

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ALGORITHMES DE ROUTAGE DANS LES RÉSEAUX SANS-FIL DE RADIOS
COGNITIVES À MULTI-SAUTS

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INFORMATIQUE

PAR
AHMED CHEHATA

AVRIL 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

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

Je tiens à remercier tout d'abord mon professeur et directeur de recherche, Professeur Wessam Ajib, qui n'a ménagé aucun effort pour la réalisation effective de ce projet. Je le remercie pour sa disponibilité, ses conseils et son appui tout au long de ce projet.

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

Je tiens aussi à remercier mes amis du laboratoire pour leurs conseils et appuis tout au long de ma formation.

Je ne saurais terminer sans remercier les professeurs et personnel de l'UQAM qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES ABRÉVIATIONS	ix
RÉSUMÉ	xi
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I	
GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX DE RADIOS COGNITIVES	7
1.1 Les capacités de la radio cognitive	7
1.1.1 La capacité cognitive	8
1.1.2 La capacité d'auto-configuration	10
1.1.3 La capacité d'auto-organisation	13
1.2 L'architecture des réseaux de radios cognitives	13
1.2.1 Le réseau primaire	14
1.2.2 Le réseau secondaire	14
1.2.3 Les types d'accès	15
1.3 La gestion spectrale	16
1.3.1 L'analyse spectrale	17
1.3.2 La décision spectrale	17
1.3.3 La mobilité spectrale	17
1.4 Les RRC opérant sur bandes spectrales licenciées et non-licenciés	18
CHAPITRE II	
LE ROUTAGE DANS LES RÉSEAUX DE RADIOS COGNITIVES	22
2.1 Introduction	22
2.2 Les défis de routage dans les réseaux de radios cognitives	24
2.2.1 La collecte de l'information spectrale	25

2.2.2	La qualité des liens	25
2.2.3	La maintenance et la récupération des liens	26
2.3	Les environnements cognitifs dans les RRC	27
2.3.1	L'environnement statique	27
2.3.2	L'environnement dynamique	28
2.3.3	L'environnement opportuniste	28
2.4	Étude des travaux proposés	30
2.4.1	Méthodes au fonctionnement découplé	30
2.4.2	Méthodes au fonctionnement couplé	32
2.5	Conclusion	35
CHAPITRE III		
CONTRIBUTION		37
3.1	La métrique du routage	37
3.1.1	ETX	38
3.1.2	ETT	39
3.1.3	WCETT	40
3.2	Le protocole de routage	43
3.2.1	Gestion de l'interface fixe	43
3.2.2	Gestion de l'interface commutable	46
3.2.3	La découverte des routes	48
3.3	Récupération et maintenance des routes	49
CHAPITRE IV		
PARAMÈTRES ET RÉSULTATS DE SIMULATION		51
4.1	Outil et paramètres de simulation	51
4.1.1	Outil de simulation	51
4.1.2	Les paramètres de simulation	52
4.2	Résultats et discussions	53
CONCLUSION		60

Bibliographie 64

LISTE DES FIGURES

1.1	Exemple de trous spectraux extrait de l'article (Akyildiz <i>et al.</i> , 2006) . . .	9
1.2	Le cycle cognitif	10
1.3	Fonctionnalités de communication des réseaux de radios cognitives	12
1.4	Coexistence entre deux types de réseau : Réseau primaire & Réseau Se- condaire	16
1.5	L'utilisation spectrale	19
1.6	Réseau à radio cognitive opérant sur les bandes spectrales licenciées. (Akyil- diz <i>et al.</i> , 2006)	20
1.7	Réseau à radio cognitive opérant sur les bandes spectrales non-licenciées. (Akyil- diz <i>et al.</i> , 2006)	21
2.1	Exemple de routage dans un RRC	24
2.2	Routage dans un système hétérogène. L'arrivée des utilisateurs primaires entraîne la création de trois régions qui contiennent différentes bandes spectrales. Les nœuds en dehors de ces régions ont tous les canaux à leur disponibilité	26
2.3	Relai sur deux canaux différents dans une RRC	29
2.4	Création d'un graphe en couches	31
2.5	Création d'un graphe de couleurs	32
2.6	Un exemple de deux arbres de spectre	34
3.1	Un exemple de calcul de WCETT	42
3.2	Chaque nœud diffuse périodiquement sur tous les canaux le paquet Hello indiquant le canal fixe qu'il utilise	44
3.3	Après la réception d'un paquet Hello, le nœud met à jour ses deux tables	45
3.4	Chaque nœud consulte périodiquement sa TableCanauxUtilisés	46

3.5	Files d'attente maintenues par chaque nœud pour chaque canal	47
3.6	Gestion des interfaces commutables pour un réseau de 3 nœuds et 3 canaux	48
4.1	Le débit moyen de bout en bout en fonction du nombre de flux dans le réseau	55
4.2	L'impact d'un UP sur une transmission. Le débit chute puis remonte mais n'atteint pas la valeur initiale après récupération	56
4.3	L'impact d'un UP sur une transmission. Le débit chute puis revient à la valeur initiale après récupération	57
4.4	Le Débit moyen de bout en bout moyen lorsque le nombre des UP augmente	58
4.5	Pourcentage de coupure des routes par rapport au nombre des UP	59

LISTE DES TABLEAUX

4.1 Les paramètres de simulation	53
--	----

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AODV	<i>Ad hoc On-demand distance vector.</i>
BS	Bande spectrale.
BSL	Bande spectrale licenciée.
BSNL	Bande spectrale non licenciée.
CBR	<i>Constant bit rate.</i>
DSDV	<i>Destination-sequenced distance-vector.</i>
DSR	<i>Dynamic source routing.</i>
ETT	<i>Expected transmission time.</i>
ETX	<i>Expected transmission count.</i>
FCC	Commission fédérale des communications (<i>Federal communications commission</i>).
FNR	Farthest-neighbor routing.
GSM	<i>Global system for mobile communications.</i>
MAC	Couche de Contrôle d'accès au support (<i>Media access control</i>).
MM-AODV	<i>Multi-radio Multi-channel AODV.</i>
NMT	<i>Nordic Mobile Telephone System.</i>
NNR	Nearest-neighbor routing.
NS-2	<i>Network simulator 2.</i>
PSA	<i>Path spectrum availability.</i>
QoS	<i>Qualité de service.</i>
RC	Radio cognitive.
RERR	<i>Route error.</i>
RL	Radio logicielle.
RRC	Réseau de radios cognitives.
RREP	<i>Route reply.</i>

RREQ	<i>Route request.</i>
SAMER	<i>Spectrum aware mesh routing.</i>
SPTF	<i>Spectrum Policy Task Force.</i>
STOD-RA	<i>Spectrum-tree based on-demand routing protocol.</i>
TBR	<i>Tree-based routing.</i>
TCP	<i>Transport control protocol.</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol.</i>
UP	Utilisateur primaire.
URC	Utilisateur à radio cognitive.
VINT	<i>Virtual InterNetwork Testbed.</i>
WCETT	<i>Weighted cumulative expected transmission time.</i>

RÉSUMÉ

Les réseaux de radios cognitives sont composés d'appareils cognitifs et agiles capables de changer leurs configurations à la volée en se basant sur l'environnement spectral. Cette capacité offre la possibilité de concevoir des stratégies d'accès au spectre dynamiques et flexibles dans le but d'utiliser d'une manière opportuniste une portion du spectre disponible. Toutefois, la flexibilité dans l'accès au spectre engendre une complexité accrue dans la conception des protocoles de communication. Notre travail s'intéresse au problème de routage dans les réseaux de radios cognitives à multi-sauts. Dans ce document, nous proposons un protocole de routage réactif qui permet la coexistence entre les utilisateurs premiers et secondaires, la diminution des interférences et l'augmentation du débit de transmission de bout en bout. Les simulations présentées démontrent l'efficacité de l'algorithme proposé en terme du débit moyen de bout en bout et de la gestion des chemins interrompus par l'arrivée d'un utilisateur premier.

Mots clés : réseaux de radios cognitives, radio cognitive, routage réactif, multi-sauts, utilisateur premier, utilisateur secondaire.

INTRODUCTION

La technologie sans fil est devenu un élément clé dans notre société moderne. Dans notre vie courante, des appareils comme les commandes pour ouvre-porte de garage, les télécommandes, les téléphones cellulaires, les récepteurs satellites sont basés sur les communications sans fil. Aujourd'hui, le nombre total des usagers abonnés aux services cellulaires sans fil a dépassé le nombre des usagers abonnés aux services de téléphonie fixe. Par ailleurs les services cellulaires sans fil, les téléphones sans fils, les réseaux sans fil et les satellites sont largement utilisés pour une variété d'applications de communications et de services de divertissement.

En 1885, Guglielmo Marconi a démontré la faisabilité des communications sans fil en utilisant des ondes électromagnétiques. En 1906, la première diffusion radio a été réalisée par Reginald Fessenden pour transmettre des pistes audio et musicales. En 1907, la transmission commerciale transatlantique a été lancée. En 1946, le premier système public de téléphones mobiles a été introduit dans plusieurs villes américaines. Le premier système cellulaire analogique, le Nordic Mobile Telephone System (NMT), a été introduit en 1981. En 1983, la première technologie cellulaire sans fil, l'Advanced Mobile Phone System (AMPS), a été déployée pour l'emploi commercial. Au cours des deux dernières décennies, il y a eu plusieurs recherches et avancées importantes dans le domaine des communications sans fil. En fait, ce domaine est aujourd'hui la branche la plus florissante de développement dans le domaine des télécommunications.

La croissance fulgurante de l'utilisation des systèmes de communication sans fil et la forte expansion des services mobiles et satellites dans le monde entier a poussé les chercheurs à améliorer les performances de ces réseaux. Dotés d'un ensemble d'appareils et de services, ces systèmes évoluent vers une ère fondamentalement perturbée. Cette perturbation est causée par la venue de nouveaux appareils intelligents capable de prendre conscience de leur environnement. Ces appareils ont la faculté de communiquer à la volée grâce à un usage dynamique des bandes spectrales (BS) pour améliorer leur connectivité

et leur capacité.

Une radio consciente de l'environnement électromagnétique a été proposée pour la première fois par Joseph Mitola III à l'institut royale de technologie KTH en 1998. L'idée de Mitola consistait à développer une radio capable d'altérer indépendamment le comportement de sa couche physique et qui peut adopter des stratégies complexes (Mitola et Maguire, 1999). La radio cognitive (RC) était le nom de cette nouvelle approche de communication dans les réseaux sans fil. La radio cognitive a reçu un intérêt particulier comme étant une technologie qui peut améliorer les performances des réseaux sans fil et l'efficacité de l'usage des BS.

La radio cognitive est un nouveau paradigme, conçue pour les réseaux de communications sans fil, qui vise à améliorer l'utilisation des bandes spectrales. La motivation principale derrière la RC est le manque des BS disponibles dû à la croissance effrénée des applications sans fil. La majorité des BS disponibles ont déjà été allouées aux systèmes sans fil existants. Néanmoins, une étude faite par la Spectrum Policy Task Force (SPTF) de la Federal Communication Commission (FCC) des Etats-Unis en 2003 a constaté pour sa part que bon nombre des spectres déjà alloués ne sont pas utilisés à leur potentiel (Richard Engelman, 2002). L'étude a montré que certaines BS sont fortement utilisées par les systèmes titulaires d'une licence pendant des durées et emplacements particuliers. Par exemple, les bandes spectrales allouées aux réseaux cellulaires aux Etats-Unis sont largement utilisées durant la journée mais restent inoccupées après minuit. Cette découverte a motivé les ingénieurs de la FCC à 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.

Le facteur majeur qui mène à une utilisation inefficace du spectre est le schéma d'allocation de spectres en lui-même. Dans un schéma d'allocation traditionnelle, le spectre ne peut pas être utilisé par les utilisateurs et les applications sans licence même si celui-ci n'est pas utilisé par les utilisateurs titulaires d'une licence. À cause de cette statique et rigide allocation, les systèmes sans fil doivent opérer uniquement sur des bandes spectrales dédiées, et ne peuvent pas adapter les bandes de transmission conformément au

changement de l'environnement. Par exemple, si une BS est fortement utilisée, le système ne peut pas changer et opérer sur une autre BS moins chargée. D'un autre côté, le droit d'accès au spectre est généralement défini par la fréquence, l'espace, le licencié et la durée d'accès. Normalement, une licence est assignée à un licencié, et l'utilisation du spectre par ce licencié doit être conforme aux spécifications de la licence. Dans le schéma actuel d'octroi de licences, la licence ne peut pas changer de type ni transférer le droit à un autre utilisateur. Ceci limite l'usage des BS et aboutit à une faible utilisation des bandes spectrales.

Pour remédier à ce problème, l'accès au spectre doit être plus flexible en permettant les utilisateurs à radio cognitive (URC) d'utiliser le spectre sous certaines restrictions. La radio cognitive fournit aux transmissions sans fil une adaptabilité à travers un accès dynamique au spectre de sorte à optimiser les performances du système et à améliorer l'utilisation des bandes spectrales. En d'autres termes, la RC va garantir une bande passante plus large pour les URC, au travers les différentes architectures hétérogènes sans fil, en partageant d'une manière opportuniste les BS avec les utilisateurs primaires (UP) (utilisateurs détenteurs de licence). Les fonctionnalités majeures d'un système de radios cognitives comprennent le sondage spectral, la gestion spectrale et la mobilité spectrale. À travers le sondage spectral, l'information sur le spectre doit être obtenue pour qu'il soit utilisable par les URC. Cette information est exploitée par la fonction de gestion spectrale pour analyser les opportunités d'accès au spectre et prendre les bonnes décisions. Si le statut du spectre change, la fonction de mobilité spectrale va contrôler le changement vers des BS opérationnelles pour les utilisateurs à radio cognitive.

Pour réaliser ses fonctionnalités et fournir une gestion dynamique du spectre, la RC 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 système matériel d'exécuter plusieurs fonctions radios différentes. L'analogie la plus directe est celle qui peut être faite avec le monde de l'informatique. Pour y arriver, l'un des fondements de la RL est de positionner la conversion entre les mondes analogiques et numériques aussi proche 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 les besoins en flexibilité des équipements. La reconfiguration n'est plus ici une option ou une fonction évoluée, mais un élément intrinsèque.

Motivation

La conception des algorithmes et protocoles pour les réseaux de radios cognitives (RRC) est une tâche complexe. En effet et contrairement aux réseaux sans fil traditionnels, les RRC ne sont pas conçus pour fonctionner avec une seule et fixe bande de spectre. Leur but est d'exploiter les bandes passantes résiduelles sur les fréquences sous utilisées du spectre. Par contre et comme dans les protocoles de communication conventionnels, les protocoles des réseaux de radios cognitives doivent garantir une variété d'applications de couches supérieures telles que la voix, la vidéo et les services mobiles en temps réel. En d'autres termes, les protocoles des RRC doivent assurer les fonctionnalités qu'on trouve dans les réseaux sans fil classiques mais en gérant des nouvelles difficultés telle que le changement aléatoire de l'environnement radio dépendant de l'activité des utilisateurs primaires.

L'introduction du principe de la radio cognitive dans le monde de réseau sans fil exige l'extension du concept cognitif par des règles d'opération qui prennent en considération la présence de plusieurs nœuds dans le réseau ainsi que leurs configurations instantanées. Dans cette perspective, l'objectif de conception ne vise plus à définir un seul dispositif intelligent mais à définir un réseau composé de plusieurs appareils intelligents capables de coexister d'une manière efficace dans une zone géographique. Cet objectif requiert l'intégration des fonctionnalités cognitives dans les règles et les protocoles d'interaction entre les nœuds dans le réseau. En d'autres termes, l'ensemble des nœuds doit former un réseau qui doit être modelé et analysé comme étant une seule entité afin d'optimiser les fonctionnalités du réseau comme la gestion des ressource et le routage.

En fait, en interconnectant la radio cognitive avec des nœuds dans des systèmes co-existants, les fonctions de la couche réseau émergent comme des problèmes ouverts à

cause de la nature hétérogène des réseaux sans fil. Une des caractéristiques fondamentales de la couche réseau est le routage. Le routage dans un réseau de radios cognitives est indissociable du choix des bandes de transmissions. En effet, un nœud voisin peut être accessible sur un ensemble de fréquences et ne pas l'être sur un autre. Le choix du prochain saut va alors se baser sur les bandes disponibles et la capacité que chacune peut offrir. Par conséquent, le routage dans les RRC fait appel aux techniques de conception inter-couches (*cross-layer*) à trois niveaux : physique, MAC (couche de contrôle d'accès au support (*Media access control*)) et réseau. Par ailleurs, le routage doit être capable d'exploiter la transmission sur chacune des bandes de spectre disponibles. Ces arguments rendent les propositions de routage existantes dans les réseaux radios ad-hoc et maillés inadaptées aux environnements radios cognitifs et motivent la nécessité de concevoir de nouvelles approches.

Plusieurs chercheurs se sont penchés sur les mécanismes des couches physiques et MAC nécessaires pour assurer la cohabitation entre les réseaux cognitifs et les réseaux déjà existants ; les réseaux primaires. Deux contraintes principales sont à respecter par les nœuds cognitifs. primièrement, la transmission des nœuds cognitifs ne doit pas perturber la transmission des nœuds primaires s'effectuant sur le même canal, ce qui nécessite un contrôle strict de la puissance de transmission des nœuds cognitifs. Deuxièmement, la transmission d'un nœud cognitif doit être immédiatement interrompue lorsqu'un nœud primaire commence une transmission concurrente. Cette contrainte nécessite une forte coordination entre les deux réseaux. Les études ont conduit à plusieurs propositions au niveau des couches physiques et MAC pour la détection des canaux disponibles et l'estimation de l'interférence et de la puissance de transmission d'un nœud cognitif. D'autres études se sont focalisées sur des mécanismes qui permettent d'exploiter les bandes passantes résiduelles sur plusieurs fréquences. Ces mécanismes effectuent des transmissions en parallèles sur plusieurs canaux en profitant ainsi de l'une des caractéristiques les plus intéressantes des RRC. Les efforts précédents étant tous concentrés sur le contrôle d'accès dans une configuration à une seule cellule, il est clair que les réseaux de radios cognitives à multi-sauts s'étalant sur plusieurs réseaux primaires constituent une évolution

logique de cette technologie. Dans ce mémoire, nous traitons le problème de routage dans les réseaux sans fil de radios cognitives à multi-sauts. Nous proposons une approche de routage réactif (on-demand) à multi-interfaces et multi-canaux capable de gérer les transmissions des URC et UP. En effet lorsqu'un URC utilise un canal particulier, il se peut que ce canal soit partagé par d'autres URC. Dans ce cas, la contention et l'interférence sur le canal deviennent importantes. Ceci nous a motivé à employer plusieurs interfaces par nœud pour minimiser les interférences et la charge sur les canaux. De plus, nous utilisons une métrique qui prend en considération les besoins en qualité de services pour les utilisateurs. Notre travail fournit un mécanisme efficace et simple de récupération des routes pour la reprise des communications dans les RRC à multi-sauts.

La suite de ce document est organisée comme suit. Le premier chapitre donne une introduction au principe de la radio cognitive. Nous présentons dans celle-ci les principales qualités et caractéristiques de cette nouvelle technologie et les avantages liés à son adoption. Dans le deuxième chapitre, nous présentons en détail le problème de routage dans les réseaux de radios cognitives à multi-sauts. Ce chapitre est composé de quatre parties. Dans la première partie, nous introduisons quelques termes de base pour bien comprendre le problème. Dans la deuxième partie, nous présentons les nouveaux défis de routage qu'on trouve dans les RRC. Ensuite, nous présentons les trois types d'environnement qu'on peut trouver dans un système à radios cognitives. Enfin, nous présentons quelques approches proposées dans la littérature pour résoudre le problème de routage. Par la suite, nous présentons dans le troisième chapitre une approche pour résoudre ce problème. Nous commençons par présenter la métrique utilisée en donnant ses caractéristiques et ses atouts puis nous en détaillons la manière de calcul. Nous formulons ensuite un protocole qui permet de gérer les interfaces et les canaux disponibles dans le réseau pour pouvoir sélectionner par la suite la meilleure route. Puis, nous présentons un mécanisme de récupération de routes lors d'une coupure d'un lien par un utilisateur primaire. Enfin dans le dernier chapitre, nous montrons l'efficacité de notre algorithme au moyen des simulations réalisées en utilisant l'environnement de simulation NS-2.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX DE RADIOS COGNITIVES

La technologie sans-fil ne cesse d'évoluer et la vision d'un système de communication omniprésent promet de nombreux avantages aux entreprises et aux individus. Alors que des appareils comme les cellulaires et les ordinateurs portables reçoivent beaucoup d'attention, l'impact de la technologie sans-fil reste plus large, comme par exemple les réseaux de capteurs pour des applications de sécurité ou les tours de contrôle. Cette importante prolifération des télécommunications sans-fil a créé un besoin en croissance de spectres radios. Selon plusieurs études la majorité des bandes de spectre ont été allouées mais sont peu utilisées. Ces considérations ont motivé la communauté à développer une nouvelle technologie radio qui permet de répondre aux besoins en termes de fiabilité et qualité de services. L'idée d'une radio cognitive pour les systèmes sans-fil est 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) puis dans l'article (Mitola et Maguire, 1999). 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 radios 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, tels que la fréquence, la puissance de transmission, la modulation et les protocoles, si c'est nécessaire pour réussir la communication. Dans ce chapitre, nous allons présenter les caractéristiques et le fonctionnement de la radio cognitive ainsi que l'architecture des réseaux de radios cognitives.

1.1 Les capacités de la radio cognitive

La radio cognitive est un paradigme de communication émergent qui s'adresse au problème de l'insuffisance spectrale. Le spectre est une ressource rare et précieuse dans

les systèmes et réseaux de communications sans-fil. La radio cognitive interagit en tout temps avec son environnement pour permettre aux systèmes de détecter les changements que subit celui-ci et de se reconfigurer pour respecter les propriétés du système telle que la charge du trafic. Cette capacité permettra de résoudre les problèmes hétérogénéité et les difficultés reliées à la disponibilité des bandes de spectre qu'on trouve dans les nouveaux systèmes de communications sans-fil. Haykin (Haykin, 2005) définit la radio cognitive comme ainsi :

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.

Une radio cognitive doit être capable de réaliser trois tâches essentielles. Elle doit surveiller l'environnement (capacité cognitive), analyser les informations collectées (capacité d'auto-organisation) et s'adapter à l'environnement (capacité d'auto-configuration).

1.1.1 La capacité cognitive

La primaire et importante étape de la capacité cognitive est le sondage spectral. La RC surveille les bandes spectrales qui sont à sa portée pour détecter les trous spectraux, qui sont des bandes de fréquences non utilisées par les utilisateurs licenciés. Pour s'y faire, la radio cognitive devrait incorporer un mécanisme pour gérer la communication et le partage du spectre entre les utilisateurs licenciés et les utilisateurs sans licences. Dans la Figure 1.1, nous montrons un exemple de trous spectraux dans un environnement arbitraire.

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

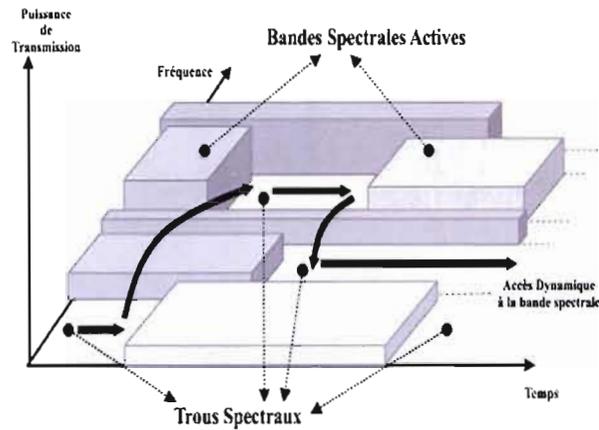


FIGURE 1.1: Exemple de trous spectraux extrait de l'article (Akyildiz *et al.*, 2006)

Deuxièmement, la RC doit analyser la bande spectrale. Dans cette phase, les trous spectraux sont analysés pour déterminer ceux qui offrent le meilleur service. De plus, la radio cognitive doit identifier l'emplacement des différents émetteurs puis sélectionner les paramètres d'opération appropriés telles que la fréquence et la puissance permise à cette position. Troisièmement la décision spectrale doit être faite. À cette étape et après que l'analyse des différents trous spectraux détectés ait été réalisée, la RC commence par déterminer le débit nécessaire pour le transfert des données, le mode de transmission adéquat et la bande passante de transmission. Ensuite, la bande de spectre appropriée est choisie à partir des caractéristiques du spectre et des besoins de l'utilisateur. Ces différentes étapes, connues sous le nom de Cycle cognitif dans la littérature, sont représentées dans la Figure 1.2.

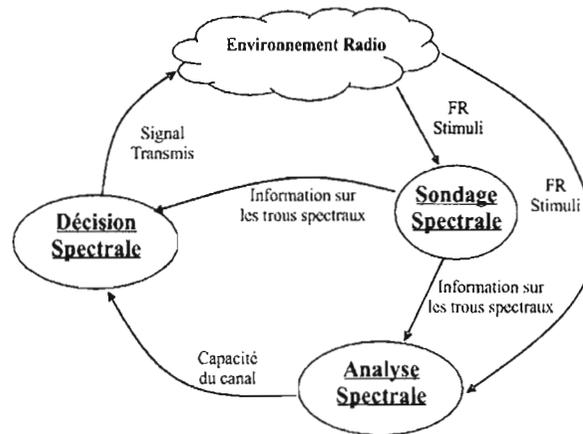


FIGURE 1.2: Le cycle cognitif

Puisque la nature de l'environnement radio est dynamique, une phase d'apprentissage, qui dépend des observations et des décisions doit être considérée. En effet, l'apprentissage initial est réalisé à travers l'étape d'observation (le sondage spectral) dans laquelle toutes les perceptions sont continuellement comparées à l'ensemble de l'expérience antérieure. Ensuite, l'apprentissage évolue en fonction des décisions et des actions prises au fil du temps. Ainsi, la RC peut gérer l'altération d'une bande spectrale choisie suite à l'apparition d'un utilisateur primaire ou bien suite à la mobilité de l'utilisateur ou encore à la variation du trafic.

1.1.2 La capacité d'auto-configuration

La capacité cognitive fournit une sensibilisation aux spectres alors que la capacité d'auto-configuration permet aux ondes radios d'être dynamiquement programmées selon leur environnement. Plus spécifiquement, la radio cognitive peut être programmée pour transmettre et recevoir sur une variété de fréquences et d'utiliser différentes technologies de transmission supportées par sa conception matérielle. Pour s'ajuster à l'environnement, divers paramètres appartenant à la RC doivent être capables de se reconfigurer, selon le besoin, à n'importe quel moment. Ces paramètres s'accordent avec l'environne-

ment spectral de la RC. Le rapport de FCC propose quelques paramètres à reconfigurer :

Fréquence d'opérabilité : La RC est capable de changer de fréquence d'opérabilité lorsque cette dernière n'est plus disponible. Cette fonctionnalité se combine généralement avec une méthode qui permet de sélectionner d'une manière dynamique la nouvelle bande de fréquence appropriée basée sur les informations collectées de l'environnement radio. La fréquence la plus adéquate est sélectionnée et la communication est réalisée sur cette nouvelle fréquence.

Modulation : La RC reconfigure son procédé de modulation selon les besoins de l'utilisateur et selon les conditions de la bande spectrale. La modification de la modulation permet de changer les caractéristiques de transmission pour fournir des opportunités d'accès et d'utilisation de spectres améliorées. Par exemple, des applications telles que les téléconférences multimédia nécessitent un débit élevé et un faible délai. La RC doit donc dans ce cas sélectionner le modèle de modulation qui garantit la meilleure efficacité spectrale.

Puissance de transmission : Cette fonctionnalité permet à un dispositif de commuter entre plusieurs puissances de transmission durant le processus de transfert des données. En effet, lors du changement d'une BS à une autre, les paramètres de transmission changent entre autre la puissance de transmission. Ainsi, le contrôleur de puissance va élever le niveau de puissance, pour satisfaire les besoins de la transmission, sans dépasser les limites permises. 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 permettre à d'autres usagers d'utiliser les mêmes BS et de diminuer l'interférence causée aux autres transmissions secondaires.

Technologie de communication : Dans une zone composée de plusieurs technologies de communication, la RC peut être utilisée pour fournir une interopérabilité entre les différents systèmes de communication.

Dans la Figure 1.3 extraite de l'article (Akyildiz *et al.*, 2006), les auteurs décrivent un modèle qui illustre l'interaction entre les différentes couches de communication du

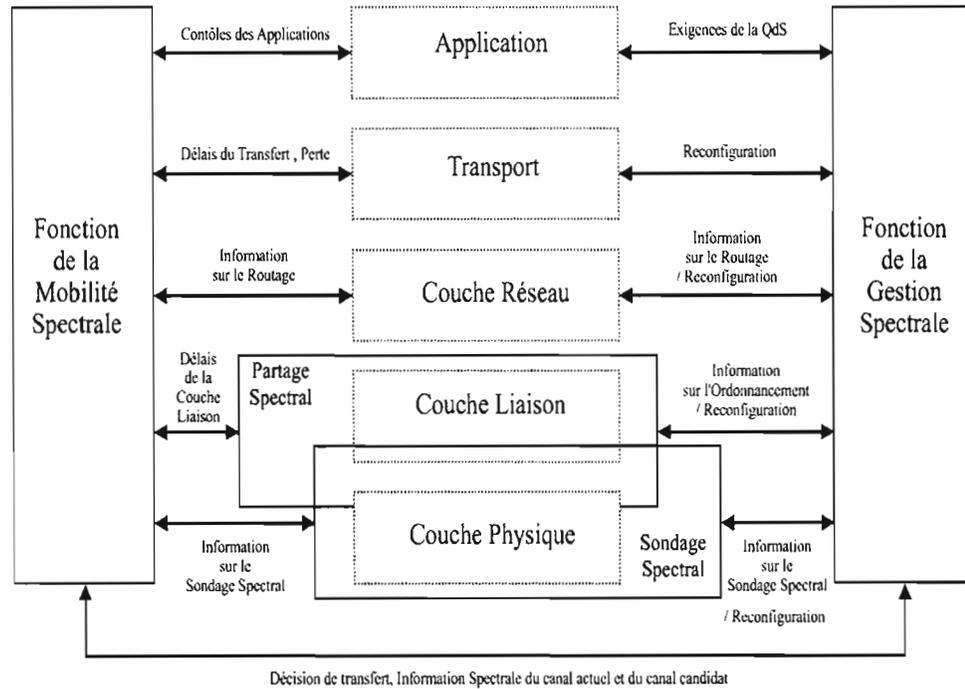


FIGURE 1.3: Fonctionnalités de communication des réseaux de radios cognitives

RRC. L'approche multi-couches est la plus adéquate 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 ensemble pour améliorer l'efficacité spectrale. Cette coopération s'explique par le fait que le partage de spectre dépend énormément 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 de liaison. D'autre part, on remarque aussi que la gestion spectrale et la mobilité spectrale nécessitent toutes les informations de toutes les couches du modèle de communication en raison de la nature dynamique du spectre.

1.1.3 La capacité d'auto-organisation

Nous avons vu que la radio cognitive devrait avoir une capacité de sondage et une capacité d'auto-configuration pour répondre aux exigences de l'environnement dynamique. Toutefois la CR devrait implémenter plusieurs systèmes de gestion pour être capable de s'auto-organiser selon les fonctions de sondage et de reconfiguration :

Gestion des ressources radios : Un système de gestion des ressources radios est nécessaire pour gérer et organiser d'une manière efficace les informations sur les trous spectraux collectés par les différentes RC.

Gestion de la mobilité et la connexion : Dans les réseaux de radios cognitives, les informations sur la topologie et le routage du réseau sont complexes. Un bon mécanisme de gestion de la mobilité et de la connexion faciliterait la tâche des radios cognitives à découvrir les voisins disponibles et à choisir la bonne route à prendre.

Gestion de la sécurité : La nature hétérogène des réseaux de radios cognitives introduit plusieurs problèmes de sécurité. Un système de confiance appliqué sur les diverses technologies utilisées aiderait les RC à gérer les opérations sur le réseau et ainsi accroître le niveau de sécurité.

1.2 L'architecture des réseaux de radios cognitives

L'architecture est un ensemble complet et cohérent de règles de conception par lesquelles un ensemble de composants spécifiés réalise un ensemble déterminé de fonctions et de services qui évoluent à travers divers points de conception au cours du temps (Mitola, 1995). Dans cette section, nous décrirons l'architecture des RRC qui peut être décomposé en deux groupes : réseau primaire et réseau secondaire.

1.2.1 Le réseau primaire

Le réseau primaire est doté d'une licence pour utiliser certaines bandes spectrales. Cette licence est donnée par des organismes gouvernementaux telle la FCC aux Etats-Unis et le CRTC (Canadian Radio-television and Telecommunications Commission) au Canada. Il est à noter que les règles d'attribution du spectre sont similaires dans les différents pays du monde. Les réseaux cellulaires et les réseaux de diffusion TV sont un bon exemple de réseaux primaires dans lesquels les bandes spectrales sont propriétaires. Le réseau primaire dispose de deux composants :

Utilisateur primaire : L'utilisateur primaire dispose d'une licence qui lui permet d'accéder à certaines bandes spectrales. Cette licence lui offre la possibilité d'opérer à tout moment sur ces BS et de ne pas être dérangé par des utilisateurs étrangers. L'accès est contrôlé uniquement par leurs stations de base et ne doit subir aucune interférence extérieure. Les UP ne doivent subir aucune modification pour permettre la coexistence avec les utilisateurs ou réseaux de radios cognitives ou leurs stations de base.

Station de base des UP : La station de base des UP est une structure fixe du réseau primaire qui possède une licence pour opérer sur la bande spectrale comme par exemple les stations de base des systèmes cellulaires. Ces stations sont conçues de telle sorte à ne pas partager le spectre avec aucune entité extérieure au système, en l'occurrence, les utilisateurs à radio cognitive. Cependant, il peut exister des stations de bases licenciées qui reconnaissent les protocoles des URC.

1.2.2 Le réseau secondaire

Le réseau secondaire, appelé aussi réseau de radios cognitives ou réseau non-licencié, ne possède pas de licence pour opérer sur la bande spectrale. D'où le besoin d'un ensemble de fonctionnalités additionnelles pour pouvoir partager les bandes spectrales licenciées d'une manière opportuniste. Le réseau secondaire dispose de quatre composants :

Utilisateur à radio cognitive : L'utilisateur à radio cognitive URC, appelé aussi 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, ils pourront partager la bande spectrale avec les utilisateurs primaires ou bien profiter de l'absence des utilisateurs primaires pour transmettre.

Station de base des URC : La station de base des URC, appelée aussi station de base non licenciée, est une infrastructure fixe avec des capacités cognitives. L'URC se connecte à la station de base pour accéder à d'autres réseaux ou services.

Serveur spectral : Le serveur spectral est une entité du RRC qui sert à partager les ressources spectrales entre différents URC dans le même réseau. Ce serveur est connecté à chaque réseau secondaire 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 un sondage spectral quasi-optimal.

Courtier spectral : Le courtier spectral 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.

1.2.3 Les types d'accès

Selon l'architecture présentée par les auteurs (Akyildiz *et al.*, 2006), le RRC est un ensemble de plusieurs types de réseaux qui coexistent sur les mêmes bandes spectrales. Les auteurs soulignent qu'à cause de cette hétérogénéité, il existe différents types d'accès à ces réseaux. Les auteurs les nomment comme suit :

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

Accès au réseau ad-hoc à radio cognitive : 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.

Les éléments qui composent les RRC sont représentés dans la Figure 1.4 extraite de l'article (Akyildiz *et al.*, 2006).

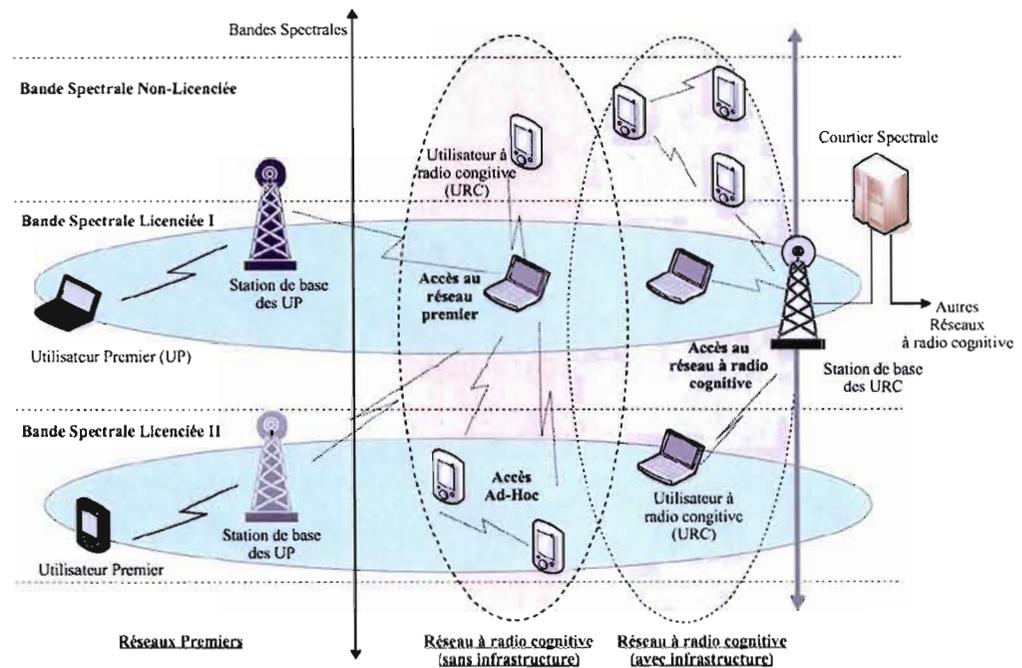


FIGURE 1.4: Coexistence entre deux types de réseau : Réseau primaire & Réseau Secondaire

1.3 La gestion spectrale

Les bandes spectrales inutilisées qui sont détectées par le sondage spectral ont des caractéristiques différentes les unes des autres. Ces caractéristiques sont la fréquence d'opérabilité 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 les auteurs dans (Akyildiz *et al.*, 2006) ont présenté les nouvelles fonctions

requis pour gérer les ressources spectrales dans les RRC. Ces fonctions sont l'analyse spectrale, la décision spectrale et la mobilité spectrale.

1.3.1 L'analyse spectrale

Elle permet de caractériser les différentes bandes spectrales en termes de fréquence d'opérabilité, de débit, de temps et de l'activité de l'utilisateur primaire. Cette caractérisation sert à répondre d'une manière précise aux exigences de l'utilisateur équipé d'une radio cognitive. Des paramètres supplémentaires viennent compléter cette caractérisation à savoir le niveau d'interférence, le taux d'erreur du canal, l'évanouissement, le délai et le temps d'occupation de la bande spectrale par un utilisateur à radio cognitive.

1.3.2 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, tout en prenant compte des exigences de l'utilisateur à radio cognitive. La décision spectrale est composée de deux étapes. primièrement, chaque BS est évaluée en se basant sur les observations faites par les URC et les informations statistiques des réseaux primaires. Ensuite, selon cette évaluation, la bande spectrale la plus appropriée peut être choisie.

1.3.3 La mobilité spectrale

La mobilité spectrale est définie comme étant le processus de changement de fréquence d'opérabilité d'un URC. Ce phénomène est enclenché lors de la détérioration de la bande spectrale ou lors de la détection d'un UP. À ce moment là, les deux URC devront évacuer la BS et trouver une autre BS disponible pour continuer la communication. Dans ce contexte, le changement du canal fréquentiel connu dans la littérature sous le nom de

spectrum handoff doit être redéfini pour mieux s'intégrer aux RRC. Cette mobilité spectrale doit être prise en compte dans l'algorithme de routage. Les protocoles des différentes couches doivent s'adapter aux paramètres de la nouvelle fréquence d'opérabilité à chaque fois qu'un URC change de fréquence. L'objectif de la mobilité spectrale est d'assurer une transition fluide et rapide lors du changement de la fréquence d'opérabilité. Ceci est essentiel pour que les applications des URC subissent le moins de dégradation possible dans leurs performances durant le *spectrum handoff*. Les auteurs dans (Akyildiz *et al.*, 2006) soulignent qu'il est essentiel que la mobilité spectrale ait connaissance de la durée du *spectrum handoff*. Cette information est assurée par les algorithmes de sondage spectral. Dès la disponibilité de cette latence, les algorithmes de la mobilité spectrale s'assurent que la communication en cours subisse le moins de dégradation possible lors du changement de fréquence.

1.4 Les RRC opérant sur bandes spectrales licenciées et non-licenciés

Dans cette partie, nous allons présenter la différence entre un RRC qui opère sur des bandes spectrales licenciées (BSL) et entre un RRC qui opère sur des bandes spectrales non licenciées (BSNL). D'après ce que montre la Figure 1.5, les BSL ne sont pas exploitées continuellement c'est à dire qu'il existe la possibilité d'utiliser ces miettes spectrales pour permettre à d'autres réseaux de transmettre des données.

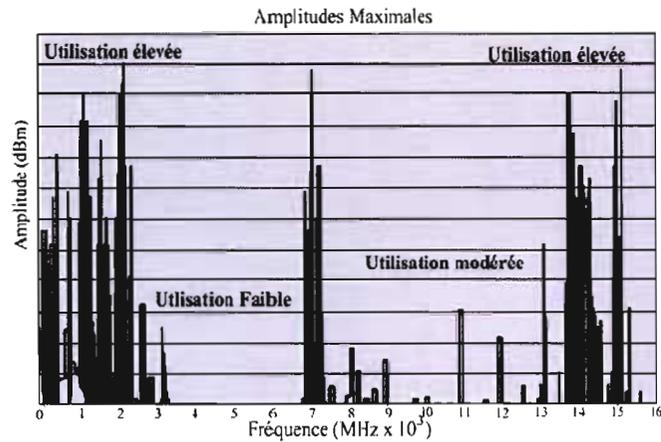


FIGURE 1.5: L'utilisation spectrale

On peut voir dans la Figure 1.5, ces miettes spectrales qui sont connues dans la littérature comme étant les trous spectraux. Grâce à ces trous spectraux, les RC peuvent communiquer d'une manière opportuniste en utilisant les techniques de communication intelligente qu'on a précédemment présentées. Un modèle d'un RRC qui coexiste avec un réseau primaire est modélisé dans la Figure 1.6. Ces RRC partagent avec les réseaux primaires les bandes spectrales tant que celles-ci sont libres. On peut remarquer ici l'importance à bien détecter ces opportunités afin de réaliser leurs transmissions avec succès sans générer de l'interférence aux propriétaires 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, lors de l'apparition des UP, 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 1.6.

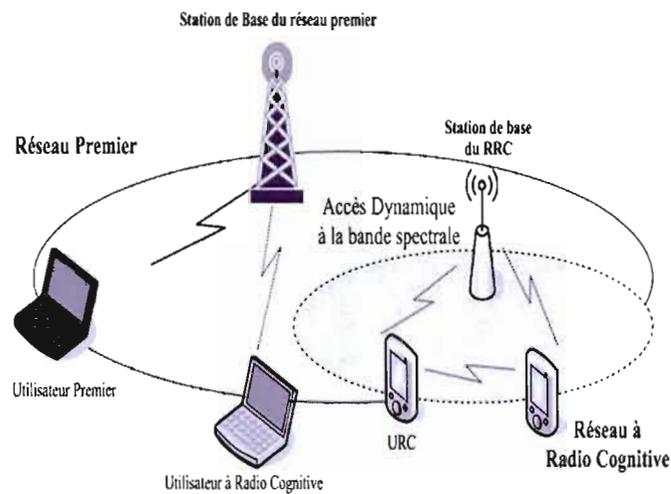


FIGURE 1.6: Réseau à radio cognitive opérant sur les bandes spectrales licenciées. (Akyildiz *et al.*, 2006)

Les bandes spectrales non-licenciées sont connues sous le nom de Bande industrielle, scientifique et médicale (bande ISM). L'usage de ces bandes devient de plus en plus important dans les nouvelles technologies de communication sans-fil comme la Wi-Fi. Cependant il reste beaucoup de problèmes à résoudre pour pouvoir partager le spectre entre les différents RRC d'une manière efficace. Etant donné l'absence des 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 entraîne une diminution de la bande passante, d'où le besoin de développer des algorithmes sophistiqués et performant pour améliorer l'efficacité spectrale, fournir une Qualité de Service (QoS) et être équitable entre les différents RRC. Un exemple de RRC opérant sur des bandes-ISM est illustré dans la Figure 1.7.

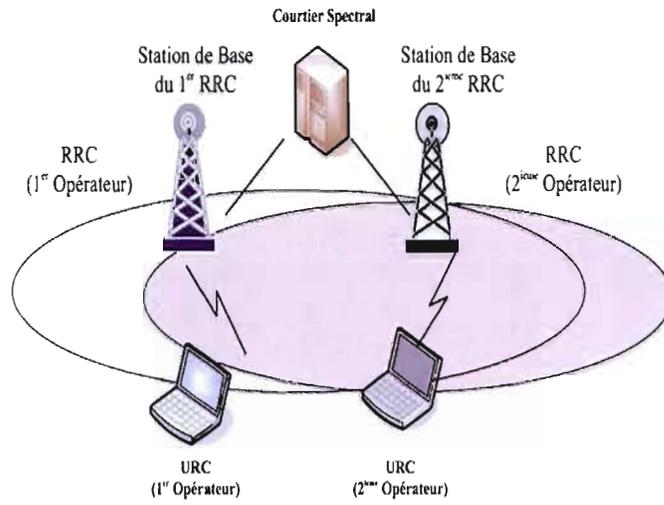


FIGURE 1.7: Réseau à radio cognitive opérant sur les bandes spectrales non-licenciées. (Akyildiz *et al.*, 2006)

CHAPITRE II

LE ROUTAGE DANS LES RÉSEAUX DE RADIOS COGNITIVES

Les réseaux de radios cognitives émergent comme un nouveau concept d'accès et de partage de canaux dans les réseaux sans fils. Le but est d'exploiter les bandes passantes résiduelles sur les fréquences sous utilisées du spectre fréquentiel. En effet, plusieurs études ont révélé que des bandes radios ne sont pas utilisées d'une manière optimale puisqu'il a été remarqué que la bande spectrale libre d'accès (les fréquences utilisées par WiFi par exemple) deviennent surchargées tandis que d'autres bandes restent largement sous-utilisées. Les RRC forment une nouvelle famille d'utilisateurs radios qui tentent d'exploiter les bandes de fréquences sous-utilisées durant l'absence d'utilisateurs primaires et libèrent le canal dès lors que les utilisateurs licenciés de ces fréquences tentent d'y accéder. La majeure partie des études effectuées aujourd'hui s'est penchée sur des scénarios à un saut dans lesquels on se concentre sur les mécanismes des couches physique et MAC nécessaires pour assurer la cohabitation entre les réseaux cognitifs et les réseaux primaires déjà existants tels que le contrôle d'accès et le partage de spectres. Mais récemment, la communauté de recherche a commencé à réaliser le potentiel dans les RRC à multi-sauts qui peuvent fournir de nouvelles possibilités de service permettant d'avoir un large éventail d'applications de communication omniprésentes. Dans ce chapitre, nous présentons les défis existants, les trois types d'environnements cognitifs et les approches proposées pour résoudre le problème de routage dans les réseaux de radios cognitives à multi-sauts.

2.1 Introduction

Avant la discussion du problème de routage, nous commençons par définir quelques termes et concepts de base. Une interface est un appareil sans-fil qui est composé d'au moins un émetteur-récepteur radio bidirectionnelle. Un canal est la plus petite unité de fréquence qu'on peut utiliser pour communiquer. Il peut-être défini aussi comme étant

un sous-ensemble de la totalité du spectre (une bande de fréquence définie) ou une union de plusieurs petits sous-ensembles. Chaque canal a une bande passante spécifique et est utilisée pour la transmission et la réception des données. Une bande de fréquence est une portion plus large du spectre qui peut contenir plusieurs canaux. Une opportunité spectrale dans les réseaux de radios cognitives est une bande de fréquence caractérisée par certains paramètres, comme par exemple la bande passante, qui peut être disponible pour un court délai et dans un emplacement spécifique avant qu'elle soit réutilisée par l'utilisateur primaire. Un réseau à multi-canaux sans étalement spectral est un réseau qui utilise plusieurs canaux séparés pour communiquer avec les différents nœuds. Chaque nœud peut avoir accès à tous les canaux, comme par exemple dans les réseaux statiques, ou uniquement à un sous-ensemble de la totalité des canaux. Un réseau à multi-sauts est un réseau dans lequel la source et la destination sont séparées par au moins un nœud. Pour ce type de réseaux, il existe deux architectures majeures : centralisée et distribuée. Une architecture centralisée contient une entité qui gère l'allocation spectrale, le contrôle d'accès et la communication entre les nœuds. Une architecture distribuée exige à tous les nœuds de partager leurs informations sur le spectre et de coordonner l'accès aux différents canaux. En outre, l'allocation de spectre peut se faire d'une manière coopérative ou non-coopérative. Dans un système coopératif, tous les nœuds partagent leurs données sur les interférences de telle sorte qu'un nœud peut vérifier qu'il n'y a pas d'interférence avant de commencer la communication. Un système non-coopératif existe lorsque les nœuds agissent d'une manière égoïste et transmettent sans tenir compte des interférences. Le futur des RRC dépendra de l'architecture et des méthodes d'allocation de spectre utilisées. Par exemple, un réseau RRC militaire utilisera une architecture distribuée et un protocole non-coopératif qui permettra les nœuds militaires de transmettre sur n'importe quelle fréquence tout en gérant le réseau sans une entité centrale. Une application commerciale serait probablement centralisée et coopérative pour assurer l'équité entre les utilisateurs.

2.2 Les défis de routage dans les réseaux de radios cognitives

Le problème de routage dans les réseaux sans-fil à multi-sauts a été largement étudié dans la littérature (C Siva Ram Murthy, 2004). Plusieurs protocoles ont été proposés dont AODV (*Ad hoc On-Demand Distance Vector* (Perkins et Royer, 1999)), DSR (*Dynamic Source Routing* (Johnson et Maltz, 1996)), DSDV (*Destination-Sequenced Distance-Vector* (Su et Gerla, 1999)) font partie des plus connus et des plus utilisés. La majorité de ces protocoles représente le réseau comme étant un graphe dans lequel les nœuds correspondent à des utilisateurs et les arêtes sont utilisées pour connecter deux nœuds entre eux et faire la communication. Les arêtes sont attribuées un poids qui représente une métrique définie par le protocole. Par exemple DSDV cherche le chemin qui a la plus courte distance. Ce type de réseaux considère deux hypothèses :

- L'allocation du spectre est fixe c'est-à-dire que les nœuds communiquent généralement à travers un canal fixe.
- Ce canal fixe est toujours disponible pour la communication.

Or dans les RRC, la disponibilité d'un canal est dépendante de l'activité de l'utilisateur primaire. La Figure 2.1 nous montre un exemple de réseau dans lequel des utilisateurs secondaires se partagent des bandes de spectre avec les utilisateurs primaires. Plusieurs bandes peuvent exister dont chacune peut avoir des caractéristiques uniques.

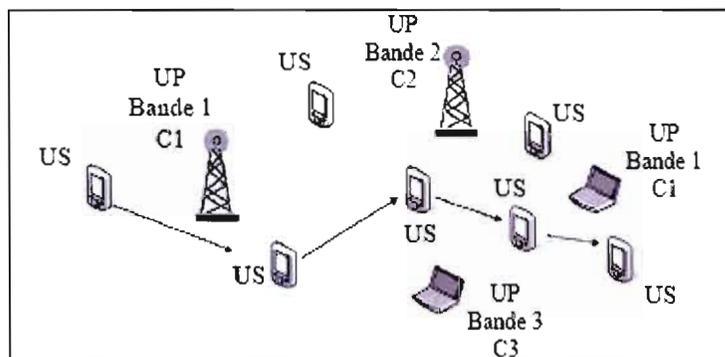


FIGURE 2.1: Exemple de routage dans un RRC

Dans ce scénario, le problème de routage dans un RRC à multi-sauts revient à créer et maintenir des routes à plusieurs sauts entre les utilisateurs secondaires en choisissant les nœuds de relai et le canal à utiliser pour chaque lien de la route. Il faut donc faire face à plusieurs défis reliés à l'activité des utilisateurs primaires et aux opportunités spectrales. Dans la suite, nous présentons les défis majeurs.

2.2.1 La collecte de l'information spectrale

Pour concevoir une solution efficace au problème de routage dans les réseaux de radios cognitives, il faudrait avoir un échange actif entre les modules de routage et les fonctionnalités de gestion de spectre de telle sorte que les modules de routage soient constamment au courant de l'environnement pour prendre les bonnes décisions. Trois scénarios peuvent être proposés :

- L'information spectrale est fournie aux modules de routage par une entité centrale pouvant communiquer avec l'ensemble des nœuds du réseau. Cette entité nécessite une puissance de calcul importante et un grand espace de stockage.
- L'information spectrale est calculée localement par chaque utilisateur secondaire. Chaque US collecte les informations calculées par ses voisins et leur fournit les informations propres à lui de telle sorte que tous les nœuds soient bien informés.
- L'information spectrale peut être calculée par une architecture hybride, c'est-à-dire un alliage entre une architecture centralisée et une architecture distribuée. Dans ce cas, l'entité centrale ne fait pas tout le travail mais laisse la possibilité à quelques utilisateurs secondaires de collecter l'information en local.

2.2.2 La qualité des liens

La topologie des RRC à multi-sauts est fortement influencée par l'activité des UP. Les moyens de mesure classiques tels que le débit et le délai doivent donc être accompagnés par des nouvelles techniques permettant de mesurer la stabilité du lien et la disponibilité

des canaux selon le comportement des UP dans le réseau. En fait comme les US doivent céder aux UP, le spectre disponible dans le réseau devient hétérogène. Dans la Figure 2.2, l'arrivée des utilisateurs primaires a généré trois zones avec des bandes de spectre hétérogènes. Pour qu'un nœud de la zone 1 puisse communiquer avec un nœud de la zone 3 par exemple, ils doivent utiliser différentes bandes de spectre d'où le besoin de nouvelles techniques de choix de liens. Un problème de synchronisation de canaux se pose puisqu'un nœud doit savoir quels canaux sont utilisés par ses voisins et puis permuter vers un canal disponible pour assurer la communication.

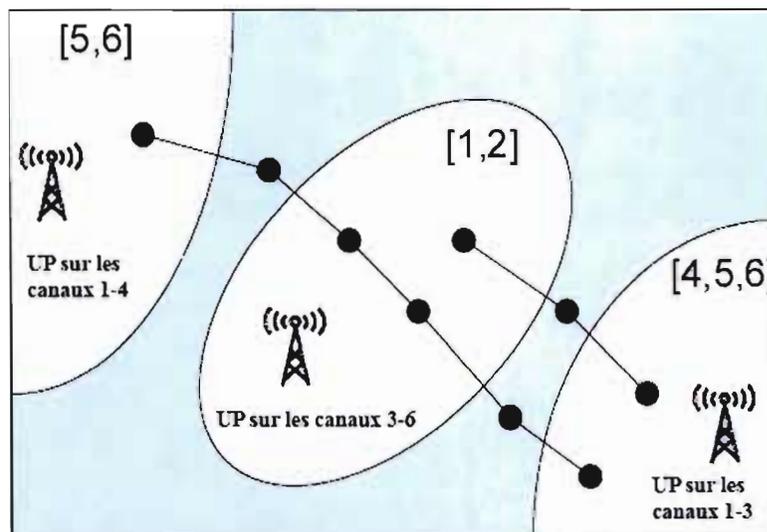


FIGURE 2.2: Routage dans un système hétérogène. L'arrivée des utilisateurs primaires entraîne la création de trois régions qui contiennent différentes bandes spectrales. Les nœuds en dehors de ces régions ont tous les canaux à leur disponibilité

2.2.3 La maintenance et la récupération des liens

En général, une coupure de lien dans les réseaux à multi-sauts est causée par la mobilité. Cependant dans les RRC, la coupure peut aussi être provoquée quand un utilisateur primaire est détecté. En fait lorsqu'un UP commence soudainement son activité dans le réseau pendant que les US sont en communication, un canal (ou plus) devient inutilisable

dans une région ; résultant par conséquent à une coupure dans la route. Il est donc très important d'avoir des procédures de signalement efficaces qui permettent de restaurer les liens avec un effet minimal sur la qualité globale.

2.3 Les environnements cognitifs dans les RRC

La topologie des réseaux de radios cognitives est déterminée par la disponibilité des bandes de spectre et l'activité des utilisateurs primaires sur celles-ci. En fait, l'activité et la durée d'accès aux bandes de spectre propriétaires par les utilisateurs secondaires déterminent la solution de routage appropriée à utiliser. Une solution générale ne peut donc pas être proposée dans ces réseaux mais nous pouvons classer cet environnement en trois catégories dont chacune exige des méthodes de routage spécifiques. Dans la suite, nous présentons les environnements créés par l'activité des UP dans le réseau.

2.3.1 L'environnement statique

Lorsqu'une bande de spectre licenciée est inutilisée pendant une durée qui excède la durée de communication, les utilisateurs secondaires peuvent avoir accès à ces bandes pour une période indéfinie. Ce type d'environnement est appelé statique puisque dans ce contexte, un US considère toute bande présente comme ressource permanente et disponible à l'utilisation. On se trouve dans un problème moins complexe dans lequel l'information spectrale est prédéfinie et quasiment fixe. Par conséquent, les RCC statiques ne présentent pas vraiment un nouveau domaine de recherche puisque les méthodes définies pour les réseaux *ad hoc* et *mesh* peuvent être adaptées à ce type de RCC. En fait, les différences essentielles entre un réseau *mesh* et un réseau de radios cognitives sont la disponibilité et l'hétérogénéité des bandes de spectre. Cependant dans un environnement statique, le problème de disponibilité de bandes de spectre ne se pose plus car elles sont libres à l'utilisation par les US. Plusieurs solutions ont été proposées pour le problème de routage dans les réseaux *mesh* (Sudip Misra, 2008) par exemple, ou (Akyildiz *et al.*,

2005), et ont offert des solutions optimales selon la topologie considérée et le débit du trafic. Une station de base GSM (*Global system for mobile communications*) dans une zone rurale, où l'activité des UP est très rare représente un exemple d'un RRC statique. De même pour les bandes de télévision analogiques dont les bandes de spectre propriétaires non utilisées dans une zone géographique permettent une activité continue aux utilisateurs secondaires. Plusieurs études, entre autre (Cheng *et al.*, 2007a) et (Xin *et al.*, 2005), faites sur les réseaux de radios cognitives se sont concentrées sur cet environnement statique. Ces études supposent que lorsqu'une bande propriétaire est disponible, celle-ci reste accessible et ne change pas de propriétés durant toute la communication.

2.3.2 L'environnement dynamique

Dans un environnement dynamique, les utilisateurs secondaires peuvent utiliser la bande propriétaire quand elle n'est pas occupée par un UP. Cependant, et contrairement à l'environnement statique, l'activité des utilisateurs primaires est plus importante dans le réseau ce qui affecte d'avantage le service offert aux US. Dans ce genre de situation, la stabilité des liens, l'échange de l'information spectrale et la synchronisation des canaux sont des nouveaux défis qu'il faut résoudre pour obtenir une solution optimale. Faut-il donc proposer une métrique qui sélectionne les canaux les moins dynamiques pour faire face au problème de stabilité des liens ? Le choix du canal et la gestion du spectre doivent-ils être gérés par la couche physique uniquement ou par la couche physique et la couche réseau ? Afin de collecter l'information spectrale et de suivre son évolution dynamique, comment les nœuds secondaires doivent-ils échanger leurs données ? Des réponses doivent être données à ces questions pour obtenir une solution efficace dans cet environnement dynamique. Nous présentons plus en détail ces points dans la section 4 de ce chapitre.

2.3.3 L'environnement opportuniste

Si la durée d'activité pour un utilisateur secondaire sur une bande primaire ne suffit pas pour faire une communication, la création d'une route pour un flux entier devient une

solution impossible. Dans cet environnement si dynamique et souvent déconnecté, les US doivent transmettre d'une manière opportuniste sur n'importe quelle bande disponible pendant des courts délais. Comme il n'est pas possible de calculer une route complète, chaque paquet sera transmis sur un canal différent jusqu'à ce qu'il arrive à la destination. Dans les RRC opportunistes, le bon choix du canal à utiliser pour faire relayer les informations est d'une importance majeure. Dans la Figure 2.3a, nous voyons que lorsque la source choisit la bande de fréquence 1 pour relayer les informations, la destination ne reçoit aucun paquet. Par contre lorsque la source utilise la bande 2 dans la Figure 2.3b, un nœud peut faire le relai à la source en passant après par la bande de fréquence 3.

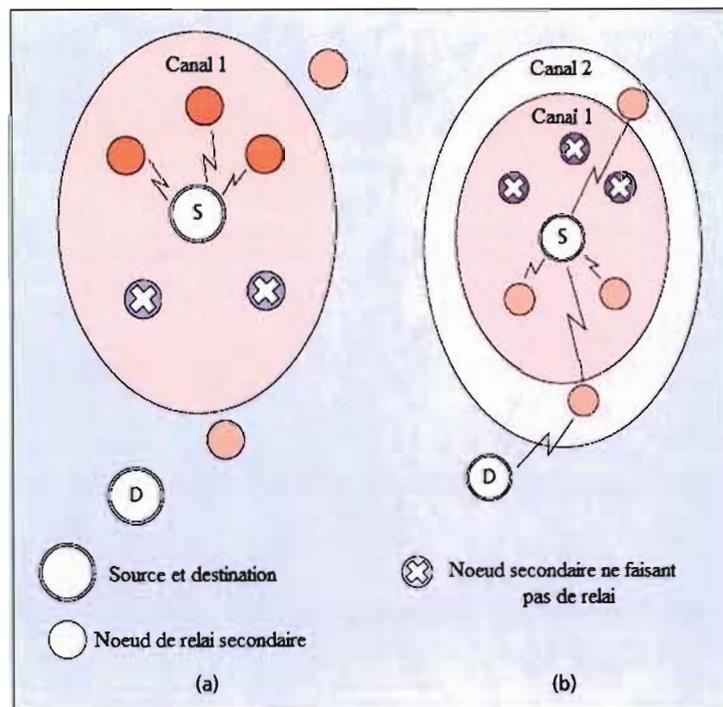


FIGURE 2.3: Relai sur deux canaux différents dans une RRC

Très peu de chercheurs se sont penchés sur le problème de routage dans les RRC opportunistes. L'article (Khalife *et al.*, 2008) propose un système de probabilité capable de mesurer la capacité des canaux disponibles. Une autre solution possible serait d'appli-

quer un système d'historique pour suivre l'activité du réseau. D'avantage d'études doivent être faites sur le contrôle d'information et la synchronisation des canaux dès qu'un accès opportuniste devient possible.

2.4 Étude des travaux proposés

Après avoir présenté les défis et les environnements relatifs aux réseaux de radios cognitives, nous donnons dans la section suivante un survol de littérature de plusieurs travaux proposés pour résoudre le problème de routage dans les RRC. Dans une première partie, nous analysons les solutions qui proposent un fonctionnement séparé entre la couche MAC et la couche de routage puis les solutions au fonctionnement couplé entre ces deux couches.

2.4.1 Méthodes au fonctionnement découplé

En général dans un réseau sans-fil, la couche MAC et la couche de routage effectuent des tâches séparées. La couche MAC est chargée de veiller à la bonne livraison des données entre deux nœuds adjacents et à gérer l'accès multiple, alors que la couche de routage calcule le chemin entier entre la source et la destination. Dans cette situation, chaque couche exécute ses tâches indépendamment de l'autre. Ceci est appelé un fonctionnement découplé.

Les auteurs de (Xin *et al.*, 2005) et (Xin *et al.*, 2007) proposent une solution en deux phases : création d'un graphe et calcul de la route. Tous d'abord les auteurs commencent par créer un graphe en couches dans lequel le nombre de couches est égal au nombre de canaux disponibles dans le réseau. Chaque utilisateur secondaire est représenté par un nœud A et M sous-nœuds supplémentaires A_1, A_2, \dots, A_M pour chaque canal disponible. La Figure 2.4 montre un exemple d'un réseau simple transformé en un graphe en couches. Les arêtes du graphe en couches sont de trois types : accès, horizontale, verticale. Les arêtes d'accès (en pointillés sur la Figure 2.4) connectent chaque nœud avec les sous-

nœuds correspondants. Les arêtes horizontales (en traits sur la Figure 2.4) sont utilisées pour joindre deux sous-nœuds d'une même couche entre eux si leurs nœuds respectifs peuvent communiquer sur un même canal. Les arêtes verticales (en tirets sur la Figure 2.4) connectent les sous-nœuds d'un même nœud sur différentes couches et ainsi savoir sur quel ensemble de canaux ce nœud peut communiquer. Ultérieurement, nous présenterons les inconvénients de cet algorithme qui le rend inapproprié.

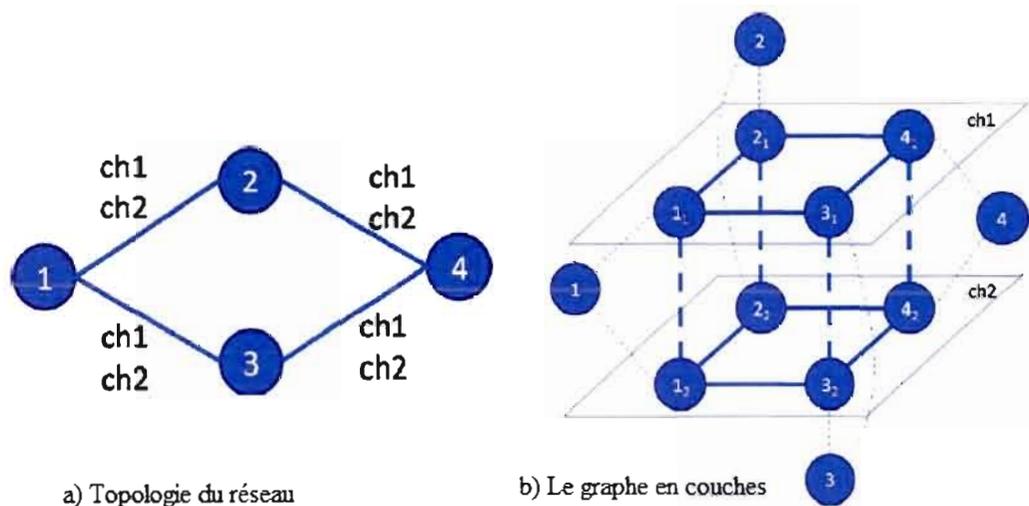


FIGURE 2.4: Création d'un graphe en couches

Une fois le graphe créé, les arêtes horizontales et verticales sont attribuées un poids qui est obtenu par une métrique qui mesure l'interférence et la charge des canaux disponibles. Les arêtes d'accès sont attribuées un poids élevé pour qu'un nœud ne soit pas confondu par un sous-nœud. Ensuite, il suffit d'appliquer un algorithme qui calcule le chemin le plus court pour trouver une route dans le graphe en couche créé.

Une approche similaire est proposée dans (Zhou *et al.*, 2009) qui utilise le principe de la coloration de graphe. Un graphe $G = (N, V)$ est créé. Deux nœuds peuvent être reliés par M arêtes ; où M est le nombre de canaux (couleurs) disponible pour une transmission sur un canal spécifique. La Figure 2.5 représente un exemple simple de coloriage de

graphe. Le plus court chemin est ensuite calculé pour une paire source-destination en utilisant comme dans (Xin *et al.*, 2007) une métrique qui mesure l'inter-interférence entre les liens (le nombre d'arêtes adjacentes sur le chemin utilisant la même couleur).

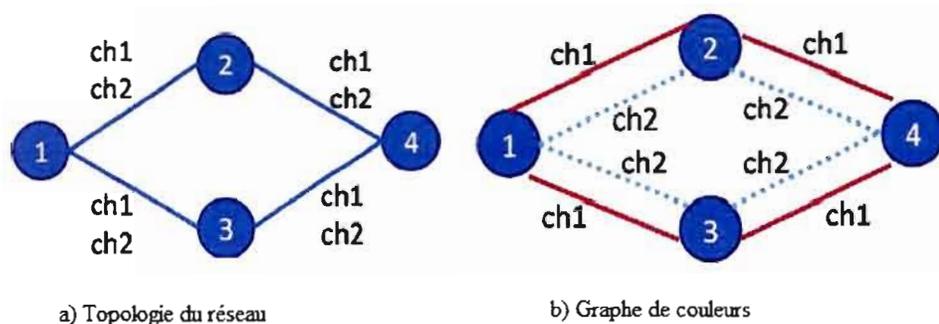


FIGURE 2.5: Création d'un graphe de couleurs

Ces deux solutions proposées (présentes en Figures 2.4 et 2.5) sont intéressantes pour résoudre le problème de routage dans les RRC. Cependant, les auteurs ont supposé dans leur travail que l'environnement cognitif est statique et donc ces approches ne peuvent pas être appliquées dans un scénario où l'activité des UP est importante. En plus, une entité centrale est nécessaire pour générer le graphe et gérer les bandes de spectre, ce qui nécessite énormément d'informations et de calculs de la part de la couche MAC.

2.4.2 Méthodes au fonctionnement couplé

Pour optimiser la performance de transmission de bout en bout entre une source et une destination, une communication entre les couches MAC et réseau doit survenir. Ce fonctionnement couplé permet que la collecte d'information sur l'occupation du spectre soit réalisée d'une manière distribuée sur une route, et de faire des décisions locales sur l'état du réseau.

Dans l'article (Xie *et al.*, 2010), les auteurs analysent l'effet de l'interférence sur les utilisateurs primaires et secondaires par une approche géométrique. En fait, ils proposent

deux méthodes de routages appelées : *Nearest-Neighbor Routing* (NNR) et *Farthest-Neighbor Routing* (FNR). Dans NNR, un émetteur essaye de trouver le voisin le plus proche dans un secteur de rayon D_{max} en fonction des paramètres de QdS et de la position des US et UP. Inversement au NNR, un émetteur dans FNR cherche le voisin le plus loin dans les limites de D_{max} . Les résultats obtenus montrent que FNR réalise une meilleure performance de transmission de bout-en-bout et une utilisation des canaux préférable alors que NNR effectue une meilleure gestion d'énergie. En contre partie, cette solution considère que l'occupation spectrale est statique pendant toute la durée de communication.

D'un autre côté, plusieurs études se sont penchées sur l'effet du délai dans un réseau de radios cognitives à nature dynamique. (Cheng *et al.*, 2007b) introduit une métrique pour les RRC qui mesure le délai de commutation entre les bandes de fréquence et le délai d'accès au média sur une bande de fréquence. Cette métrique est accompagnée par un algorithme de routage réactif (*on-demand routing*), ce qui signifie que les routes sont calculées sur demande de la source avant que la transmission commence. Les auteurs de cet article s'inspire du protocole AODV pour créer un algorithme qui puisse gérer les canaux disponibles pour un nœud et évaluer les délais qu'endurera ce nœud pour relayer les données. Cet algorithme offre une combinaison intéressante entre la couche de routage qui calcule le routage réactif et la couche MAC qui fournit les informations nécessaires sur le spectre et les délais.

Dans (I. *et al.*, 2008), un nouveau protocole, appelé *Spectrum aware mesh routing* (SAMER), qui tient en compte de la fiabilité des liens est proposé. Celui-ci prend en considération la disponibilité d'un spectre sur un long et court terme. En fait, SAMER tente d'envoyer les données sur des spectres disponibles pour un long terme mais n'ignore pas complètement les spectres instantanés. Le protocole commence par créer une liste de routes candidates qui sera mise à jour périodiquement et associée à chaque route une métrique qui mesure la disponibilité des spectres (*Path Spectrum Availability* PSA). PSA a deux buts :

- La disponibilité d'un spectre en local : c'est l'ensemble des bandes de spectre dis-

ponible pour un nœud i , leur bande passante globale et la contention causée par les utilisateurs secondaires.

- La qualité des bandes de spectre : elle dépend de la bande passante et du taux de perte.

Les résultats obtenus montrent que SAMER évite les liens à haute congestion et liens indisponibles. Par contre, les auteurs n'ont pas expliqué comment le protocole gère la maintenance et la récupération des liens lors de l'arrivée soudaine d'un UP.

Finalement, un protocole, appelé *Spectrum-tree based on-demand routing protocol* (STOD-RP), s'inspirant du protocole de routage à base d'arbre (*Tree-based Routing* TBR) est proposé dans (Zhu *et al.*, 2008). Ce protocole simplifie la collaboration entre la décision spectrale et la sélection des routes en établissant un arbre de spectre (*spectrum-tree*) dans chaque bande de spectre. Cet arbre de spectre sert à garder une trace des nœuds qui opèrent sur des bandes de spectre différentes. Sur la Figure 2.6, nous voyons un exemple d'arbre.

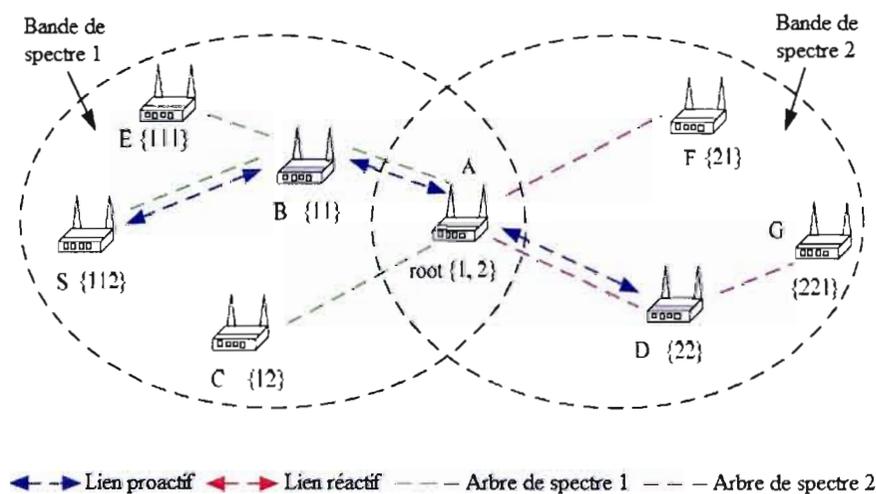


FIGURE 2.6: Un exemple de deux arbres de spectre

Le protocole STOD-RP est formé par :

- Une métrique qui calcule le coût d'un lien.
- Un arbre de spectre.
- Un algorithme qui combine un routage proactif et un routage réactif.

STOD-RP offre aussi un mécanisme de maintenance efficace lors de la perte d'un lien. Mais en contre partie, un nœud racine doit posséder les informations sur la topologie de l'arbre ce qui nécessite une énergie et un calcul important.

2.5 Conclusion

Les protocoles explorés dans la section précédente ont proposé des solutions pour des problèmes et scénarios de routage variés. Toutefois, des similitudes existent entre ces différents algorithmes et il est important de noter leurs performances respectives. Dans la première catégorie, nous trouvons des protocoles qui utilisent la théorie des graphes et des outils mathématiques pour résoudre le problème de routage dans les RRC. Dans la deuxième catégorie, nous trouvons des approches qui proposent que l'information spectrale soit collectée d'une manière locale et distribuée. Chaque US doit participer et aider l'ensemble du réseau à sélectionner les bandes de spectre adéquates et à trouver la route entre la source et la destination.

Un protocole efficace doit prendre en compte :

1. Métrique : La qualité de la métrique est un élément très important parce qu'elle permet de déterminer la fiabilité du système. Par conséquent, il faut faire un compromis entre le nombre de métriques utilisées et la taille du système. En fait si un système exige plusieurs métriques, alors le surdébit (*overhead*) sera important ce qui affectera ses performances. Il faut noter que l'utilisation d'un nombre important de métrique n'entraîne pas forcément de meilleures performances. Ce qui compte c'est la qualité de la métrique.
2. Complexité : Le protocole doit être simple à implémenter. En fait, il est préférable que le protocole puisse être implémenté sur un mécanisme déjà existant (comme

AODV et DSR par exemple) pour améliorer la fiabilité du système.

3. Evolution et mise à l'échelle (*scalability*) : Le protocole doit proposer une solution évolutive, c'est à dire que l'algorithme doit tourner indépendamment du nombre des nœuds.
4. Surdébit : Le surdébit du protocole de routage doit être faible pour augmenter le nombre de canaux qu'on peut utiliser dans un réseau de radios cognitives et ainsi améliorer les performances et le débit du système.

Pour ces raisons, nous avons décider de développer un protocole de routage, simple à implémenter et faible en surdébit, qui utilise une métrique qui reflète la qualité des liens et qui est capable de gérer l'arrivée des UP (qui implique des coupures de liens) par un mécanisme de récupération et maintenance.

CHAPITRE III

CONTRIBUTION

Les solutions déjà existantes pour les réseaux sans-fils classiques ne peuvent pas être portées dans les RRC à cause de leur inhabilité à gérer les réseaux primaires et secondaires. En effet comme nous avons vu dans la section précédente, le problème de routage dans les réseaux de radios cognitives doit faire face à plusieurs nouveaux défis. L'un des défis majeur est la conception d'un mécanisme qui permet une collaboration compétente entre la sélection de la route et la décision spectrale. Le mécanisme efficace serait capable de maximiser les performances du RRC, entre autre les utilisateurs secondaires, tout en préservant l'intégrité des transmissions primaires. Notre travail, que nous présentons dans ce chapitre, consiste à modéliser un protocole de routage qui permet la coexistence entre les US et les UP, la diminution des interférences et l'augmentation du débit de transmission de bout en bout. Ce chapitre est composé de trois parties. Dans la première partie, nous présentons la métrique de routage qui permet de répondre aux exigences de cet environnement hétérogène. Dans la seconde, nous décrivons le protocole proposé pour sélectionner la meilleure route disponible puis enfin nous détaillons le mécanisme de maintenance et de récupération des liens coupés lors de l'arrivée d'un utilisateur primaire.

3.1 La métrique du routage

La métrique de routage utilisée dans un RRC à multi-sauts doit prendre en considération la qualité de la route et la disponibilité du spectre. Cette métrique doit aussi refléter les exigences en QoS des utilisateurs cognitifs et primaires. Pour répondre à ces besoins, nous avons décidé d'utiliser une métrique qui a pour but de minimiser les interférences entre les canaux pour améliorer la qualité de service de bout en bout et éviter de perturber les UP. WCETT (*Weighted Cumulative Expected Transmission Time*) a été présenté par (Draves *et al.*, 2004) pour trouver une solution au problème de routage dans les

réseaux maillés (*Mesh*) à multi-interfaces multi-canaux. Le but de la métrique est de choisir une route à débit élevé entre une source et destination. En fait, la métrique commence par affecter un poids pour chaque lien (saut) en calculant le délai de transmissions prévu ETT (*Expected Transmission Time*) d'un paquet sur le lien. Ensuite, l'ensemble des poids calculés sont cumulés dans WCETT pour obtenir une *path metric*¹ qui tient compte de l'interférence entre les liens qui utilisent le même canal. Nous détaillons dans la suite comment calculer WCETT.

3.1.1 ETX

ETX (*Expected Transmission count*), proposé par (De Couto *et al.*, 2003), mesure le nombre de transmissions prévues, y compris les retransmissions, nécessaire pour transmettre un paquet à travers un lien. Le calcul de ETX commence par mesurer les probabilités de perte d'un paquet dans les directions d'aller et de retour, notées p_a et p_r respectivement, puis le nombre de transmission prévues. Commençons par calculer la probabilité d'un paquet perdu. Soit p la probabilité d'une transmission d'un paquet entre A et B non réussie :

$$p = 1 - (1 - p_a) * (1 - p_r) \quad (3.1)$$

Certains protocoles, comme le 802.11 par exemple, exigent qu'une transmission soit réussie. La MAC du 802.11 va donc retransmettre le paquet perdu jusqu'à qu'il soit bien arrivé. Soit $s(k)$ la probabilité d'un paquet transmis avec succès entre A et B après k tentatives :

$$s(k) = p^{k-1} * (1 - p) \quad (3.2)$$

1. Path metric est une métrique qui calcule le coût du chemin entier entre la source et la destination (bout en bout)

Ainsi, le nombre de transmissions prévues (ETX) nécessaires pour transmettre avec succès un paquet entre A et B se mesure par :

$$ETX = \sum_{k=1}^{\infty} k * s(k) = \frac{1}{1-p} \quad (3.3)$$

Le coût du chemin total est la somme des ETX obtenues pour chaque lien de celui-ci. Le protocole de routage choisit ensuite la route qui a le coût le plus faible. L'équation (3.3) suppose que la probabilité qu'un paquet soit perdu est indépendante de sa taille. L'équation implique aussi que le résultat de ETX est bidirectionnel ; la métrique entre A et B est la même que celle entre B et A. Malgré que ETX réalise un meilleur résultat, comme démontré dans l'article (De Couto *et al.*, 2003), qu'une métrique qui calcule le plus court chemin, elle ne sélectionnera pas la meilleure route dans tous les cas. Par exemple, dans un environnement hétérogène composé de radios 802.11a et 802.11b, ETX choisira dans la plus part des cas des routes 802.11b parce qu'elle considère le taux de perte pour les liens et non pas leur capacité. De plus, ETX donne une préférence aux liens les plus courts tant que leur taux de perte n'est pas élevé. Ces deux facteurs impliqueront que la majorité des routes sélectionnées par ETX vont utiliser des liens 802.11b ce qui n'est pas intéressant dans un RRC.

3.1.2 ETT

Le but de ETT (Draves *et al.*, 2004) (*Expected transmission time*) est d'ajouter la mesure de capacité des liens dans le calcul de ETX. En d'autres mots, on prend ETX et on le multiplie par la capacité du lien pour obtenir la durée nécessaire pour transmettre le paquet. Soit T la taille d'un paquet (1024 octets par exemple) et C la capacité du lien (débit des données), alors :

$$ETT = ETX * T/C \quad (3.4)$$

Pour calculer ETT suivant les équations (3.3) et (3.4), nous avons besoin de connaître

les probabilités de perte p_a et p_r . Les valeurs de p_a et p_r peuvent être obtenues en utilisant la technique de diffusion de paquets décrite par (De Couto *et al.*, 2003). En résumé, chaque nœud transmet périodiquement (une fois par seconde) un paquet de sondage. Ensuite, les nœuds traquent le nombre de paquets de sondage reçus par chaque voisin durant la fenêtre glissante (10 secondes) et intègrent cette information dans leurs paquets de sondage. Les nœuds peuvent calculer p_r à partir des paquets de sondage qu'ils reçoivent d'un voisin pendant la fenêtre glissante, et peuvent utiliser l'information sur eux même reçue par le dernier paquet de sondage d'un voisin pour calculer p_a . Pour mesurer la capacité, chaque nœud transmet chaque minute deux paquets de sondage simultanés (*back-to-back*) à chacun de ses voisins. Le premier paquet est petit (127 octets) alors que le deuxième a une taille plus importante (1137 octets). Le voisin mesure la différence de délai entre la réception du premier et du deuxième paquet de sondage, puis transfère le résultat à l'émetteur. L'émetteur reçoit au minimum 10 valeurs avant d'estimer la capacité en divisant la taille du deuxième paquet par la plus petite valeur de délai obtenue. Cette technique a été proposée par (Keshav, 1991).

3.1.3 WCETT

WCETT est une extension de la métrique ETT proposée par les même auteurs de (Draves *et al.*, 2004). Le but de WCETT est de réduire l'interférence en minimisant le nombre de nœuds qui utilisent le même canal sur le chemin total. Ainsi la diversité des canaux utilisés entrainera une réduction au niveau de interférence. Soit :

$$ETX = \sum_{i=1}^n ETT_i \quad (3.5)$$

L'équation (3.5) donne une estimation du délai nécessaire pour qu'un paquet traverse le chemin de bout en bout. Or ceci n'est pas suffisant puisque WCETT doit prendre en considération l'impact de la diversité des canaux utilisés. Soit un chemin composé de deux sauts dans lequel les sauts interfèrent entre eux. En d'autre termes, un seul saut

peut fonctionner dans un temps donné. Soit C la capacité des liens. Si nous ignorons la perte des paquets, alors les ETT (qu'on notera T) seront égaux sur les deux liens. En raison de l'interférence, la capacité maximale qu'on peut atteindre sur ce chemin est de $C/2$. Et puisque T est inversement proportionnel à C , la notion de réduction de capacité sur le chemin peut être montré en donnant un poids qui est égal à la somme des délais de transmission des paquets sur les liens en interférence ; dans ce cas $2 \times T$. Cette intuition peut être généralisée en supposant que si deux liens sur un chemin utilisent le même canal alors ces liens seront en interférence. Cette supposition est généralement vraie pour les courts chemins mais moins juste pour les longs chemins. Soient n le nombre de saut sur la route et k le nombre de canaux dans le réseau :

$$X_j = \sum_{\text{lien } i \text{ utilise le canal } j} ETT_i; \text{ avec } 1 \leq j \leq k \quad (3.6)$$

Ainsi X_j est la somme des délais de transmission des différents liens (sauts) i sur le canal j . Le débit sur le chemin total sera calculé à partir du canal qui a la valeur X_j la plus élevée (canal d'étranglement *bottleneck channel*). D'où :

$$WCETT = \max_{1 \leq j \leq k} X_j \quad (3.7)$$

Il est clair que la métrique ainsi calculée va sélectionner les routes qui diversifient l'utilisation des différents canaux. Toutefois, la valeur de cette métrique n'augmentera pas lorsque le nombre de liens dans la route évolue parce que les liens qui n'utilisent pas les canaux d'étranglement (*bottleneck*) n'affectent pas la valeur de la métrique. En fait, la métrique devrait augmenter lorsque le nombre de sauts augmente pour minimiser la consommation des ressources et le délai total à travers la route. En combinant les équations (3.5) et (3.7), on obtient la moyenne pondérée suivante :

$$WCETT = (1 + \beta) \sum_{i=1}^n ETT_i + \beta * \max_{1 \leq j \leq k} X_j; \text{ avec } 0 \leq \beta \leq 1 \quad (3.8)$$

Le premier terme de l'équation (3.8) présente la somme des délais de transmission sur les différents liens du chemin total. Le deuxième terme reflète l'ensemble de sauts qui auront un impact élevé sur le débit total. La moyenne pondérée de l'équation représente donc une tentative d'équilibre entre les deux. La Figure 3.1 illustre quelques exemples de calcul de WCETT. Le canal d'étranglement est le canal 1 dans le chemin 1 et le chemin 2. Le chemin 2 est composé de quatre sauts ; un saut de plus que le chemin 1. Le calcul de WCETT montre que le chemin 1 est de meilleure qualité pour les deux valeurs de β choisies.

Dans les chemins 2 et 3, le canal d'étranglement est le canal 1 et le nombre de sauts est identique. Cependant, il n'est pas facile de choisir le meilleur chemin. Ceci est dû au fait que selon la valeur de β choisie chaque route peut donner un meilleur résultat. WCETT permet donc de faire un compromis entre la diversité des canaux et la longueur des chemins (débit et délai) en variant la valeur du paramètre β .

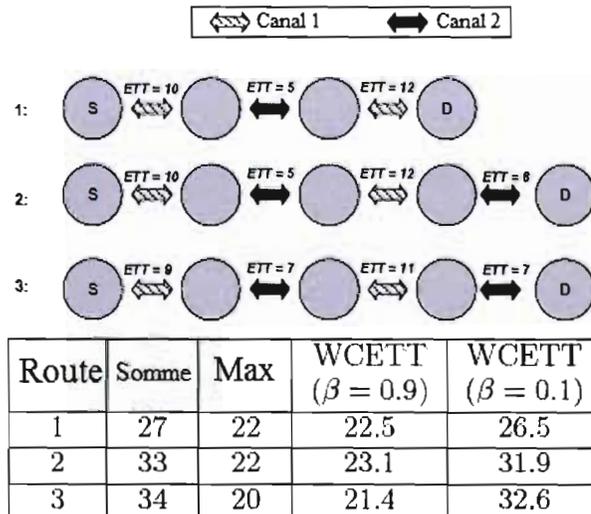


FIGURE 3.1: Un exemple de calcul de WCETT

3.2 Le protocole de routage

Nous considérons un système de communication sans-fils formé de N bandes pour le transfert des données. Les données de signalement peuvent être livrées à travers ces bandes mais pour éviter de transmettre les mêmes données de signalement sur toutes les bandes (lors d'une diffusion par exemple), nous considérons une autre bande (comme les bandes ISM (industriel, scientifique, et médical) par exemple) spécifique à ces données. Nous supposons aussi que chaque nœud possède deux interfaces radios :

- Une interface fixe qui est affectée pour des longues durées à un canal qu'on appellera canal fixe. Elle est utilisée pour la réception des données.
- Une interface commutable qui est affectée d'une manière dynamique à un canal pendant des courtes durées. Elle permet à un nœud X de transmettre à un nœud Y voisin en modifiant son canal vers le canal fixe de Y . Elle est donc utilisée pour l'émission des données.

Dans la suite, nous développons un protocole de routage qui permet de gérer cet ensemble de bandes et interfaces.

3.2.1 Gestion de l'interface fixe

La gestion de l'interface fixe implique le choix d'un canal à attribuer à l'interface fixe et d'informer les voisins quel canal est utilisé par cette interface. Par exemple, si l'interface fixe d'un nœud A utilise le canal 1, alors A doit informer ses voisins qu'il utilise le canal 1 parce que toutes les transmissions vers A vont se faire sur ce canal. Pour équilibrer l'utilisation des canaux, il est important que les nœuds voisins utilisent différents canaux pour leur interface fixe. La Figure 3.2 montre cette étape sur un réseau composé de 3 nœuds et 3 canaux². Au début, chaque nœud choisit un canal fixe d'une manière aléatoire. Ensuite, chaque nœud transmet périodiquement un paquet de découverte de

². La table présentée dans la Figure est une association implicite de `TableVoisins` et `TableCanauxUtilisés`

voisins dit Hello sur tous les canaux. Ce paquet contient le canal fixe utilisé par le nœud et une table appelée TableVoisins qui regroupe les canaux fixes utilisés par ses voisins. Quand un nœud reçoit le paquet Hello, il met à jour sa TableVoisins en ajoutant le canal fixe utilisé par le voisin.

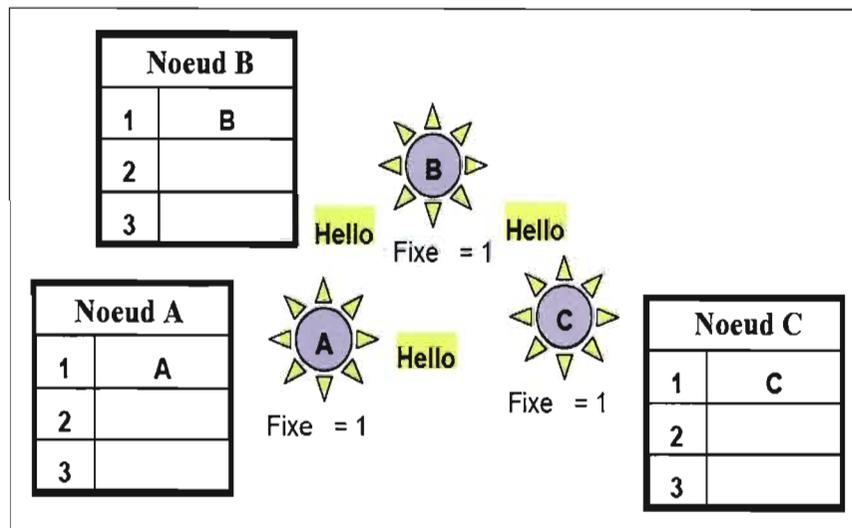


FIGURE 3.2: Chaque nœud diffuse périodiquement sur tous les canaux le paquet Hello indiquant le canal fixe qu'il utilise

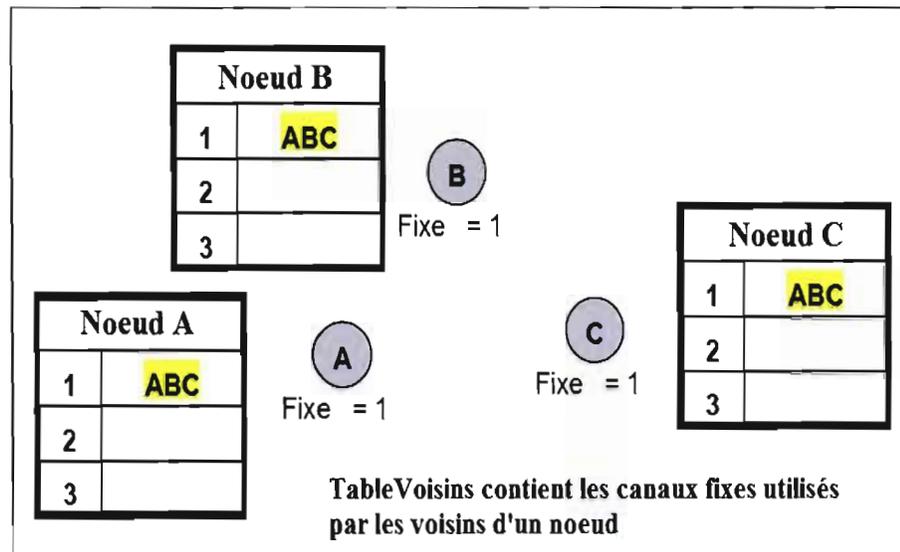


FIGURE 3.3: Après la réception d'un paquet Hello, le nœud met à jour ses deux tables

La table `TableCanauxUtilisés`, qui contient le nombre de nœuds voisins qui utilisent un canal comme un canal fixe, est mise à jour grâce à `TableVoisins` (Figure 3.3).

Une fois le flux de premiers paquets Hello est terminé, chaque nœud examine sa `TableCanauxUtilisés`. Si le nombre des nœuds qui emploient le même canal fixe que lui-même est important, alors un nœud d'une probabilité p change son canal fixe vers un autre moins utilisé. Ensuite, ce nœud transmet des paquets Hello à ses voisins pour leur informer du nouveau canal fixe choisi (3.4). L'approche probabiliste permet d'éviter un changement fréquent du canal fixe.

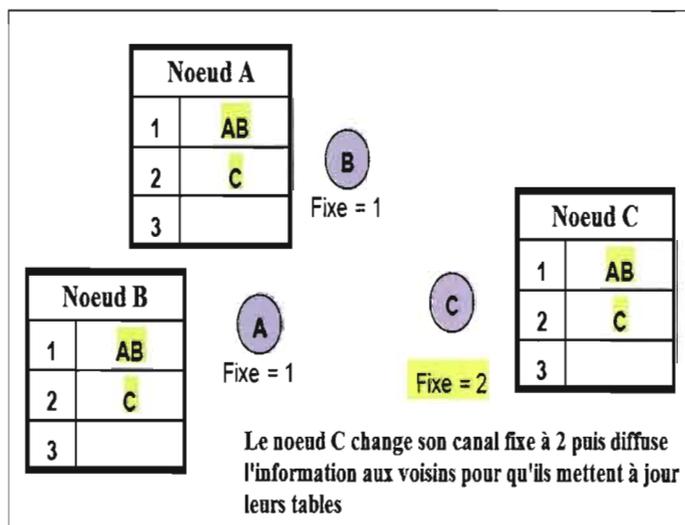


FIGURE 3.4: Chaque nœud consulte périodiquement sa TableCanauxUtilisés

3.2.2 Gestion de l'interface commutable

Après avoir sélectionné l'interface fixe, un mécanisme de gestion est nécessaire pour affecter l'interface commutable aux canaux nécessaires. En fait, pour utiliser tous les canaux disponibles dans le réseau, les interfaces vont devoir commuter d'une manière dynamique, et donc un protocole est nécessaire pour décider quand est ce qu'il faut commuter d'un canal à l'autre. Le protocole doit assurer que tous les voisins d'un nœud X peuvent communiquer avec lui sur demande ; ce qui exige que tous les voisins soient au courant du canal utilisé par au moins une interface de X.

Chaque canal est associé à une file d'attente comme le montre la Figure 3.5. Si un paquet unicast est émis, le canal fixe de la destination du paquet est cherché dans TableVoisins et puis le paquet est inséré dans la file d'attente correspondante. Si l'émetteur a le même canal fixe que le récepteur, le paquet est mis dans la file du canal fixe. Sinon celui-ci est mis dans la file d'un canal appartenant à l'interface commutable.

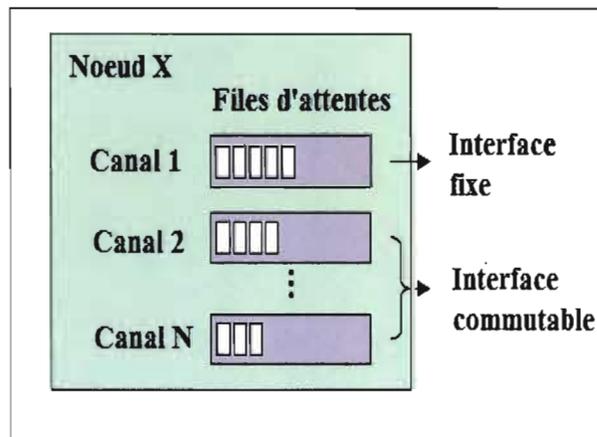


FIGURE 3.5: Files d'attente maintenues par chaque nœud pour chaque canal

Dans un réseau à canal unique, un paquet multicast peut être reçu par tous les voisins. Cependant dans un système à multi-canaux, un paquet émis en diffusion sur un canal ne sera reçu que par les voisins qui écoutent ce canal. Ainsi, pour réussir à transmettre un paquet à tous les nœuds, une copie du paquet de diffusion est ajouté à la file d'attente de chaque canal puis émis lorsque le canal commence à transmettre. Le nombre de copies va certainement augmenter lorsque le nombre de canaux augmente mais le coût par canal reste le même. Par exemple dans un réseau à 5 canaux, chaque diffusion implique la transmission de 5 copies du paquet à travers 5 canaux ; résultant à un paquet par canal. Par conséquent, le coût par canal (*overhead*) est le même que dans les réseaux à canal unique.

Après l'insertion des différents paquets dans les files d'attentes correspondantes, ces paquets sont transmis sur tous les canaux à travers l'interface commutable. Quand l'interface commutable change de canal, elle commute toujours vers le canal qui a les données les plus anciennes en file d'attente pour assurer une équité dans le système. L'interface commutable change de canal dans deux cas :

- L'interface est sur un canal qui a une file d'attente vide et il existe au moins une file d'attente non vide dans un autre canal.

- L'interface est assigné à un canal pour une durée supérieure à `DuréeCommutationMax` et il existe au moins une file d'attente non vide dans un autre canal.

La Figure 3.6 illustre la gestion de l'interface fixe et commutable. Le nœud A souhaite transmettre des paquets à C en passant par B. Les interfaces fixes des nœuds A, B et C sont assignées aux canaux 1,2 et 3 respectivement. Supposons que l'interface commutable du nœud A est assignée au canal 3, celle de B à 1 et celle de C à 2. primairement, l'interface commutable de A permute vers le canal 2 car le canal fixe du nœud B est 2. Ensuite, B commute vers 3 pour que les paquets soient reçus par C sur son canal fixe qui est le canal 3. Une fois les interfaces commutables sont bien affectées, il n'est plus nécessaire de changer de canal pendant la transmission de ce flux.

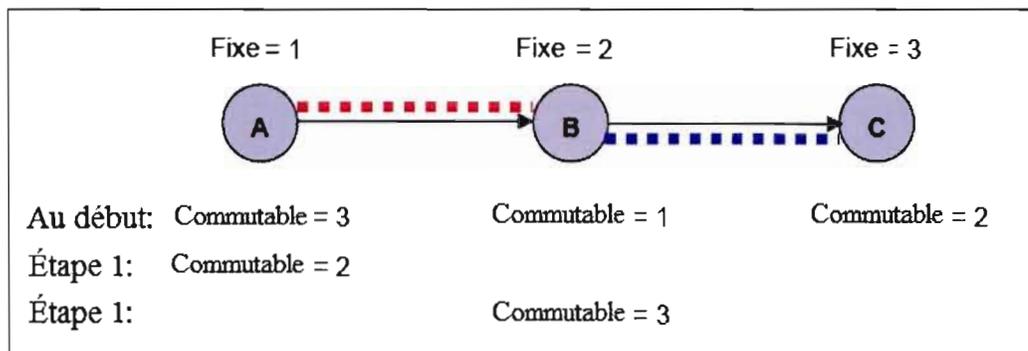


FIGURE 3.6: Gestion des interfaces commutables pour un réseau de 3 nœuds et 3 canaux

3.2.3 La découverte des routes

Le protocole de routage proposé est conçu pour être un protocole à la demande similaire à AODV. Le protocole utilise la métrique WCETT décrite auparavant. Le processus de routage est initié par la demande d'un nœud source qui diffuse une requête de route (*Route Request* RREQ) sur tous les canaux. Le paquet RREQ transmis par un nœud X sur un canal i contient le WCETT calculé et les canaux utilisés sur l'ensemble des sauts. De plus, chaque nœud contient une table `TablePourPrimaire` qui permet de gérer l'arrivée du UP dans la partie de récupération et maintenance. Un nœud rediffuse le RREQ dans

deux cas :

- Le numéro de séquence de RREQ est vu pour la première fois. Dans ce cas, le coût de la route parcourue est enregistré dans une table locale.
- Le coût de la route déjà découverte dans le RREQ est plus petit que celui trouvé dans les précédents RREQ avec le même numéro de séquence.

En fait, un RREQ à faible coût pourrait traverser un long chemin et atteindre un nœud intermédiaire après qu'un RREQ à coût plus élevé a été envoyé. La deuxième condition est donc nécessaire pour augmenter la probabilité de trouver la route qui a le plus faible coût. Lorsque la destination reçoit un RREQ, elle envoie une réponse (*Route Reply* RREP) si le coût du RREQ reçu est plus petit que les RREQ (qui ont le même numéro de séquence) déjà reçus. La source utilise toujours la route qui a le plus petit coût reçu par la destination pour transmettre les données.

3.3 Récupération et maintenance des routes

Surmonter l'arrivée soudaine des UP est la responsabilité du mécanisme de récupération et maintenance des routes. Ce mécanisme est crucial pour notre protocole de routage car les utilisateurs primaires vont souvent interrompre les flux des US en cours. A cet effet, le paquet d'erreur (*Route Error* RERR) d'AODV est déployé pour récupérer le lien interrompu par un utilisateur primaire. Nous supposons qu'une seule bande est interrompue à un moment T . Lorsqu'un nœud cognitif (qu'on nommera le détecteur) détecte l'activité d'un UP sur un canal, ce qui fait partie de la liste des fonctionnalités et capacités d'un système de radios cognitives, il effectuera une récupération locale. Le détecteur commence par envoyer un RERR à la source qui contient la table `TablePourPrimaire`. Cette table comporte les canaux utilisés par le nœud et ses voisins directs. Une fois qu'un UP est détecté sur un canal, `TablePourPrimaire` est mise à jour de façon à mettre les canaux occupés par le primaire à -1. Ensuite, la source va transmettre les paquets sur une autre route déjà calculée (disponible dans sa table locale) en attendant que le lien rompu soit

recupère. De plus, le détecteur va diffuser un autre message RERR à tous ses voisins directs pour qu'ils mettent à jour leur TablePourPrimaire. Si un nœud voisin communique sur un canal mis à -1 par le détecteur, le voisin doit changer de canal en relançant une découverte comme vue dans le chapitre 3.2.2. Ensuite, le voisin modifie sa TablePourPrimaire et répond au détecteur pour lui informer du nouveau canal utilisé. L'initiateur transmet alors un message RREP avec les nouveaux canaux utilisés à la source qui pourra par la suite réutiliser la route qui a été interrompue sans déranger l'utilisateur primaire.

CHAPITRE IV

PARAMÈTRES ET RÉSULTATS DE SIMULATION

4.1 Outil et paramètres de simulation

Afin de tester le comportement de notre protocole , présenté dans le chapitre précédent, plusieurs simulations ont été réalisées dans des conditions différentes. Une étude comparative avec MM-AODV (Multi-radio Multi-channel AODV) (MM-AODV, 2006) a été élaborée. Avant de détailler nos simulations, nous introduisons tout d'abord l'outil de simulation utilisé : NS-2 (ns, 1996). Les paramètres de l'environnement de simulation ainsi que les différents scénarios prévus sont abordés dans la section 6.2. Dans la section suivante on va présenter et discuter les résultats obtenus.

4.1.1 Outil de simulation

Plusieurs simulateurs de réseaux ont été développés afin de répondre à des besoins divers. NS-2 est, désormais, l'outil de simulation de réseaux le plus puissant et le plus utilisé par la communauté scientifique en raison de sa simplicité et de son implémentation modulaire. C'est les raisons pour lesquelles notre choix s'est porté sur ce simulateur. NS-2 est un logiciel de simulation de tout type de réseaux informatique développé dans le cadre du projet *Virtual InterNetwork Testbed* (VINT) au Laboratoire National de Lawrence Berkeley (VINT, 1997), sous lequel la dernière version sortie est la 2.34. Les premières versions de ce simulateur ne supportaient que les architectures des réseaux filaires. Cependant avec l'avènement de la technologie sans fil, d'autres versions ont été développées et

étendues pour supporter les réseaux sans fil et plus particulièrement les réseaux MANET (Mobile Ad hoc NETWORK). Le simulateur NS-2 se compose d'une interface de programmation en Tcl/OTcl et d'un noyau écrit en C++ dans lequel la plupart des couches et protocoles réseaux ont été implémentés :

- Couche MAC : CSMA, CDMA, 802.X, Token ring, MPLS, liens satellite
- Couche Réseaux IP : routage dans les réseaux ad-hoc (AODV, DSR, DSDV, TORA, AMODV), routage dans les réseaux filaire (Link state, Distance vector), les réseaux multicast, IntServ, DiffServ.
- Couche Transport : TCP, UDP (*User Datagram Protocol*).
- Traffic : parreto, ON/OFF, CBR, FTP, telnet.

Avant de réaliser nos simulations nous avons testé, à travers des exemples, les différents modules de NS-2. En examinant les résultats obtenus, nous avons pu mettre en évidence quelques bogues au niveau de la couche MAC, qu'au niveau de la couche physique. Les correctifs nécessaires ont été apportés. Pour les besoins de simulation de notre protocole, nous avons implémenté un module pour le support des réseaux à multi-canaux et multi-interfaces sous NS-2, qui n'est pas supporté dans la dernière version du simulateur, en se basant sur le simulateur Cognitive Radio Cognitive Network (CRCN) (CRCN, 2009).

4.1.2 Les paramètres de simulation

Le tableau 4.1 récapitule les paramètres de simulation du scénario qui a été réalisé. Nous considérons dans cette section un réseau constitué de 20 nœuds secondaires non mobiles et 5 nœuds primaires. Ces nœuds sont distribués dans une zone carée de 500*500 m². Les simulations sont effectuées dans des réseaux à multi-sauts à base de IEEE 802.11 et chacune d'elles est exécutée pendant 150 secondes. Dans NS-2, il existe un générateur de trafic permettant de créer deux types de trafics différents : TCP (*Transport Control Protocol*) ou CBR (*Constant Bit Rate*). Nous nous sommes basés sur le protocole CBR dont le fonctionnement est assez simple : les paquets ont une taille fixe et sont envoyés à un rythme continu, l'intervalle d'envoi entre deux paquets est constant. Dans nos si-

mulations, la taille des paquets est fixée à 512 octets et la fréquence d'envoi est de 20 paquets/secondes.

Trois modèles de propagation sont implémentés dans NS-2 : *Free space*, *Two-ray ground* et *Shadowing*. Ces modèles sont utilisés pour prédire la puissance avec laquelle chaque paquet sera reçu. Au niveau de la couche physique, il existe dans NS-2 une variable appelée *Cs.Threshold* qui représente la limite inférieure de réception de message. Si un message arrive à destination avec une puissance inférieure à cette limite, il est considéré comme perdu. Dans nos simulations, nous utilisons le modèle *Two-ray ground*.

TABLE 4.1: Les paramètres de simulation

Paramètre	Valeur
Topologie	500*500 m2
Nombre de nœuds	20
Type de trafic	CBR
Débit de transmission	5.6 Mbits/s
Taille des paquets	512 octets
Durée de la simulation	150 secondes
Couche MAC	IEEE 802.11
Couche de transport	UDP

4.2 Résultats et discussions

Dans cette section, nous présentons et analysons quelques résultats de simulations réalisés en utilisant les paramètres détaillés plus haut. Les performances de l'approche proposée sont évaluées en termes du débit global du système et du débit de bout en bout moyen par transmission. Rappelons que le débit de bout en bout moyen est la somme de tous les débits des transmissions secondaires activées dans chaque intervalle de temps.

Nous comparons les débits obtenus par notre proposition (appelé CR-AODV) à ceux obtenues en utilisant l'algorithme de routage MM-AODV. En fait, MM-AODV est une extension du protocole AODV qui permet l'ajout et le support des réseaux à multi-canaux et multi-interfaces. La comparaison avec MM-AODV nous permet de vérifier si notre solu-

tion de routage réactive, utilisant un ensemble d'interfaces fixes et commutables, offre des meilleurs résultats. De plus, nous pouvons vérifier si la métrique utilisée, WCETT, prend en considération les besoins en qualité de service des utilisateurs secondaires et donne des meilleures routes que MM-AODV qui utilise le nombre de sauts comme métrique de routage.

Dans la Figure 4.1, nous traçons le débit moyen de transmission de bout en bout du réseau de radios cognitives en fonction du nombre de flux en activité. Pour cette première simulation, dans laquelle trois utilisateurs primaires sur cinq sont en activité, nous comparons le débit obtenu par notre approche et celui obtenu par MM-AODV en variant le nombre de canaux disponibles. Premièrement, nous supposons que cinq canaux sont disponibles à l'utilisation par les URC et nous étudions l'effet de l'augmentation du nombre de flux sur le débit. Nous remarquons que le débit obtenu par CR-AODV est bien supérieur à celui de MM-AODV. Ensuite, nous baissons le nombre de canaux disponibles à trois pour voir si l'écart entre les deux approches reste important ou se rétrécit. En effet, le débit reste plus élevé et un bon écart est maintenu entre les deux solutions. Notons aussi que le débit obtenu par notre approche avec trois canaux disponibles est supérieur au débit réalisé par MM-AODV avec cinq canaux disponibles. Ceci est dû à la bonne gestion des BS disponibles par notre protocole de routage qui vise à utiliser différents canaux pour minimiser les interférences et la charge d'utilisation. La métrique WCETT joue aussi un rôle important en faisant un compromis entre la diversité des canaux et la longueur des chemins en terme de débits et de délais et non pas en terme de distance comme le fait MM-AODV. Notons aussi que lorsque plusieurs canaux sont disponibles, les performances du réseau augmentent ce qui est tout à fait logique.

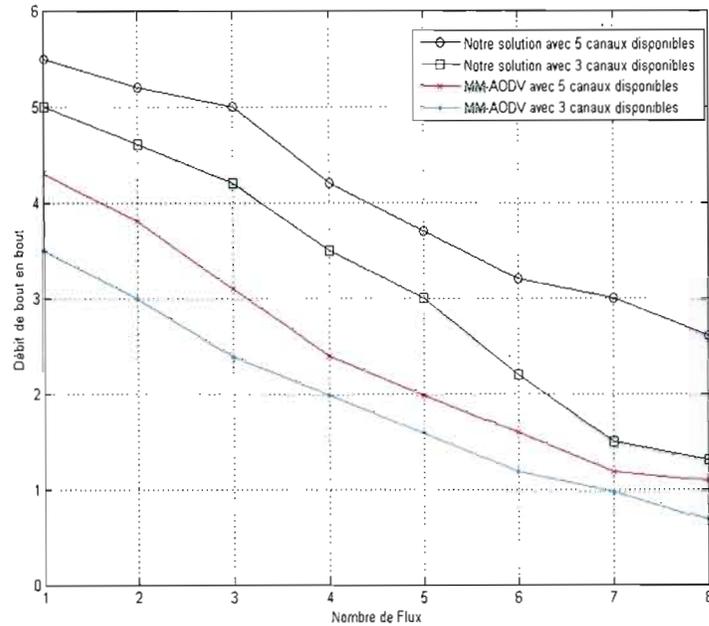


FIGURE 4.1: Le débit moyen de bout en bout en fonction du nombre de flux dans le réseau

La deuxième simulation que nous avons réalisée avait comme objectif d'évaluer l'impact de l'introduction soudaine d'un utilisateur primaire dans le routage. Dans la Figure 4.2, une transmission primaire arrive à la deuxième seconde après qu'une route ait été trouvée entre la source et la destination par les nœuds cognitifs. Nous remarquons que le débit chute fortement à la deuxième seconde puisque les nœuds secondaires doivent libérer les BS propriétaires. Le processus de récupération prend moins de 150 ms pour réparer la route et continuer la transmission. Nous répétons ensuite la même simulation en changeant les nœuds source et destination pour voir comment réagirait le mécanisme de récupération cette fois-ci. Nous constatons dans la Figure 4.3 que le processus de récupération dure moins de 150 ms lui aussi mais le débit revient à la valeur obtenue avant l'arrivée de l'UP. Dans ce scénario, le processus de récupération a réussi à trouver un autre canal capable de garantir les mêmes performances que celles du canal coupé par

l'activité d'un utilisateur primaire.

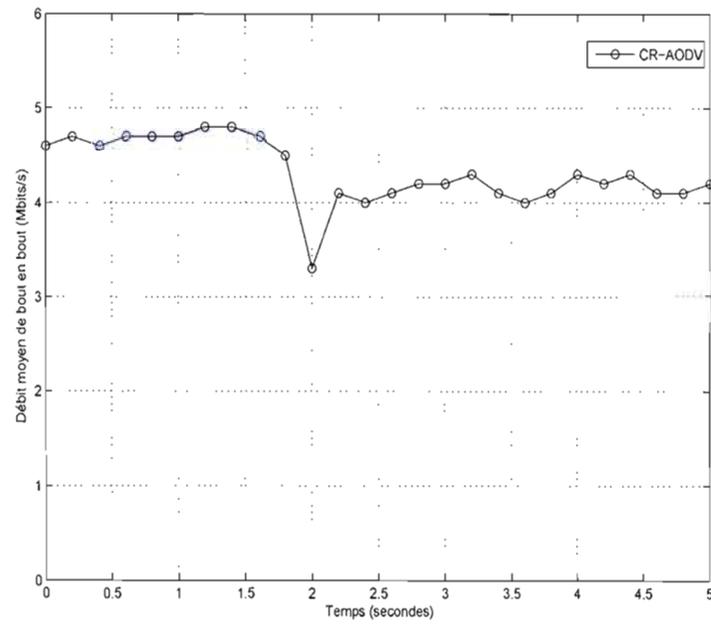


FIGURE 4.2: L'impact d'un UP sur une transmission. Le débit chute puis remonte mais n'atteint pas la valeur initiale après récupération

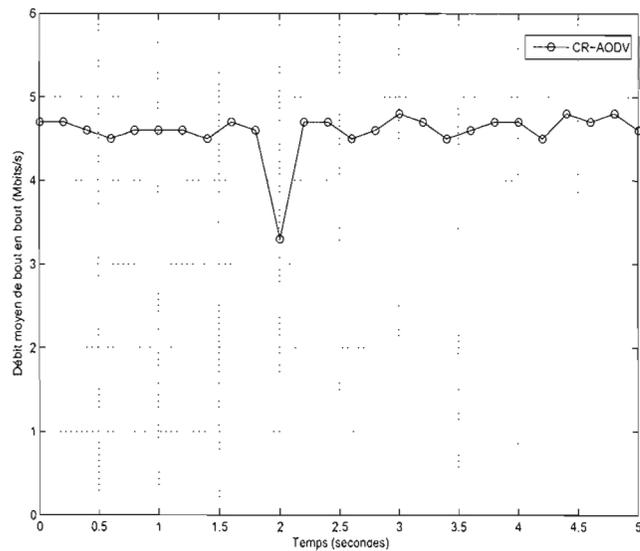


FIGURE 4.3: L'impact d'un UP sur une transmission. Le débit chute puis revient à la valeur initiale après récupération

La Figure 4.4 illustre le débit moyen de transmission de bout en bout en fonction du nombre de flux en variant le nombre des UP en activité pour CR-AODV. Nous pouvons voir que le débit diminue lorsque le nombre des utilisateurs primaires augmente parce que les bandes disponibles deviennent rares. Les nœuds secondaires se trouvent donc à partager un seul canal (ou très peu de canaux) ce qui entraîne une baisse considérable de la qualité des liens.

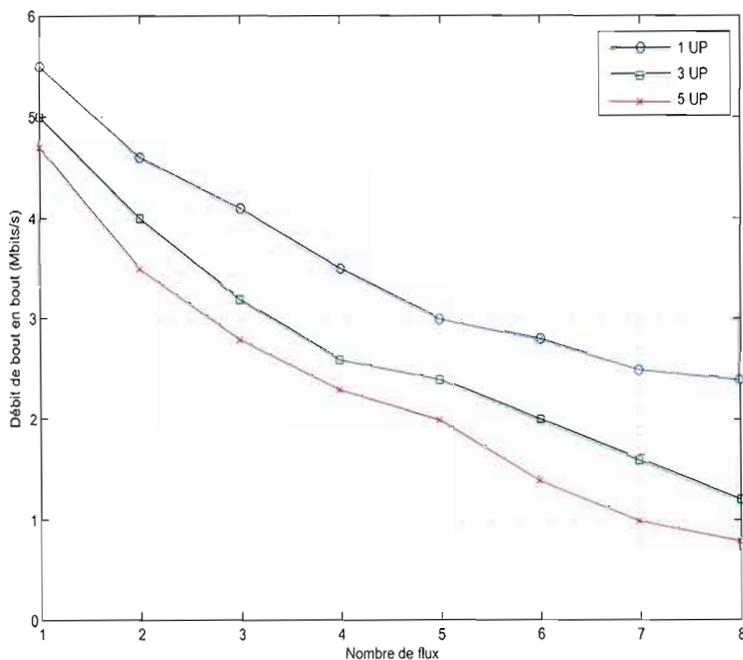


FIGURE 4.4: Le Débit moyen de bout en bout lorsque le nombre des UP augmente

Finalement, nous réalisons un test pour quantifier l'effet de l'arrivée des UP sur la connectivité des chemins entre les US. Au début de chaque simulation nous lançons cinq flux aléatoires entre les nœuds cognitifs en activant aucun utilisateur primaire. Ensuite, pendant que les flux des US sont en cours, cinq UP commencent leur activité l'un après l'autre. L'axe des ordonnées de la Figure 4.5 représente le ratio de déconnexion moyen ; c'est à dire combien de flux sont coupés à cause de l'arrivée des UP et combien de flux doivent être récupérés. Nous remarquons sur la Figure que notre solution a le ratio de déconnexion le plus faible car le mécanisme de récupération locale garantie une meilleure connectivité dans le réseau. En fait notre protocole stocke dans une table (dans chaque nœuds) un ensemble de routes possibles entre la source et la destination. Cette fonctionnalité lui permet de mieux gérer les connexions entre les nœuds et de rapidement récupérer la route en utilisant les différents chemins et informations stockées.

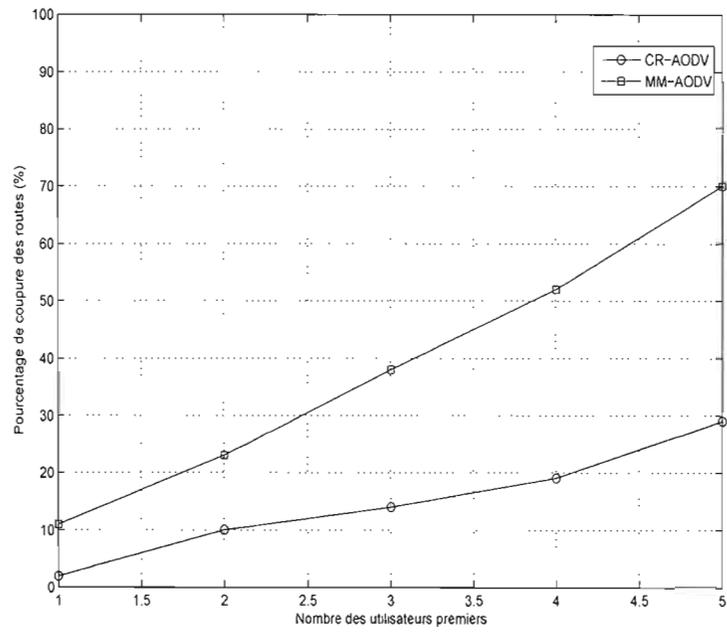


FIGURE 4.5: Pourcentage de coupure des routes par rapport au nombre des UP

CONCLUSION

Dans ce mémoire nous présentons un protocole de routage dans les réseaux de radios cognitives à multi-sauts, en supposant qu'un ensemble de transmissions secondaires coexiste avec un ensemble de transmissions primaires dynamiques 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 que propose cette technologie émergente et les caractéristiques de ses composants et fonctionnalités. Par la suite, nous avons consacré la deuxième partie de ce mémoire au problème de routage dans les réseaux de radios cognitives. Nous avons commencé par introduire quelques termes spécifiques aux réseaux sans fil utilisés dans ce document. Ensuite, nous avons présenté les défis et difficultés spécifiques aux RRC qu'on trouve pas dans les réseaux sans fil traditionnels. Puis, nous avons présenté les trois environnements cognitifs qui décrivent l'état des utilisateurs primaires : statique, dynamique et opportuniste (très dynamique). Enfin, une revue de littérature a été présentée pour mieux comprendre les travaux de chercheurs qui nous ont précédés dans le domaine et les méthodes utilisées. Nous avons classé ces méthodes dans deux catégories : méthodes au fonctionnement découplé entre la couche réseau et la couche MAC et méthodes au fonctionnement couplé dans lesquelles la collecte d'information sur l'occupation du spectre est réalisée d'une manière distribuée sur une route. Dans la troisième partie, nous avons proposé un protocole de routage réactif pour les réseaux de radios cognitives à multi-sauts. Notre protocole est composé d'une métrique qui prend en considération la qualité des liens et la disponibilité du spectre ; c'est à dire les besoins en qualité de services et l'activité des utilisateurs primaires. Un mécanisme de gestion des interfaces fixes et commutables et des canaux a été introduit au protocole aussi pour gérer d'une manière efficace l'ensemble des interfaces présentes dans le réseau. Un mécanisme de récupération des liens a été développé pour palier aux coupures engendrées par la transmission des UP dans le réseau. Finalement, la dernière partie de ce mémoire décrit les paramètres de nos simulations ainsi que les résultats obtenus en appliquant notre protocole. L'évaluation des performances de notre protocole

(CR-AODV) a été faite par moyen de simulation ainsi qu'une comparaison avec le protocole MM-AODV. Nous avons montré que notre protocole réactif tenait une meilleure stabilité et donnait des résultats intéressants. Nous notons aussi que notre algorithme se distingue d'une faible complexité par rapport à d'autres méthodes proposées dans la littérature. De plus, notre solution est indépendante du nombre de nœuds dans le réseau ce qui lui donne un caractère évolutif. Nous avons pu constater aussi que notre protocole fonctionne bien dans un environnement dynamique puisqu'il améliore la gestion des déconnexions par rapport à d'autres approches.

Travaux futurs

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

- Etudier l'effet du délai de commutation lorsque l'interface permute d'un canal à l'autre. Sélectionner un nœud dont son interface commutable permute régulièrement entre les canaux peut engendrer des frais généraux sur le chemin global. Il serait donc intéressant d'ajouter le calcul des délais de commutation à la métrique de routage.
- Améliorer les diffusions réalisées lors de la coupure d'un lien. Il serait intéressant de minimiser au maximum les diffusions pour avoir des coûts de surdébit *overheads* très faibles.
- Améliorer l'algorithme proposé en introduisant de nouvelles contraintes plus pratiques tel que l'équité entre les usagers.

BIBLIOGRAPHIE

- 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.
- AKYILDIZ, I. F., WANG, X. et WANG, W. (2005). Wireless mesh networks : a survey.
- C SIVA RAM MURTHY, B. S. M. (2004). *Ad Hoc Wireless Networks : Architectures and Protocols*. Prentice Hall.
- CHENG, G., LIU, W., LI, Y. et CHENG, W. (2007a). Joint on-demand routing and spectrum assignment in cognitive radio networks. *Dans Communications, 2007. ICC '07. IEEE International Conference on*, pages 6499–6503.
- CHENG, G., LIU, W., LI, Y. et CHENG, W. (2007b). Spectrum aware on-demand routing in cognitive radio networks. *Dans New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*, pages 571–574.
- CRCN (2009). Cognitive radio cognitive network simulator. <http://stuwweb.ee.mtu.edu/~ljialian/>.
- DE COUTO, D. S. J., AGUAYO, D., BICKET, J. et MORRIS, R. (2003). A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. *Dans Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking, MobiCom '03*, pages 134–146, New York, NY, USA. ACM.
- DRAVES, R., PADHYE, J. et ZILL, B. (2004). Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks. *Dans Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking, MobiCom '04*, pages 114–128, New York, NY, USA. ACM.
- HAYKIN, S. (2005). Cognitive radio : brain-empowered wireless communications. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 23(2):201–220.

- I., P., WONG, S. et LU, S. (2008). Samer : Spectrum aware mesh routing in cognitive radio networks. *Dans New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2008. DySPAN 2008. 3rd IEEE Symposium on*, pages 1 -5.
- JOHNSON, D. B. et MALTZ, D. A. (1996). Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. *Dans Mobile Computing*, pages 153-181. Kluwer Academic Publishers.
- KESHAV, S. (1991). A control-theoretic approach to flow control.
- KHALIFE, H., AHUJA, S., MALOUCH, N. et KRUNZ, M. (2008). Probabilistic path selection in opportunistic cognitive radio networks. *Dans Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008. IEEE*, pages 1 -5.
- LAWTON, G. (2010). Cognitive radio adds intelligence to wireless technology. <http://www.computer.org/portal/web/computingnow/archive/news059>.
- MITOLA, J., I. et MAGUIRE, G.Q., J. (1999). Cognitive radio : making software radios more personal. *Personal Communications, IEEE*, 6(4):13 -18.
- MITOLA, J. (1995). The software radio architecture. *Communications Magazine, IEEE*, 33(5):26 -38.
- MM-AODV (2006). multi-channel multi-interface simulation in NS-2. <http://www.cse.msu.edu/wangbo1/ns2/nshowto8.html>.
- ns (1996). The Network Simulator NS-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- PERKINS, C. et ROYER, E. (1999). Ad-hoc on-demand distance vector routing. *Dans Mobile Computing Systems and Applications, 1999. Proceedings. WMCSA '99. Second IEEE Workshop on*, pages 90 -100.
- RICHARD ENGELMAN, Kwaku Abrokwah, . A. (2002). Report of the spectrum efficiency working group. <http://www.fcc.gov/sptf/>.
- SU, W. et GERLA, M. (1999). Ipv6 flow handoff in ad hoc wireless networks using mobility prediction. *Dans Global Telecommunications Conference, 1999. GLOBECOM '99*, volume 1A, pages 271 -275 vol.1a.

- SUDIP MISRA, Subhas Chandra Misra, I. W. (2008). *Guide to Wireless Mesh Networks*. Springer.
- 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.
- VINT (1997). Virtual Internetwork Test bed. <http://netweb.usc.edu/vint>.
- XIE, M., ZHANG, W. et WONG, K.-K. (2010). A geometric approach to improve spectrum efficiency for cognitive relay networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 9(1):268 –281.
- XIN, C., MA, L. et SHEN, C.-C. (2007). Path-centric channel assignment in cognitive radio wireless networks. *Dans Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2007. CrownCom 2007. 2nd International Conference on*, pages 313 –320.
- XIN, C., XIE, B. et SHEN, C.-C. (2005). A novel layered graph model for topology formation and routing in dynamic spectrum access networks. *Dans New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, pages 308 –317.
- ZHOU, X., LIN, L., WANG, J. et ZHANG, X. (2009). Cross-layer routing design in cognitive radio networks by colored multigraph model. *Wireless Personal Communications*, 49:123–131. 10.1007/s11277-008-9561-7.
- ZHU, G.-M., AKYILDIZ, I. et KUO, G.-S. (2008). Stod-rp : A spectrum-tree based on-demand routing protocol for multi-hop cognitive radio networks. *Dans Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008. IEEE*, pages 1 –5.