équation 3.1 représente l'interférence causée par les autres liens secondaires partageant la même bande spectrale que celle utilisée par le lien i , que nous appelons interférence secondaire I_{s_i} . Le troisième terme dans l'équation 3.1 représente l'interférence causée par l'émetteur primaire p opérant dans la même bande spectrale que le lien i . Cette interférence sera appelée interférence primaire I_{p_i} . L'équation 3.1 pourra être réécrite comme suit :

$$y_i = \text{signal utile} + I_{s_i} + I_{p_i} + \text{bruit.} \quad (3.2)$$

Le système étudié opère en mode de transmissions cognitives simultanées (*underlay*), et par conséquent la transmission primaire supporte un certain niveau d'interférence provenant des transmissions secondaires. Toutefois, ce seuil d'interférence doit être respecté en tout temps, et ne peut être dépassé. Pour cela, nous considérons que le serveur spectral accomplit cette tâche en protégeant les transmissions des UP grâce à un contrôle de puissance au niveau des émetteurs secondaires. Le serveur spectral décide donc de la puissance de transmission permise pour chaque lien secondaire activé. On définit Γ_p comme étant le seuil d'interférence tolérable par le récepteur primaire du lien p . En respectant ce seuil, l'interférence causée par les émetteurs secondaires sur le lien de l'UP n'est pas considérée nuisible. La contrainte de puissance d'interférence pour chaque transmission primaire p est définie par l'inéquation suivante :

$$\sum_{i \in S_p} |f_{i,p}|^2 P_i \leq \Gamma_p, \quad (3.3)$$

où $f_{i,p}$ est le coefficient du canal entre l'émetteur secondaire du lien i et le récepteur

primaire du lien p .

Les coefficients de canal ($h_{j,i}, g_{p,i}$ et $f_{i,p}$ pour tout $i = 1, \dots, N$; $j = 1, \dots, N$; $p = 1, \dots, M$) sont supposés fixes durant la durée d'un intervalle de temps mais varient indépendamment d'un intervalle à un autre. Ils s'écrivent sous la forme :

$$h_{j,i} = \sqrt{d_{j,i}^{-\alpha}} e_{j,i}, \quad (3.4)$$

$$g_{p,i} = \sqrt{d'_{p,i}^{-\alpha}} e'_{p,i}, \quad (3.5)$$

$$f_{i,p} = \sqrt{d''_{i,p}^{-\alpha}} e''_{i,p}, \quad (3.6)$$

où $d_{j,i}$ est la distance entre l'émetteur secondaire du lien j et le récepteur secondaire du lien i , $d'_{p,i}$ est la distance entre l'émetteur primaire p et le récepteur secondaire i et $d''_{i,p}$ est la distance entre l'émetteur secondaire i et le récepteur primaire p . α est l'exposant de l'affaiblissement de propagation et $e_{j,i}$ ainsi que $e'_{p,i}$ et $e''_{i,p}$ sont des variables aléatoires complexes indépendantes et identiquement distribuées (i.i.d.) suivant une distribution Gaussienne de moyenne nulle et de variance unitaire. La relation entre ces variables modélisent un évanouissement de Rayleigh (Goldsmith, 2005). Nous supposons que le serveur spectral responsable de la coordination des transmissions secondaires connaît les gains de tous les canaux (c.-à-d. les canaux des liens secondaires, les canaux entre les émetteurs secondaires et les récepteurs primaires et les canaux entre les émetteurs primaires et les récepteurs secondaires). Ces gains correspondent mathématiquement aux carrés des coefficients des canaux et sont supposés disponibles au début de chaque intervalle de temps sans erreur au serveur spectral.

Les récepteurs des liens secondaires n'utilisent aucune technique spécifique d'annulation d'interférence. Ils décodent l'information reçue en considérant l'interférence causée par les autres émetteurs (secondaires et primaires) partageant la même bande spectrale comme du bruit. Par conséquent, le débit possible (défini comme l'efficacité spectrale en

bit/s/Hz) du lien secondaire i lorsqu'il est activé sur le canal p est donné par la formule de Shannon (Shannon, 1948) et peut s'écrire comme suit :

$$R_i^{(p)} = \log_2 \left(1 + SINR_i^{(p)} \right), \quad (3.7)$$

où $SINR_i$ correspond au rapport du signal sur bruit plus interférence (SINR) au niveau du récepteur secondaire du lien i qui utilise la bande spectrale p . En utilisant les équations (3.1) et (3.2), ce rapport peut ainsi s'écrire sous la forme suivante :

$$SINR_i^{(p)} = \frac{\text{puissance du signal utile}}{\text{puissance de l'interférence } (I_{s_i} + I_{p_i}) + \text{puissance du bruit}}, \quad (3.8)$$

$$= \frac{P_i |h_{i,i}|^2}{\sigma_{z_i}^2 + \sum_{\substack{j \in S_p \\ j \neq i}} P_j |h_{j,i}|^2 + P_p |g_{p,i}|^2}. \quad (3.9)$$

Par conséquent, le débit du lien secondaire i est donné comme suit :

$$R_i^{(p)} = \log_2 \left(1 + \frac{P_i |h_{i,i}|^2}{\sigma_{z_i}^2 + \sum_{\substack{j \in S_p \\ j \neq i}} P_j |h_{j,i}|^2 + P_p |g_{p,i}|^2} \right). \quad (3.10)$$

Le débit global du système R est donné par la somme de tous les débits de la totalité des liens secondaires activés durant l'intervalle de temps courant. Ce débit est donné comme suit :

$$R = \sum_{p=1}^M \sum_{i \in S_p} R_i^{(p)}. \quad (3.11)$$

Au début de chaque intervalle de temps t , le serveur spectral effectue les deux tâches suivantes : (i) le choix des liens secondaires à activer durant l'intervalle t et (ii) l'allocation de puissance aux liens sélectionnés. La première tâche consiste à trouver les paires (lien

secondaire i , bande spectrale p) à activer telles que l'émetteur du lien i utilise le canal p pour effectuer sa transmission. Comme deuxième tâche, le serveur effectue une allocation de puissance centralisée pour les transmissions secondaires activées tout en respectant les contraintes d'interférences exprimées par l'équation (3.3). Afin de simplifier au maximum les traitements que doit effectuer le serveur lors de l'opération d'allocation de puissance, nous optons pour un modèle d'allocation de puissance qui combine performance et simplicité. Toutefois, d'autres algorithmes d'allocation de puissance, plus performant en termes de maximisation du débit, mais ayant une plus grande complexité de calcul, peuvent être facilement adaptés à notre modèle du système tel que ceux proposés par (Le et Hossain, 2008) et (Foschini et Miljanic, 1993).

Afin de respecter la contrainte donnée par l'inéquation (3.3), les puissances permises au niveau des émetteurs secondaires activés ne peuvent dépasser un certain seuil. Ainsi, le modèle d'allocation de puissance utilisé distribue d'une manière dite uniforme la somme de puissance permise, mais toutefois la puissance de transmission de chaque émetteur secondaire dépend de l'état de son canal avec le récepteur primaire. Nous appelons cette allocation, l'allocation uniforme de puissance (AUP) et la portion de puissance allouée à chaque usager i pour ce type d'allocation est donnée par :

$$P_i = \frac{\Gamma_p}{\text{card}(S_p) |f_{i,p}|^2}, \quad (3.12)$$

où $\text{card}(\cdot)$ est le nombre d'éléments dans l'ensemble.

3.2 Description de la proposition

3.2.1 Problème de coloriage avec liste de couleurs valuées

Soit $G = (V, E)$ un graphe non-orienté avec V l'ensemble des sommets et E l'ensemble des arêtes. Chaque sommet dans G possède une liste ordonnée de L poids. Nous notons par $w_l^{(v)}$ ($l = 1, \dots, L$) les différents poids du sommet $v \in V$. On dispose aussi d'une

liste de couleurs $\Omega = \{c_1, c_2, \dots, c_L\}$ qui contient exactement L couleurs. Le problème de coloriage avec liste de couleurs valuées (CLCV) consiste à trouver un coloriage C_V avec au plus L couleurs et maximisant la somme des poids des sommets colorés. En d'autres termes, cette opération de coloriage fournit un ensemble de paires (Sommet v , Couleur c_l) tel que la somme des poids $w_l^{(v)}$, $(v, c_l) \in VC$ est maximisée. En effet, si un sommet v est coloré par la couleur $c_l \in C$ alors on ajoute la valeur du poids $w_l^{(v)}$ à la somme. L'ensemble obtenu contient au maximum $\text{card}(V)$ paires et deux sommets adjacents ne peuvent être colorés par la même couleur. Par conséquent, il se peut que plusieurs sommets de V restent non colorés.

La formulation mathématique de ce problème est comme suit :

Chercher C_V

$$\text{tel que } \max_{C_V} \sum_{v \in V'} w_l^{(v)}$$

avec V' l'ensemble des sommets colorés et l l'indice de la couleur attribuée à v .

Le problème de coloration de sommets introduit dans la section 2.5 constitue un cas spéciale du problème CLCV. Par conséquent, le problème CLCV est aussi NP-difficile (Zheng et Peng, 2005).

La Figure 3.2 représente un exemple de graphe coloré ayant la somme des poids des sommets choisis maximisée. Le graphe est constitué de cinq sommets, $V = \{1, 2, 3, 4, 5\}$. Chaque sommet possède trois poids (i.e. $L = 3$). Nous disposons aussi de la liste de couleurs $\Omega = \{c_1, c_2, c_3\}$. Par conséquent, si le sommet v est coloré par la couleur c_l alors la somme des poids est incrémenté par le l^{eme} poids de la liste de v . La coloration optimale du graphe de la figure 3.2 nous donne l'ensemble : $\{(1, c_1), (2, c_2), (3, c_1), (4, c_2), (5, c_3)\}$ telle que la somme des poids est égale à 11, 5.

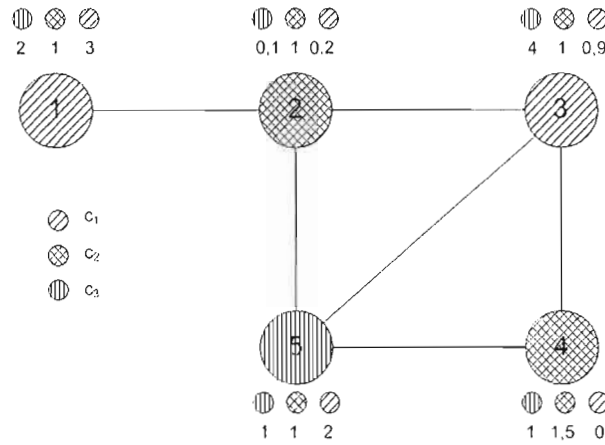


FIGURE 3.2: Graphe coloré en maximisant la somme des poids des sommets choisis.

3.2.2 Application de la formulation au réseau secondaire

Nous modélisons notre réseau secondaire en tant que graphe non-orienté $G = (V, E)$ qui change de topologie au début de chaque intervalle de temps en utilisant les gains des canaux secondaires. Chaque sommet v_i dans le graphe correspond à un lien secondaire i , ($i = 1, \dots, N$) tel que $\text{card}(V) = N$. Nous supposons qu'il y a une arête entre deux sommets (v_i, v_j) si et seulement si :

$$\alpha_{ij} = |h_{i,j}|^2 |h_{j,i}|^2 > \epsilon, \quad (3.13)$$

où α_{ij} représente le degré d'interférence mutuelle entre deux transmissions et ϵ le seuil d'interférence tolérable pour que deux transmissions coexistent sur la même bande spectrale pendant le même intervalle de temps. Nous considérons que chaque sommet dans le graphe possède M poids non négatifs (M qui constitue aussi le nombre de bandes spectrales disponibles).

Les poids du sommet v_i sont donnés par :

$$w_p^{(i)} = \log_2 \left(1 + \frac{P_i |h_{i,i}|^2}{\sigma_{z_i}^2 + P_p |g_{p,i}|^2} \right) \quad p = 1, \dots, M. \quad (3.14)$$

Chaque poids $w_p^{(i)}$ correspond à l'efficacité spectrale du lien i si ce dernier est activé dans la bande spectrale p . Toutefois, le terme représentant la puissance des interférences causées par les autres transmissions secondaires n'est pas présent dans le calcul des poids. En effet, lors de la construction du graphe nous ne disposons pas encore d'informations sur les liens qui vont se partager une même bande spectrale.

Le choix du seuil d'interférence ϵ est crucial, car il affecte directement le nombre de liens secondaires qui peuvent être activés sur une même bande spectrale. En choisissant une très petite valeur de ϵ , nous diminuons considérablement le nombre de transmissions sur la même bande spectrale ce qui entraîne une diminution du débit global dans le système. D'un autre côté, une grande valeur de ϵ est synonyme d'un grand nombre de transmissions actives sur le même canal. Suite à ce nombre important de communications, le niveau d'interférence dans le système augmentera et entraînera une baisse du débit global. La valeur optimale de ϵ est obtenue grâce à des simulations.

La Figure 3.3 illustre un graphe qui modélise un réseau secondaire formé de quatre liens $\{1, 2, 3, 4\}$, $N = 4$ et qui dispose de trois bandes spectrales $\{A, B, C\}$, $M = 3$. Les poids de chaque sommet (correspondant à un lien) sont également donnés.

En partant de quelques équivalences, nous montrons comment on peut transformer le problème de partage de spectre énoncé au début de ce chapitre en un problème de coloration de graphe CLCV. Premièrement, chaque lien secondaire est représenté par un sommet dans le graphe. Deuxièmement, le nombre de bandes spectrales est égale au nombre de poids de chaque sommet et au nombre de couleurs, soit $M = L = \text{Card}(\Omega)$. Par conséquent, une bande spectrale disponible est équivalente à une couleur parmi l'ensemble Ω . Ceci dit, une paire (Lien, Bande) est équivalente à une paire (Sommet, Couleur). Ainsi, résoudre le problème de partage de spectre revient à trouver une coloration optimale pour

le problème CLCV qui maximise la somme des poids des sommets colorés.

Contrairement à (Zheng et Peng, 2005), notre système permet à plusieurs transmissions secondaires d'être activées sur la même bande spectrale. En supportant un minimum d'interférence, les liens secondaires partageant la même bande spectrale peuvent transmettre leurs données. Grâce à cette innovation, nous augmentons le débit global et le nombre de liens actifs dans notre réseau. Dans notre graphe, si des sommets adjacents sont connectés par une arête alors les liens secondaires qui correspondent à ces sommets ne peuvent pas se partager la même bande spectrale car ils dépassent le seuil tolérable d'interférence ϵ . En d'autres termes, si un lien acquiert le droit de transmettre sur une bande spectrale p , les autres liens (qui correspondent aux sommets adjacents) devront choisir une bande spectrale différente. Dans l'indisponibilité d'une bande spectrale, les liens ne pourront pas être activés.

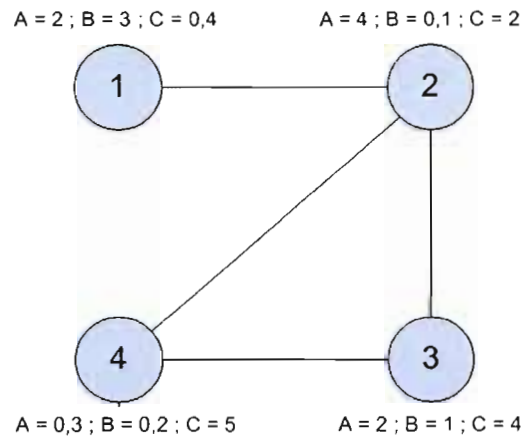


FIGURE 3.3: Un exemple de réseau secondaire modélisé en graphe, où 1,2,3 et 4 représentent les liens secondaires. A,B et C représentent les bandes spectrales. (2;3;0,4), (4;0,1;2), (2;1;4) et (0,3;0,2;5) représentent les débits maximaux (les poids) de chaque lien sur les trois bandes spectrales.

3.2.3 L'algorithme glouton de partage de spectre : GSSA

Notre algorithme commence par une étape d'initialisation durant laquelle il construit le graphe du réseau secondaire. Cette phase prend comme entrées les gains des canaux des

liens secondaires, le seuil d'interférence ϵ , le nombre de bandes spectrales disponibles (égal au nombre d'utilisateurs primaires) et l'allocation de puissance initiale des émetteurs secondaires. La puissance initiale des émetteurs secondaires est obtenue en supposant que chaque lien secondaire aura l'exclusivité d'utiliser le spectre disponible c.-à-d. une seule transmission pour chaque bande spectrale. Cela est vrai pour toutes les bandes spectrales qu'une transmission secondaire peut détecter dans sa zone géographique. Cette puissance représente réellement la puissance maximale permise par le seuil d'interférence tolérable du récepteur primaire utilisant une bande spectrale. En résumé, la puissance de transmission du lien secondaire i est calculée en supposant qu'il sera l'unique lien secondaire actif sur la bande spectrale, tout en respectant le seuil d'interférence de la transmission primaire (dans le respect de la contrainte donnée par (3.3)). Notons que chaque sommet a une liste de poids (chaque poids correspond à l'utilisation d'une couleur ou une bande spectrale), et que cette liste peut être mise à jour à chaque itération.

Dans la solution proposée, la paire (Sommet v_i , Couleur c_p) qui est équivalente à la paire (Lien i , Bande p) va être choisie de façon gloutonne. À chaque nouvelle itération, l'algorithme GSSA décide quel sommet sera colorié et quelle couleur lui sera attribuée. Cette décision est finale, c.-à-d. que l'algorithme ne permet aucune modification dans les itérations futures. Après avoir construit le graphe du réseau secondaire $G = (V, E)$, l'algorithme cherche le sommet (lien secondaire) v_i ayant le poids maximal $w_p^{(i)}$ et lui affecte la couleur c_p (bande spectrale). Deuxièmement, les poids qui correspondent à l'indice de la couleur c_p de tous les sommets adjacents à v_i seront réduits à zéro de telle sorte qu'ils ne pourront plus être coloriés par la même couleur c_p . Troisièmement, l'algorithme teste s'il existe dans le graphe d'autres sommets qui ne sont pas encore coloriés. À la découverte de ces sommets non coloriés, l'algorithme répète la première et deuxième étape. L'algorithme GSSA s'arrête si tous les sommets du graphe sont coloriés. Au final, nous obtenons un ensemble de paires (lien secondaire i , bande spectrale p) qui donne un débit global élevé du système. Après que la coloration du graphe soit accomplie, le serveur spectral applique la règle d'allocation de puissance AUP donnée par (3.12). Un schéma-bloc de l'algorithme est présenté dans la Figure 3.4.

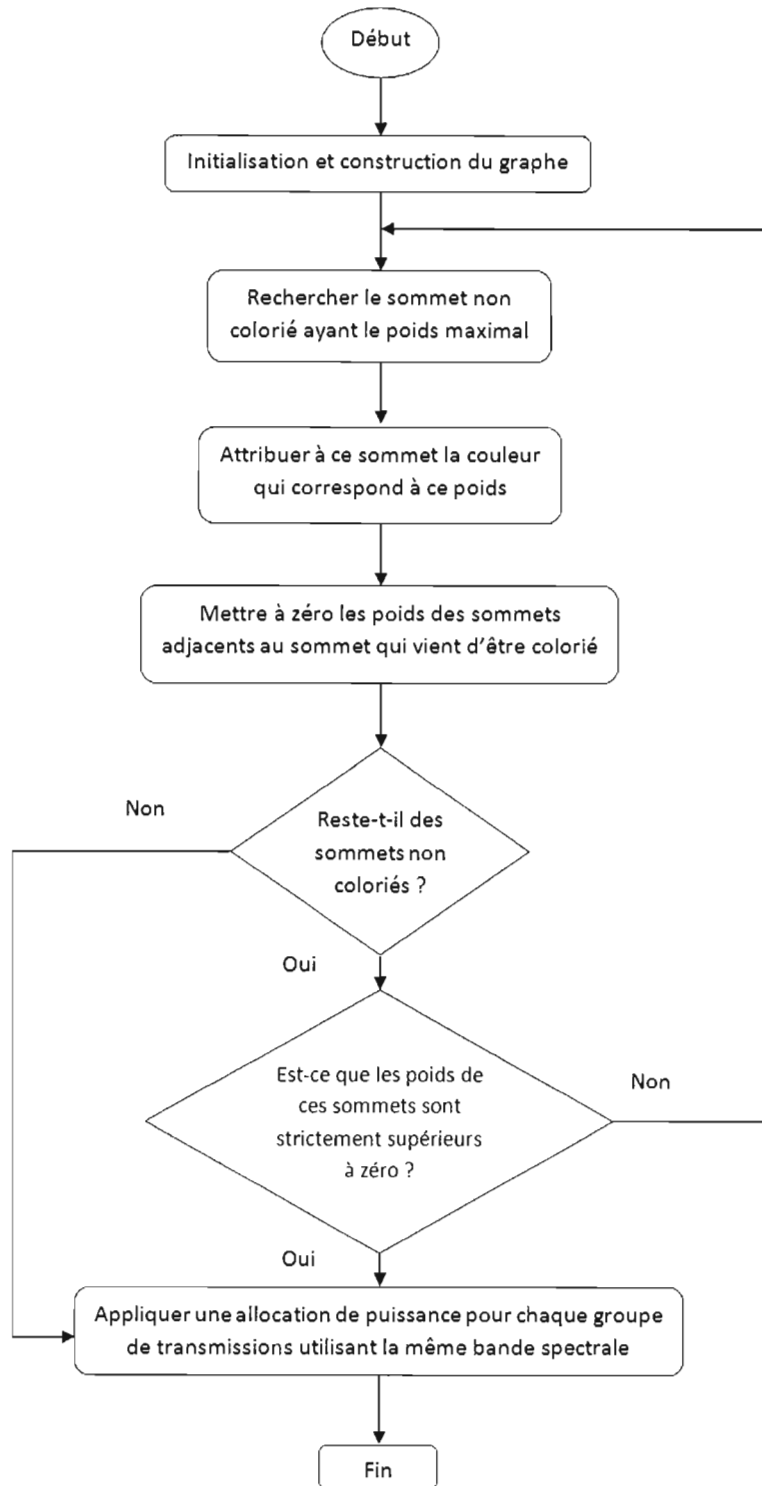


FIGURE 3.4: Schéma-bloc de l'algorithme GSSA de partage de spectre

3.2.4 Approche centralisée et défis liés à l'implémentation

Pour que l'opération du partage spectral se produise en toute fluidité, tous les gains des canaux doivent être disponibles au niveau du serveur spectral en tout temps. D'autre part, il faut que les transmissions secondaires respectent les contraintes d'interférence des transmissions primaires en tout temps. Ainsi, la réalisation d'un partage spectral combiné avec une allocation de puissance distribuée en mode *underlay* est une tâche fastidieuse, voire même impossible. Les raisons pour affirmer ceci sont les suivantes :

- Premièrement, les contraintes d'interférence doivent absolument être respectées en tout temps. Cette obligation n'est satisfaite que par une implémentation centralisée, car les émetteurs secondaires ne doivent pas causer d'interférence nuisible aux UP. Sans cette entité centrale, rien ne peut empêcher les émetteurs secondaires de générer de l'interférence nuisible aux UP. Dans notre système, le serveur spectral s'occupe de protéger les transmissions des UP. Par conséquent, l'adoption d'une approche centralisée représente un point fort dans notre travail et aussi une exigence d'implémentation lourde.
- Deuxièmement, les UP ne contribuent pas à l'acquisition de l'estimation du gain du canal des transmissions primaires par les US. Donc, les US ont une tâche supplémentaire qui consiste à transmettre les données concernant leurs gains des canaux au serveur spectral pour que ce dernier réussisse à partager le spectre et à assigner les valeurs de puissance de transmission idéales.

Lors de l'implémentation de notre algorithme centralisé, les gains de canal entre les utilisateurs secondaires peuvent être estimés en utilisant des techniques tels que le recours à un signal pilote ou autres approches similaires comme dans (Weiss et Friedlander, 1999) et (Chen *et al.*, 2001). Le gain du canal entre un émetteur secondaire et un récepteur primaire (Figure 3.1) peut-être estimé en employant des détecteurs placés à proximité des récepteurs primaires. Ces détecteurs ont pour rôle de transmettre les gains de canal collectés au serveur spectral (Banerjee *et al.*, 2006).

De façon générale, l'utilisation des détecteurs est une pratique courante pour collecter des informations sur l'estimation du canal. Dans le cas particulier où les liens secondaires partageant la bande passante montante des réseaux primaires cellulaires ou les réseaux locaux sans fil utilisant une technique de multiplexages FDD/CDMA (en anglais *frequency Division Duplexing/Code Division Multiple Access*), les détecteurs sont placés près des stations de bases ou des points d'accès pour effectuer l'estimation du canal.

3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre contribution à la recherche liée au partage spectral dans les réseaux de radios cognitives. Nous avons commencé par détailler le modèle du système que nous avons étudié, ensuite nous avons formulé le problème en graphe. En dernier lieu, pour résoudre ce problème de partage spectral nous avons conçu et implémenté un algorithme au sein du serveur spectral.

Dans le prochain chapitre, nous présentons les paramètres et résultats de simulation obtenus en exécutant notre algorithme GSSA dans le modèle du système proposé.

CHAPITRE IV

ÉVALUATION DES PERFORMANCES PAR SIMULATIONS

4.1 Outil et paramètres de simulation

4.1.1 Outil de simulation

La totalité de nos simulations sont réalisées en vue d'illustrer l'efficacité de l'algorithme GSSA proposé. Elles ont été développées en utilisant le logiciel Matlab sous la version R2007a. La motivation derrière l'utilisation de Matlab est qu'il dispose d'un nombre important de structures et de fonctions qui permettent de représenter et de manipuler d'une manière simple et efficace les données de nos simulations.

4.1.2 Paramètres utilisés

Les différentes simulations réalisées utilisent une cellule circulaire avec un diamètre de 1000 mètres. Tous les émetteurs primaires et secondaires sont placés aléatoirement avec une distribution uniforme dans la cellule, indépendamment les uns des autres. Pour chaque lien, le récepteur est toujours placé à 150 mètres horizontalement à droite de l'émetteur correspondant. La Figure 4.1 illustre une cellule où 20 communications secondaires coexistent et tentent d'être activées en la présence de 8 communications primaires.

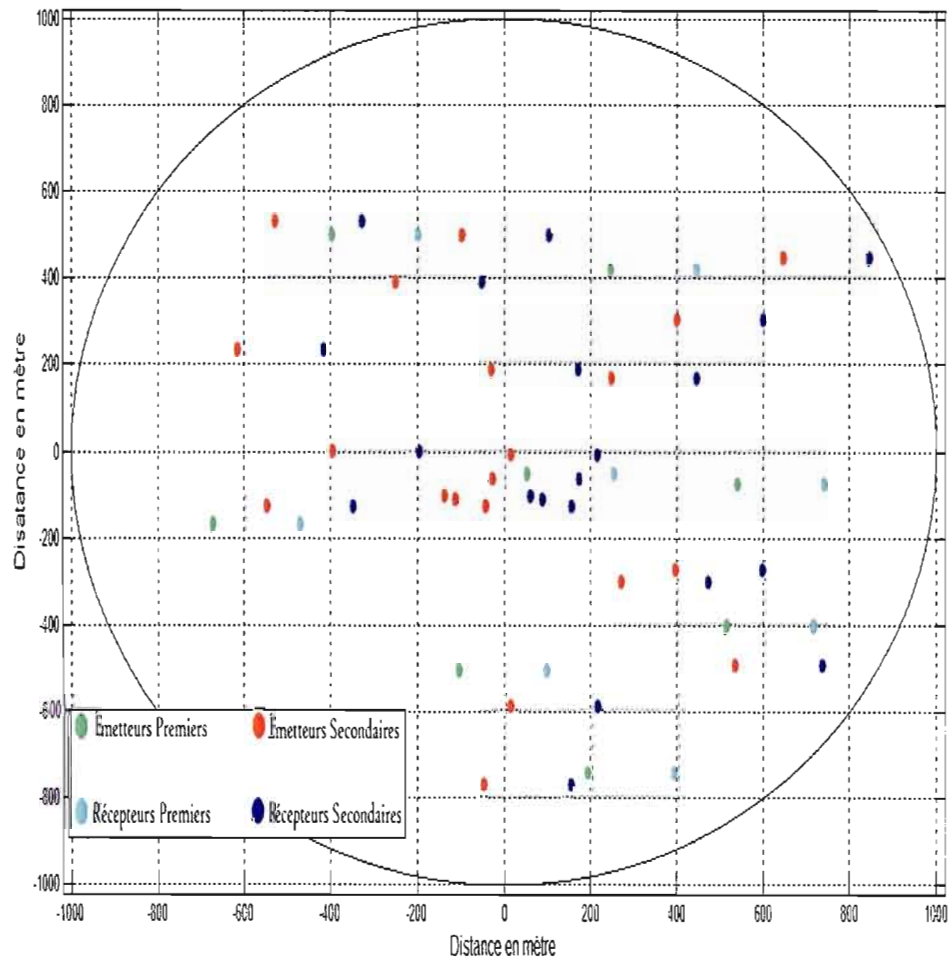


FIGURE 4.1: Un exemple d'une cellule avec 20 communications secondaires et 8 communications primaires

Le signal de chacune des transmissions subit, en plus de l'évanouissement plat du canal, un affaiblissement dû au trajet qu'il emprunte. Nous avons choisi un exposant d'affaiblissement de parcours égal à quatre ($\alpha = 4$). La valeur choisie pour cet exposant est la plus utilisée dans les simulations de la littérature vu qu'elle dépend de la nature du milieu de propagation et la densité des obstacles ($\alpha = 2$ pour les transmissions dans l'espace libre et $\alpha = 6$ pour les milieux à grande densité d'obstacles). Nous supposons

que la variance du bruit additif est égale à l'unité. Par le biais de simulations, nous avons pu déterminer la valeur optimale de ϵ , le degré d'interférence mutuelle maximale permis entre deux communications secondaires pour qu'elles puissent coexister et utiliser la même bande spectrale. La valeur de ϵ utilisée est considérée optimale en termes de maximisation du débit global du système. D'un autre côté, du point de vue des communications primaires, nous fixons le seuil d'interférence toléré par les récepteurs des UP à cinq dB ($\Gamma_p = 5$ dB, $\forall p = 1, \dots, M$).

4.2 Résultats et discussions

Dans cette section, nous présentons et analysons quelques résultats de simulations réalisés. Les performances de l'algorithme proposé sont évaluées en termes du débit global du système et du débit moyen par transmission. Rappelons que le débit global représente la somme de tous les débits des transmissions secondaires activées dans chaque intervalle de temps. Pour chaque simulation, nous présentons le débit moyen calculé sur une durée de 10,000 intervalles de temps.

Nous comparons les débits obtenus par notre algorithme GSSA à deux autres algorithmes en fonction du nombre total des liens secondaires, la Figure 4.2, et du nombre total des bandes de fréquence disponibles, Figure 4.3. Nous présentons également le débit de chaque lien secondaire dans la Figure 4.4. Le premier algorithme, auquel nous avons donné le nom de l'algorithme de partage basique de spectre, permet à une seule transmission d'être activée dans chaque bande spectrale (ceci correspond à $\epsilon = 0$). Cet algorithme reprend en grande partie le principe de sélection proposé par (Zheng et Peng, 2005) qui utilise une métrique d'interférence très simplifiée où deux transmissions échouent si elles interfèrent, indépendamment du degré de cette interférence. Par conséquent, l'utilisation d'une telle métrique oblige à activer une seule communication secondaire (parmi les liens interférents) par bande spectrale ce qui pénalise clairement le débit global du système, surtout lorsque l'interférence est négligeable. Le deuxième algorithme utilisé dans nos comparaisons est appelé l'algorithme de partage complet de spectre. Cet algorithme per-

met à toutes les transmissions secondaires d'être activées durant le même intervalle de temps. Lors du choix des liens à activer, l'algorithme accorde la plus grande priorité aux liens ayant les plus grands débits. Il ne se soucie pas du degré d'interférence mutuelle entre les transmissions activées dans la même bande spectrale.

La Figure 4.2, illustre le débit global du RRC en fonction du nombre total de liens secondaires (incluant les liens actifs et ceux qui attendent d'être activés). Pour cette première simulation, nous supposons qu'il existe cinq bandes spectrales. Par conséquent, cinq paires émetteurs/récepteurs primaires coexistent avec les liens secondaires et les transmissions primaires doivent être protégées par le serveur spectral en respectant le seuil d'interférence qu'elles tolèrent. Les résultats de cette simulation, donnés par la Figure 4.2, illustrent l'effet de la diversité de sélection dont dispose le serveur spectral lors de son choix des liens secondaires à activer. En effet, à cause du caractère variable des coefficients d'évanouissement des canaux des différents liens (primaire-secondaire et secondaire-secondaire), le serveur spectral dispose de plus de choix lorsque le nombre de liens secondaires augmente. Nous observons que l'algorithme proposé dans ce mémoire atteint des débits globaux meilleurs que ceux réalisés par les deux autres algorithmes (basique et complet). De plus, cet écart de performances s'élargit en augmentant le nombre de liens secondaires N dans le réseau, de 5% lorsque $N = 10$, il atteint plus de 50% lorsque $N = 80$. Ainsi, nous pouvons conclure que notre algorithme permet d'obtenir un gain considérable en diversité de sélection de liens à activer comparée aux deux autres algorithmes qui voient leurs courbes de débit rapidement saturées.

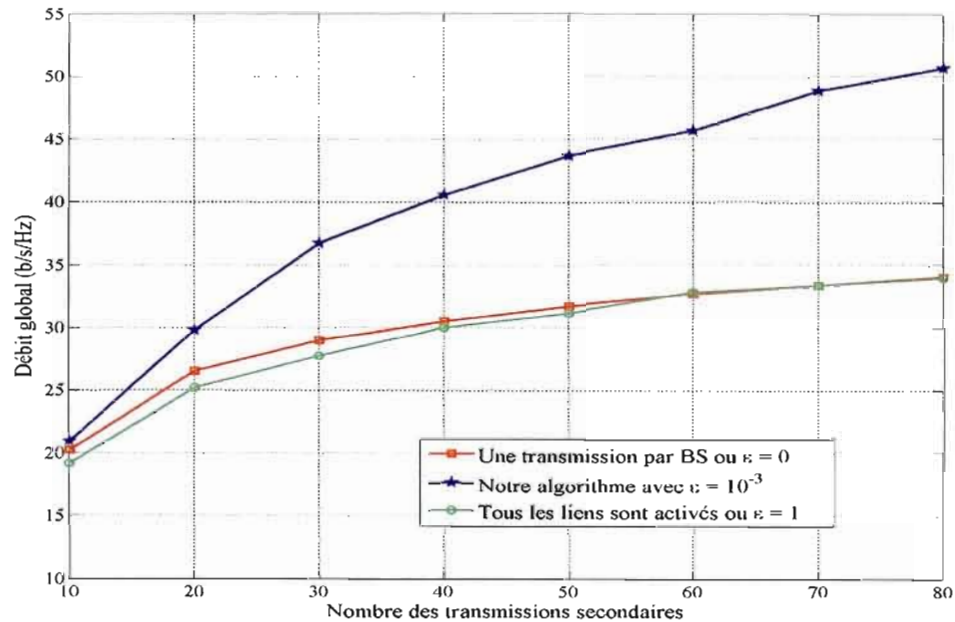


FIGURE 4.2: Le débit global du réseau de radios cognitives en fonction des transmissions secondaires

La deuxième simulation que nous avons réalisée avait comme objectif d'évaluer le degré d'amélioration du débit global du réseau lorsque d'autres bandes spectrales peuvent être utilisées par les liens secondaires. La Figure 4.3, compare les performances des trois algorithmes en termes de débit global en faisant varier le nombre de bandes de fréquence disponibles de deux à sept ($2 \leq M \leq 7$). Lors de cette simulation, nous avons fixé le nombre de transmissions secondaires à 30. Nous observons qu'en faisant augmenter le nombre de bandes spectrales que les transmissions secondaires peuvent utiliser, le débit global du réseau des trois algorithmes augmente presque linéairement. Comme prévu, le débit global atteint par l'algorithme glouton proposé est toujours supérieur aux débits obtenus en utilisant les deux autres algorithmes. Aussi, l'écart de performances entre notre algorithme et les deux autres algorithmes basique et complet reste presque le même, autour de 25%, pour toutes les valeurs de M . Ainsi, la Figure 4.3 montre que l'algorithme glouton améliore d'une manière considérable le débit global du système pour chaque nouvelle opportunité (bande spectrale) qui se présente au serveur spectral.

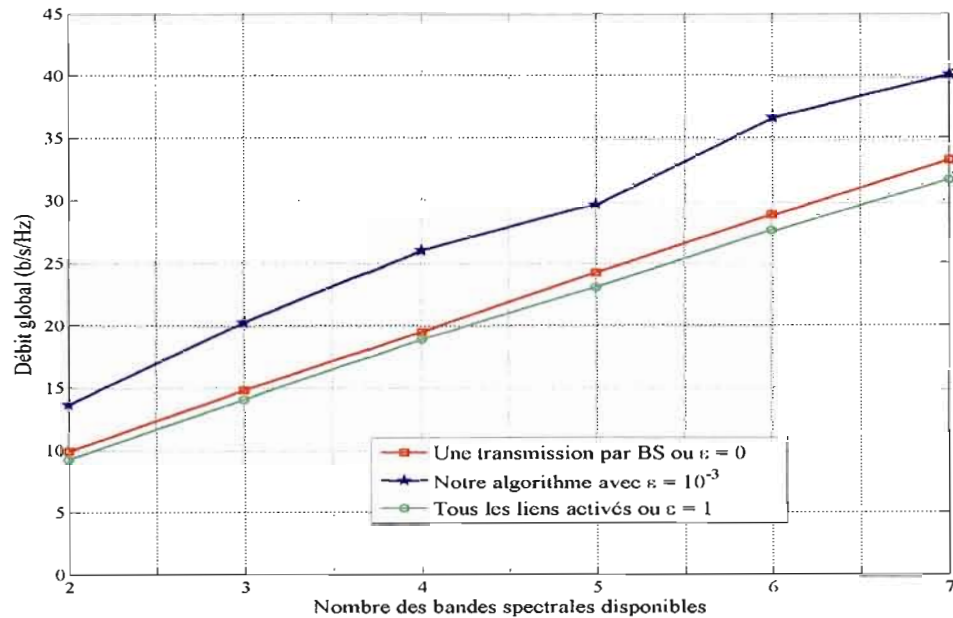


FIGURE 4.3: Le débit global du réseau de radios cognitives en fonction des bandes spectrales disponibles

La Figure 4.4, illustre le débit moyen de chaque transmission secondaire présente dans le réseau. Dans cette simulation, vingt liens secondaires coexistent avec cinq liens primaires dans une même cellule. Par conséquent, le serveur spectral dispose de cinq bandes spectrales à allouer aux liens secondaires. Nous comparons les résultats obtenus par l'algorithme glouton proposé à ceux réalisés en utilisant l'algorithme basique. Ainsi, nous remarquons que lorsque le serveur spectral utilise l'algorithme glouton, toutes les transmissions secondaires, sans exception, atteignent des débits meilleurs que ceux obtenus via l'utilisation de l'algorithme basique. Ce résultat est justifié par le fait que l'algorithme proposé choisit efficacement plusieurs communications pour chaque bande spectrale en se basant sur le degré d'interférence mutuelle. Par conséquent, malgré la coexistence de plus d'une communication dans une même bande spectrale, ces communications ne sont pas pénalisées par l'interférence et au contraire atteignent des débits plus élevés. Toutefois, l'algorithme glouton n'est pas équitable entre les différentes transmissions secondaires contrairement à l'algorithme basique. En effet, l'objectif de l'algorithme proposé étant la

maximisation du débit global du réseau, il ne se soucie pas du degré d'équité qu'il doit atteindre. Cependant, l'adoption d'une règle d'équité simple telle que l'équité proportionnelle permettra de régler le problème soulevé tout en gardant des débits par transmission meilleurs que ceux atteints par l'algorithme basique.

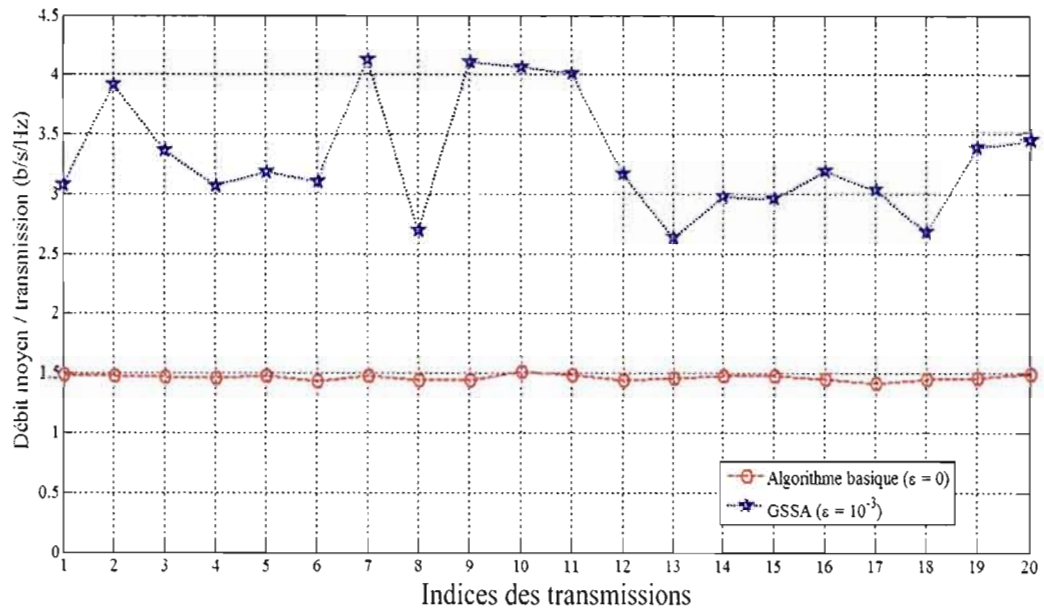


FIGURE 4.4: Le débit moyen de chaque transmission secondaire

Rappelons que la solution optimale du problème de sélection des transmissions des US (connu comme étant un problème NP-difficile) est possible à déterminer grâce à un algorithme exécutant une recherche exhaustive de toutes les combinaisons possibles. Malgré le fait que la solution obtenue serait optimale, sa complexité temporelle reste, néanmoins, très élevée et donc inutilisable dans un scénario de partage spectral dynamique qui nécessite un temps de calcul très bas. La complexité temporelle serait de l'ordre de $\sum_{k=0}^{N-1} \binom{N}{k} M^{N-k}$ puisqu'il faut choisir k liens secondaires ($k = 1, \dots, N$) pour chacune des M bandes spectrales ($M \ll N$). Dans la Figure 4.5, nous comparons les performances entre l'algorithme proposé GSSA et la recherche exhaustive optimale. Cette comparaison nous permet de quantifier le taux de perte en débit et de savoir si le compromis

entre simplicité et optimalité est bénéfique ou non dans notre scénario. Dans cette figure, on suppose qu'il y a trois bandes spectrales disponibles et que N transmissions secondaires se disputent l'accès à ces bandes. On considère un nombre de transmissions secondaires N faible car l'algorithme de recherche exhaustive demande un temps d'exécution extrêmement élevé. D'après la Figure 4.5, on remarque que le débit global de notre algorithme GSSA se rapproche étroitement du débit global de la recherche exhaustive, et particulièrement pour des petites valeurs de N (par exemple la différence est moins de 5% pour $N = 5$). On remarque aussi que le taux de perte engendré par l'algorithme GSSA est acceptable en comparaison avec les performances des algorithmes basiques ($\epsilon = 0$) et des algorithmes de sélection complète ($\epsilon = 1$). Notre algorithme GSSA réduit considérablement la complexité de calcul du problème de partage spectral.

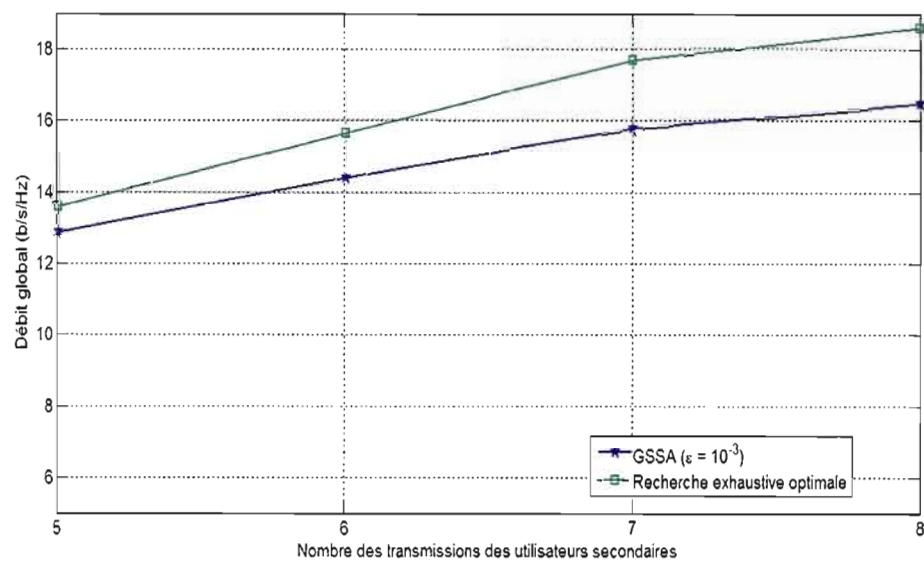


FIGURE 4.5: Comparaison du débit global du système entre une recherche exhaustive optimale et l'algorithme GSSA

CONCLUSION

Dans ce mémoire, nous avons présenté un nouvel algorithme d'allocation des bandes spectrales aux transmissions secondaires dans les réseaux de radios cognitives, en supposant qu'un ensemble de transmissions secondaires coexistent avec un ensemble de transmissions primaires dans la même zone géographique. Dans la première partie de ce document, nous avons présenté une introduction à la radio cognitive afin de montrer les avantages qu'offre cette technologie émergente. Par la suite, nous avons exprimé les motivations pour étudier et implémenter la radio cognitive dans un système de communication sans fil. Nous avons consacré la deuxième partie de ce mémoire au problème de partage spectral dans les réseaux de radios cognitives. Premièrement, nous avons présenté le problème de partage spectral d'une façon générale, et nous avons exposé les différentes techniques de partage spectral utilisées. Deuxièmement, nous avons présenté en détail les principes de la théorie des graphes qui est très utilisée (et qui sera utilisée par nous) pour modéliser le problème de partage spectral dans les RRC. Ensuite, nous avons enchaîné avec les approches d'allocation des BS dans les RRC utilisant la théorie des graphes ainsi que les approches utilisant la théorie des jeux. Dans cette partie, une revue de littérature a été présentée pour mieux comprendre les travaux des chercheurs qui nous ont précédés dans le domaine. Dans la troisième partie, nous avons présenté le modèle du système où des utilisateurs à radio cognitive partagent les bandes spectrales avec les transmissions des utilisateurs primaires. Un serveur spectral est nécessaire pour coordonner l'activation des transmissions secondaires et veiller à ce qu'ils ne génèrent pas d'interférence nuisible aux transmissions primaires. Dans notre approche, le serveur spectral est responsable de la protection des transmissions primaires contre l'interférence causée par les transmissions secondaires. Pour réussir dans cette tâche, nous avons adopté un modèle d'allocation de puissance simple, efficace et équitable pour les transmissions secondaires actives. Ensuite, nous avons modélisé notre réseau en tant qu'un graphe colorié non orienté et dont les sommets correspondants aux liens secondaires à activer, possèdent des listes de poids correspondants au débit secondaire s'il est activé de chaque lien secondaire sur une des

bandes spectrales disponibles. Par analogie, résoudre le problème de sélection des liens secondaires à activer se ramène à résoudre le problème de coloration des sommets. Nous avons aussi mentionné que le problème de coloriage est bien connu dans la littérature pour être NP-Difficile. Finalement, la dernière partie de ce mémoire décrit les paramètres ainsi que les résultats obtenus de nos simulations en appliquant notre algorithme ainsi que deux autres algorithmes de référence. Dans les travaux utilisant la théorie des graphes comme outil pour modéliser le problème de partage spectral, nous pouvons affirmer que notre solution se distingue par son originalité et ses hautes performances en terme de débit global des transmissions secondaires, car l'étude de plusieurs transmissions secondaires qui partagent simultanément la même bande spectrale avec une transmission primaire n'a pas été faite auparavant. L'évaluation des performances de notre algorithme a été faite par simulation et une comparaison avec d'autres algorithmes et avec l'algorithme optimal (la recherche exhaustive) ont été présentés. Nous avons montré que les performances de l'algorithme que nous proposons approchent celles de la recherche exhaustive. Nous avons prouvé aussi que notre algorithme atteint des gains élevés en terme de diversité de sélection lors de l'utilisation d'un seuil d'interférence quasi optimal. Nous notons aussi que notre algorithme se distingue par une faible complexité temporelle en comparaison avec la recherche exhaustive.

Travaux futurs

Nous présentons ici quelques propositions pour des travaux et des améliorations futurs en relation avec notre travail.

- Étudier l'impact d'une estimation erronée du canal sur les performances de notre algorithme et développer des améliorations pour contrer cet impact.
- Améliorer l'algorithme proposé en introduisant de nouvelles contraintes plus pratiques telles que l'équité entre les usagers et la garantie de la qualité de service.
- Implémenter des modèles d'allocation de puissance plus sophistiqués.

BIBLIOGRAPHIE

- AKYILDIZ, I., LEE, W.-Y., VURAN, M. et MOHANTY, S. (2008). A survey on spectrum management in cognitive radio networks. *Communications Magazine, IEEE*, 46(4):40–48.
- AKYILDIZ, I. F., LEE, W.-Y., VURAN, M. C. et MOHANTY, S. (2006). Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks : a survey. *Comput. Netw.*, 50(13):2127–2159.
- BANERJEE, T., GHOSH, C. et AGRAWAL, D. P. (2006). Wireless sensor based dynamic channel selection in cellular communication by cognitive radio approach. *Dans Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2006. 1st International Conference on*, pages 1–5.
- BRIK, V., ROZNER, E., BANERJEE, S. et BAHL, P. (2005). Dsap : a protocol for coordinated spectrum access. *Dans New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, pages 611–614.
- CAO, L. et ZHENG, H. (2005). Distributed spectrum allocation via local bargaining. *Dans Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2005. IEEE SECON 2005. 2005 Second Annual IEEE Communications Society Conference on*, pages 475–486.
- CHEN, G., YU, X.-H. et WANG, J. (2001). Adaptive channel estimation and dedicated pilot power adjustment based on the fading-rate measurement for a pilot-aided cdma system. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 19(1):132–140.
- CHEN, L., IELLAMO, S., COUPECHOUX, M. et GODLEWSKI, P. (2010). An auction framework for spectrum allocation with interference constraint in cognitive radio networks. pages 1–9.
- DIESTEL, R. (2005). *Graph Theory (Graduate Texts in Mathematics)*. Springer.
- ETKIN, R., PAREKH, A. et TSE, D. (2007). Spectrum sharing for unlicensed bands. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 25(3):517–528.

- FOSCHINI, G. et MILJANIC, Z. (1993). A simple distributed autonomous power control algorithm and its convergence. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 42(4): 641–646.
- GAREY, M. R., JOHNSON, D. S. et STOCKMEYER, L. (1974). Some simplified np-complete problems. *Dans STOC '74 : Proceedings of the sixth annual ACM symposium on Theory of computing*, pages 47–63, New York, NY, USA. ACM.
- GOLDSMITH, A. (2005). *Wireless Communications*. Cambridge University Press.
- GOLDSMITH, A., JAFAR, S., MARIC, I. et SRINIVASA, S. (2009). Breaking spectrum gridlock with cognitive radios : An information theoretic perspective. *Proceedings of the IEEE*, 97(5):894 –914.
- HAYKIN, S. (2005). Cognitive radio : brain-empowered wireless communications. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 23(2):201–220.
- HAYKIN, S., THOMSON, D. et REED, J. (2009). Spectrum sensing for cognitive radio. *Proceedings of the IEEE*, 97(5):849 –877.
- HU, W., GERLA, M., VLANTIS, G. et POTTIE, G. (2008). Efficient, flexible, and scalable inter-network spectrum sharing and communications in cognitive ieee 802.22 networks. *Dans Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management, 2008. CogART 2008. First International Workshop on*, pages 1 –5.
- HUANG, J., BERRY, R. et HONIG, M. (2005). Spectrum sharing with distributed interference compensation. *Dans New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, pages 88 –93.
- IC (2001). Attribution des fréquences radioélectriques au canada. *Dans* <http://www.ic.gc.ca/eic/site/ic1.nsf/fra/03784>, dernière consultation le 02 May 2011.
- ILERI, O., SAMARDZIJA, D. et MANDAYAM, N. (2005). Demand responsive pricing and competitive spectrum allocation via a spectrum server. *Dans New Frontiers in Dyna-*

- mic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, pages 194 –202.
- JI, Z. et LIU, K. (2007). Cognitive radios for dynamic spectrum access - dynamic spectrum sharing : A game theoretical overview. *Communications Magazine, IEEE*, 45(5):88 –94.
- JING, X. et RAYCHAUDHURI, D. (2005). Spectrum co-existence of iee 802.11b and 802.16a networks using the csc etiquette protocol. *Dans New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, pages 243 –250.
- KHOZEIMEH, F. et HAYKIN, S. (2009). Dynamic spectrum management for cognitive radio : an overview. *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, 9(11):1447–1459.
- LAWTON, G. (2010). Cognitive radio adds intelligence to wireless technology. *Dans <http://www.computer.org/portal/web/computingnow/archive/news059>, dernière consultation le 02 May 2011.*
- LE, L. B. et HOSSAIN, E. (2008). Resource allocation for spectrum underlay in cognitive radio networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 7(12):5306–5315.
- MARIAS, G. (2005). Spectrum scheduling and brokering based on qos demands of competing wisps. *Dans New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, pages 684 –687.
- MITOLA, J., I. et MAGUIRE, G.Q., J. (1999). Cognitive radio : making software radios more personal. *Personal Communications, IEEE*, 6(4):13 –18.
- NEEL, J., REED, J. et GILLES, R. (2004). Convergence of cognitive radio networks. *Dans Wireless Communications and Networking Conference, 2004. WCNC. 2004 IEEE*, volume 4, pages 2250 – 2255 Vol.4.
- NIYATO, D. et HOSSAIN, E. (2008). Competitive spectrum sharing in cognitive radio networks : a dynamic game approach. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 7(7):2651 –2660.

- RASMUSEN, E. (2006). *Games and Information : An Introduction to Game Theory*. Blackwell Publishing Limited.
- RICHARD ENGELMAN, Kwaku Abrokwah, . A. (2002). Report of the spectrum efficiency working group. <http://www.fcc.gov/sptf/>.
- SHANNON, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27:379–423, 623–656.
- SWAMI, S., GHOSH, C., DHEKNE, R., AGRAWAL, D. et BERMAN, K. (1999). *Cognitive radio : an integrated agent architecture for software defined radio, Ph.D Thesis*. Thèse de doctorat, KTH Royal Institute of Technology.
- SWAMI, S., GHOSH, C., DHEKNE, R., AGRAWAL, D. et BERMAN, K. (2008). Graph theoretic approach to qos-guaranteed spectrum allocation in cognitive radio networks. *Dans Performance, Computing and Communications Conference, 2008. IPCCC 2008. IEEE International*, pages 354 –359.
- THILAKAWARDANA, D. et MOESSNER, K. (2007). A genetic approach to cell-by-cell dynamic spectrum allocation for optimising spectral efficiency in wireless mobile systems. pages 367 –372.
- WANG, J., HUANG, Y. et JIANG, H. (2009). Improved algorithm of spectrum allocation based on graph coloring model in cognitive radio. *Dans Communications and Mobile Computing, 2009. CMC '09. WRI International Conference on*, volume 3, pages 353 –357.
- WANG, X., LI, Z., XU, P., XU, Y., GAO, X. et CHEN, H.-H. (2010). Spectrum sharing in cognitive radio networks : An auction-based approach. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B : Cybernetics, IEEE Transactions on*, 40(3):587 –596.
- WEISS, A. et FRIEDLANDER, B. (1999). Channel estimation for ds-cdma downlink with aperiodic spreading codes. *Communications, IEEE Transactions on*, 47(10):1561 –1569.

- ZHAO, J., ZHENG, H. et YANG, G.-H. (2005a). Distributed coordination in dynamic spectrum allocation networks. *Dans New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, pages 259 –268.
- ZHAO, Q., TONG, L. et SWAMI, A. (2005b). Decentralized cognitive mac for dynamic spectrum access. *Dans New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, pages 224 –232.
- ZHENG, H. et CAO, L. (2005). Device-centric spectrum management. pages 56 –65.
- ZHENG, H. et PENG, C. (2005). Collaboration and fairness in opportunistic spectrum access. *ICC 2005*, 5:3132 – 3136 Vol. 5.