

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ALLOCATION DES RESSOURCES DANS LES RÉSEAUX À RADIOS COGNITIVES

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INFORMATIQUE

PAR
OMAR EL FERKOUSS

AVRIL 2013

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

Ce n'est pas parce que la tradition exige que cette page se trouve dans ce mémoire, mais parce que je veux que les personnes à qui s'adressent ces remerciements trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

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 travail. 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 au Maroc ainsi que ma famille au Québec pour leur encouragement et tout leur apport qui n'était pas moindre.

Je tiens aussi à remercier mes collègues au laboratoire : El Mahdi Driouch, Zakaria Elalaoui Ismaili, Mohamed Salim Ben Ayed, Mohaned Chraïti, Baghdad Benaouda, Sima Hajmohammad et Farnoosh Fathaliani, pour leurs conseils et leurs appuis tout au long du séjour que nous avons passé ensemble au laboratoire.

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

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	vii
RÉSUMÉ	xi
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I	
GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX À RADIOS COGNITIVES	5
1.1 Architecture d'un réseau à radios cognitives	6
1.1.1 Un réseau primaire	6
1.1.2 Un réseau secondaire	7
1.2 Fonctions d'un réseau à radios cognitives	7
1.2.1 Détection du spectre	8
1.2.2 partage du spectre	8
1.2.3 Mobilité du spectre	10
1.3 Défis du partage du spectre	10
1.4 Techniques de partage du spectre	11
1.4.1 Partage du spectre <i>Underlay</i> et <i>Overlay</i>	11
1.4.2 Partage du spectre centralisé et distribué	12
1.4.3 Partage du spectre coopératif et non coopératif	14
1.5 Partage du spectre dans la littérature	14
1.6 Équité dans le partage des ressources	15
CHAPITRE II	
THÉORIE DES JEUX DANS LES RÉSEAUX À RADIOS COGNITIVES	17
2.1 Théorie des jeux	17
2.2 Théorie des jeux dans les réseaux sans fil	18
2.3 Théorie des jeux dans les réseaux à radios cognitives	20
2.3.1 Approches non coopératives	21
2.3.2 Approches coopératives	23

CHAPITRE III	
MODÈLE D'ALLOCATION DES RESSOURCES ENTRE LES UTILISATEURS SECONDAIRES	27
3.1 Modèle du système	27
3.2 Fonctions d'utilité	31
3.2.1 Maximisation de la somme des débits de transmission	31
3.2.2 Maximisation de la somme des débits de transmission avec équité entre les STs	33
3.2.3 Maximisation du nombre de STs servis	34
3.3 Modèle de partage du spectre basé sur le mécanisme VCG	34
3.3.1 Application du VCG au problème de partage du spectre	34
3.3.2 Algorithme de partage du spectre	37
3.3.3 Complexité	38
3.4 Résolution du problème d'optimisation en utilisant le SQP	39
CHAPITRE IV	
RÉSULTATS DE SIMULATION	45
4.1 Paramètres de simulation	45
4.2 Évaluation de la performance	46
4.3 Évaluation de l'équité	53
CONCLUSION	55
BIBLIOGRAPHIE	57

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1 Architecture d'un CRN (Akyildiz et al., 2008)	6
1.2 Les trou du spectre (Akyildiz et al., 2008)	9
1.3 Un exemple de la technique de partage du spectre Underlay (Yan et Rawat, 2011)	12
1.4 Un exemple de la technique de partage du spectre Overlay (Yan et Rawat, 2011)	13
3.1 Un scénario du modèle du système	28
4.1 SDR quand la fonction d'utilité est MSR	46
4.2 SDR quand la fonction d'utilité est FMSR	47
4.3 SDR quand la fonction d'utilité est MNS	48
4.4 Le nombre moyen des STs servis quand la fonction d'utilité est MSR	49
4.5 Le nombre moyen des STs servis quand la fonction d'utilité est FMSR	50
4.6 Le nombre moyen des STs servis quand la fonction d'utilité est MNS	51
4.7 SDR dans le cas du FMSR pour différentes valeurs de R_{pt}	52
4.8 Nombre moyen des STs servi dans le cas du MNS pour différentes valeurs de R_{pt}	53
4.9 Indice d'équité de Jain quand la fonction d'utilité est MSR, FMSR et MNS	54

LISTE DES ACRONYMES

- CR** Cognitive Radio (Radio Cognitive)
- CRN** Cognitive Radio Network (Réseau à radios cognitives)
- PU** Primary User (Utilisateur Primaire)
- SU** Secondary User (Utilisateur Secondaire)
- PT** Primary Transmission (Transmission Primaire)
- ST** Secondary Transmission (Transmission Secondaire)
- S_{Tr}/P_{Tr}** Secondary/Primary Transmitter (Transmetteur secondaire/primaire)
- S_{Re}/P_{Re}** Secondary/Primary Receiver (Récepteur secondaire/primaire)
- SDR** Sum Data Rate (somme des débits de transmission)
- VCG** Vickrey-Clarke-Groves
- SQP** Sequential Quadratic Programming (Programmation Quadratique Séquentielle)
- MINLP** Mixed Integer Nonlinear Programmng
- KKT** Karush-Kuhn-Tucker

RÉSUMÉ

Ce mémoire présente un modèle de partage des ressources dans les réseaux à radios cognitives. Considérons un tel réseau contenant un ensemble d'utilisateurs primaires coexistant avec des utilisateurs secondaires dans les mêmes bandes spectrales en utilisant la technique de partage du spectre *underlay*. Les utilisateurs primaires utilisent les bandes spectrales sous-licences alors que les utilisateurs secondaires essaient d'utiliser les bandes inoccupées ou de coexister dans les mêmes bandes avec les utilisateurs primaires sans dégradation de la performance des transmissions primaires. Nous proposons dans ce mémoire une allocation conjointe des bandes spectrales et de la puissance de transmission pour les utilisateurs secondaires. En se basant sur le modèle VCG (Vickrey - Clarke - Groves), le problème est modélisé en utilisant la théorie des jeux pour satisfaire les exigences en terme du débit de transmission requis pour les utilisateurs primaires et secondaires. Nous considérons dans ce travail trois cas : maximisation de la somme des débits de transmission des utilisateurs secondaires (*Maximization of the Sum data Rate*, MSR), maximisation équitable de la somme des débits de transmission des utilisateurs secondaires (*Fair Maximization of the Sum data Rate*, FMSR) et maximisation du nombre de transmissions secondaires servies (*Maximization of the Number of Served secondary transmissions*, MNS). Les résultats de simulation montrent que la solution proposée maximise la somme des débits de transmission des utilisateurs secondaires dans le cas du MSR alors que le MNS maximise le nombre des utilisateurs secondaires servis. Le cas du FMSR est un compromis entre les deux cas. En outre, à l'aide de l'indice d'équité de Jain, nous montrons que le MNS offre une équité meilleure par rapport aux deux autres cas, même si tous les cas sont presque équitables à 90%.

INTRODUCTION

L'allocation des ressources dans les réseaux sans fil actuels est faite en attribuant de manière statique des bandes du spectre aux utilisateurs sous licence (appelés aussi les utilisateurs primaires) pour une utilisation à long terme (Akyildiz et al., 2006). Cependant, le spectre attribué est parfois sous-utilisé et donc de nombreuses bandes spectrales sont toujours libres. Ceci mène à des bandes spectrales inutilisées appelées aussi *trous du spectre* (Kolodzy et al., 2001; Haykin, 2005). Le problème est par conséquent pour les utilisateurs sans licence (appelés aussi les utilisateurs secondaires) qui ne sont pas encore affectés à des bandes du spectre. A cet effet, la *radio cognitive* est un nouveau paradigme qui permet une utilisation efficace des ressources du spectre. Les nœuds d'un réseau à radios cognitives détectent le spectre complètement ou partiellement inutilisé et se chargent de le partager entre les utilisateurs secondaires sans dégrader la performance des transmissions primaires.

Il existe plusieurs types de partage du spectre : (i) le partage du spectre *overlay* où les utilisateurs secondaires peuvent partager les bandes spectrales inutilisées par les utilisateurs primaires (Akyildiz et al., 2006) et (ii) le partage du spectre *underlay* qui est assuré par plusieurs mécanismes. L'idée du partage du spectre *underlay* est que les utilisateurs primaires et secondaires peuvent coexister dans les mêmes bandes spectrales. Les puissances de transmission des usagers secondaires sont cependant considérées comme un bruit pour les utilisateurs primaires. La question est donc comment trouver la meilleure affectation des utilisateurs secondaires aux mêmes bandes du spectre utilisées par les utilisateurs primaires avec un effet tolérable par ceux-ci (Akyildiz et al., 2006; Driouch et Ajib, 2012). Dans ce travail, seul le partage du spectre *underlay* sera considéré.

Ce mémoire propose un nouveau modèle de partage du spectre entre les utilisateurs secondaires basé sur le mécanisme VCG (Vickrey-Clarke-Groves) (Vickrey, 1961; Jackson,

2000). Le mécanisme VCG est utilisé pour trouver, quand elle existe, l'allocation des utilisateurs aux bandes spectrales ainsi que l'allocation des puissances de transmission pour les utilisateurs choisis tout en respectant la contrainte d'équité entre les utilisateurs secondaires. L'objectif est donc de trouver une allocation conjointe des bandes et des puissances de transmission pour les utilisateurs secondaires tout en maximisant le gain global de toutes les transmissions secondaires. Contrairement aux auteurs dans (Rajasekharan, Eriksson et Koivunen, 2011) qui proposent un modèle coopératif basé sur le mécanisme VCG dans l'*overlay*, ce travail propose un modèle non coopératif pour un partage du spectre *underlay*.

Dans ce travail, nous nous concentrons sur trois objectifs. Le premier est de maximiser la somme des débits de transmission des utilisateurs secondaires choisis pour effectuer leurs transmissions. Le deuxième objectif est de maximiser la somme des débits de transmission des usagers secondaires tout en assurant une certaine équité entre eux. Le troisième objectif est de maximiser le nombre total des usagers secondaires choisis pour effectuer leurs transmissions.

Les propositions citées dans ce document et les résultats obtenus ont fait l'objet d'un article **accepté** à la conférence *Globecom* 2012 (Ferkouss et Ajib, 2012b) ainsi qu'un article de journal **soumis** au journal *Transaction on Wireless Communication* (TWC) (Ferkouss et Ajib, 2012a).

Ce mémoire est organisé comme suit. Le chapitre 1 donne quelques généralités sur les réseaux à radios cognitives à savoir leur architecture, leurs fonctions ainsi que leurs techniques de partage du spectre utilisées. Le chapitre 2 donne par la suite la revue de littérature de l'utilisation de la théorie des jeux pour résoudre le problème de partage des ressources dans un réseau à radios cognitives. Le chapitre 3 explique en détails le modèle de partage des ressources proposé basé sur le mécanisme VCG pour les trois objectifs cités ci-dessus. Nous expliquons par la suite l'algorithme qui découle du modèle proposé ainsi que sa complexité. Le modèle étant NP-difficile, nous expliquons en détails comment la méthode SQP (*Sequential Quadratic Programming*) est utilisée pour résoudre le problème

proposé. Le chapitre 4 montre, explique et commente les résultats de simulation obtenus pour valider notre proposition. Une conclusion de ce travail ainsi que des travaux futurs sont fournis dans la dernière section.

[Cette page a été laissée intentionnellement blanche]

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX À RADIOS COGNITIVES

Les réseaux sans fils ont connu une croissance fulgurante durant les dernières décennies. Cette croissance a apporté plusieurs défis dans la gestion des ressources du réseau notamment dans la gestion du spectre. Celles-ci sont souvent allouées d'une manière statique et donc un utilisateur doit tout d'abord avoir une licence avant de l'utiliser. La réglementation du spectre est faite dans chaque pays par des agences de réglementation spécialisées de la radio, telles que CRTC (*Canadian Radio-television and Telecommunications Commission*) au Canada, le FCC (*Federal Communications Commission*) aux États-Unis et le ECC (*Electronic Communications Committee*) en Europe. Le caractère statique de cette attribution amène une utilisation inefficace des bandes allouées. Vu les ressources du spectre limitées, les réseaux ont besoin de moyens intelligents pour mieux gérer les bandes du spectre. A ce propos, le concept des radios intelligentes aussi nommé la radio cognitive (Cognitive Radio CR) (Haykin, 2005), a été introduit pour remédier au problème de l'utilisation inefficace du spectre. Le concept de la CR a été proposé en 1999 par Mitola au *Royal Institute of Technology (KTH)* (Mitola III et Maguire Jr, 1999). Le CR est la technologie clé pour offrir aux utilisateurs une bande passante plus large avec des techniques d'accès dynamique au spectre disponible.

Ce chapitre présente quelques généralités sur les réseaux à radios cognitives (Cognitive Radio Networks, CRNs), à savoir leur architecture, leurs fonctions ainsi que les défis du partage du spectre. Ensuite, les techniques utilisées pour le partage du spectre sont détaillées.

1.1 Architecture d'un réseau à radios cognitives

L'architecture d'un CRN comme le montre la figure 1.1 tirée de l'article (Akyildiz et al., 2008), est constituée d'un réseau primaire et d'un réseau secondaire. Les prochaines sections donnent plus de détails à propos de chacun de ces deux types de réseaux.

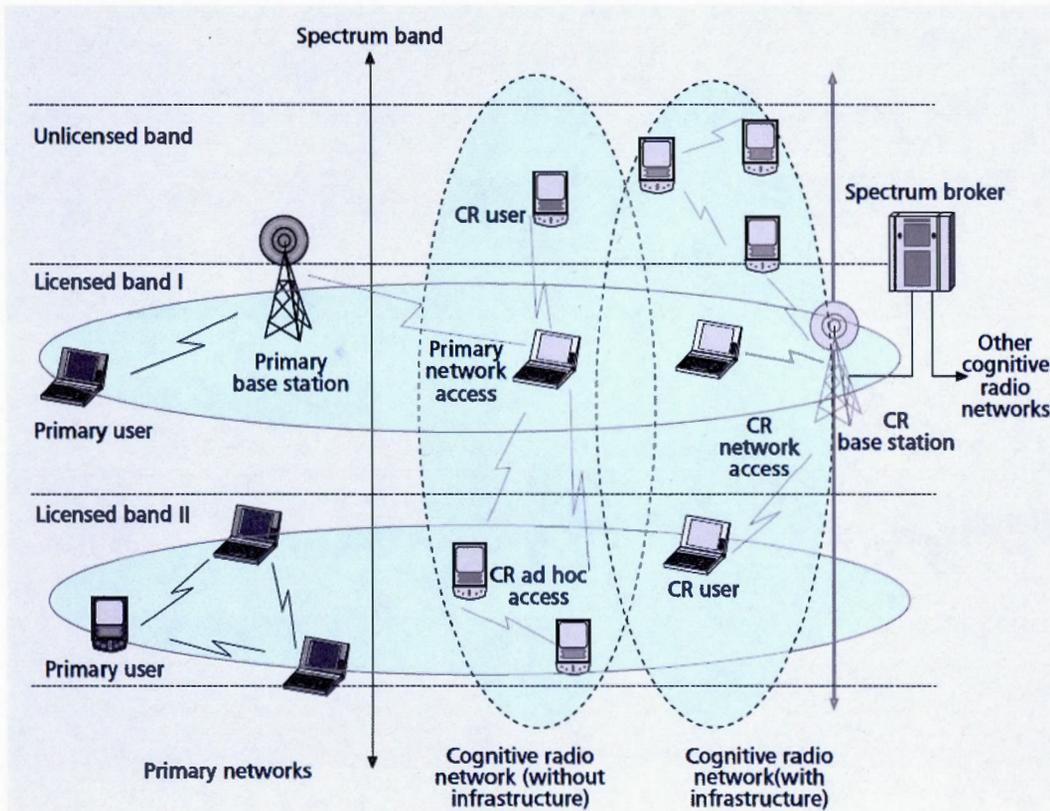


Figure 1.1 Architecture d'un CRN (Akyildiz et al., 2008)

1.1.1 Un réseau primaire

Un réseau primaire (*primary network*) est un réseau qui possède des droits d'exploitation d'une ou de plusieurs bandes de spectre. Ses utilisateurs sont appelés utilisateurs primaires (*Primary Users PUs*) et ils utilisent des bandes du spectre appelées bandes sous licence (*licensed band*) (Akyildiz et al., 2006). Les PUs ont une grande priorité pour

utiliser leurs bandes par rapport aux autres utilisateurs du réseau. Les utilisateurs qui ne sont pas dotés d'une licence peuvent utiliser les bandes sous licence et coexister avec les PUs, à condition d'interférer de manière tolérable avec les PUs (Chen et al., 2008). Des exemples de système primaires sont : les systèmes cellulaires 2G/3G, diffusion de la télévision, etc. La figure 1.1 donne un exemple d'un réseau primaire constitué d'utilisateurs primaires et des stations de base primaires (*primary base station*). Une station de base primaire est une infrastructure réseau fixe qui a une licence d'utiliser certaines bandes du spectre. Elle n'a aucune capacité de partage du spectre avec les autres utilisateurs secondaires.

1.1.2 Un réseau secondaire

Un réseau secondaire (*CR network*) est un réseau qui n'est associé à aucune bande du spectre (Akyildiz et al., 2006). Ses utilisateurs sont appelés utilisateurs secondaires (*Secondary Users SUs*). Ils peuvent soit utiliser des bandes du spectre inutilisées par les PUs (*unlicensed band*) ou bien coexister avec les PUs sans affecter leurs transmissions. La figure 1.1 donne un exemple de réseau secondaire. Il est constitué en plus d'utilisateurs secondaires, d'une station de base secondaire (*CR base station*) et d'un *spectrum broker*. Une station de base secondaire est une infrastructure réseau fixe qui permet d'interconnecter les SUs avec d'autres réseaux. Un *spectrum broker* est une entité qui joue un rôle dans la distribution des ressources du spectre entre les différents CRNs (Akyildiz et al., 2008).

1.2 Fonctions d'un réseau à radios cognitives

Les principales fonctions, décrites dans (Akyildiz et al., 2008) et (Akyildiz et al., 2006) d'un CRN sont : (i) la détection du spectre, (ii) le partage du spectre et (iii) la mobilité du spectre. Les prochaines sections vont expliquer chacune de ces fonctions.

1.2.1 Détection du spectre

La détection du spectre (en anglais *spectrum sensing*) permet au CRN de collecter les informations sur l'état d'utilisation des bandes du spectre. Le CRN doit donc détecter les bandes utilisées par les PUs et les SUs ainsi que les *trous du spectre* (en anglais *spectrum holes*) avant d'effectuer l'affectation des SUs aux bandes du spectre. En effet, concernant les bandes soumises à des licence ou non, le CRN doit détecter les informations concernant la transmission des PUs et des SUs afin d'estimer l'interférence qu'ils peuvent tolérer et s'ils peuvent coexister avec les autres utilisateurs secondaires. De plus, puisque le CRN assure un accès dynamique au spectre pour les utilisateurs secondaires, il doit aussi détecter les trous du spectre ou les bandes du spectre non utilisées pour pouvoir les utiliser dans la prochaine allocation. Les trous du spectre peuvent provenir des bandes sous licence associées aux utilisateurs primaires qui lâchent dans certain cas leurs bandes et donc le CRN pourra les affecter aux utilisateurs secondaires. Ils peuvent aussi provenir des bandes non soumises à des licences qui était utilisées par les utilisateurs secondaires dans le passé et qui les ont lâché pour utiliser des bandes plus favorables en terme de qualité de service (s'ils ont des exigences de qualité de service) ou que leur transmission est achevée.

La figure 1.2 tirée de l'article (Akyildiz et al., 2008), montre un exemple des trous du spectre (*spectrum hole*). Elle montre deux types de bandes : les bandes utilisées (*spectrum in use*) par les utilisateurs qu'ils soient primaires ou secondaires et les trous du spectre ou les bandes non utilisées (*spectrum hole*). Les bandes inutilisées peuvent être assignées à des utilisateurs secondaires dans les prochaines périodes d'allocation.

1.2.2 partage du spectre

En utilisant les informations collectées dans la phase de détection, le CRN décide sur l'allocation des bandes disponibles aux utilisateurs secondaires. En se basant sur la disponibilité du spectre, le CRN décide des utilisateurs secondaires qui vont être servis et leurs bandes associées pour répondre aux exigences des utilisateurs. Selon la technique

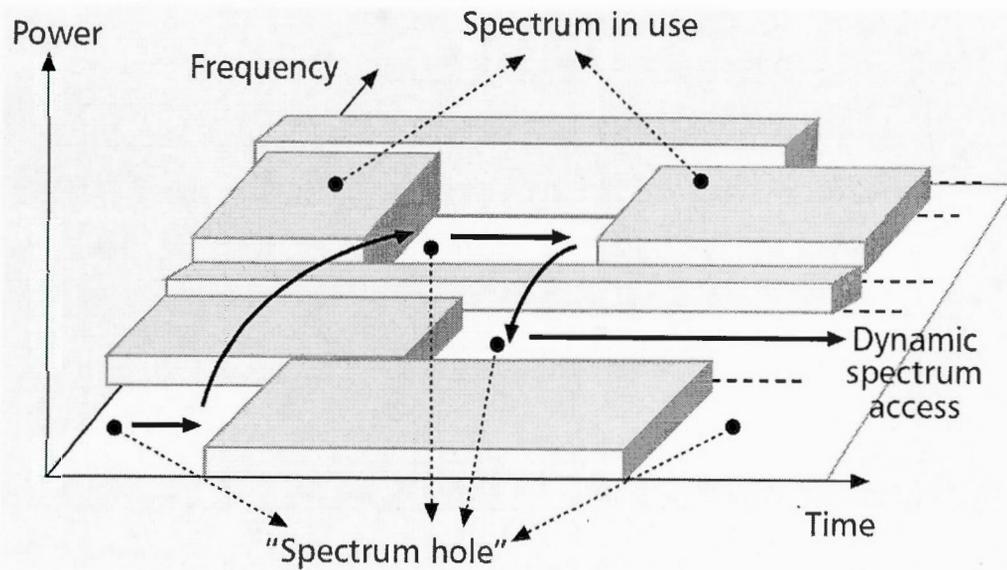


Figure 1.2 Les trous du spectre (Akyildiz et al., 2008)

de partage du spectre utilisé par le CRN, le partage peut soit inclure uniquement les trous du spectre ou aussi les bandes licenciées occupées par les utilisateurs primaires. Parfois, les utilisateurs primaires et secondaires peuvent avoir des exigences de qualité de service. D'autres fois, les utilisateurs n'ont pas d'exigence et donc ils transmettent avec le débit et la puissance possibles (*Best Effort Transmission*). La décision doit donc prendre en compte si cela existe, les exigences que les utilisateurs primaires ainsi que les utilisateurs secondaires doivent satisfaire. Les contraintes du partage sont en général des contraintes d'interférences par rapport aux utilisateurs primaires. Les exigences sont en général des exigences de qualité de service que chaque utilisateur secondaire doit satisfaire (comme un débit de transmission minimum, un taux d'erreur BER minimum, etc). Dans certain cas, la décision sur l'allocation du spectre peut dépendre en plus de la disponibilité du spectre, de certaines politiques de partage du spectre (Peha, 1998).

1.2.3 Mobilité du spectre

La mobilité du spectre est une fonction importante dans un CRN. Elle sert à assurer la transition d'un utilisateur d'une bande à une autre. Il y a plusieurs façons pour provoquer cette transition. En effet, il faut savoir que les utilisateurs secondaires sont vus comme des visiteurs du spectre. Si un utilisateur primaire, qui avait arrêté sa transmission pour un moment, décide de reprendre sa bande, le CRN doit assurer le déplacement de l'utilisateur secondaire vers une autre portion du spectre. Aussi, la transition peut être faite lorsqu'on trouve une meilleure bande du spectre pour les utilisateurs secondaires. Ils peuvent ainsi changer de bande et continuer leurs transmissions.

1.3 Défis du partage du spectre

Parmi les défis d'un CRN, on retrouve l'allocation des ressources entre les utilisateurs. Les ressources sont les bandes du spectre et la puissance de transmission. La question est comment allouer de manière optimale les bandes spectrales et faire le contrôle de la puissance de transmission pour les utilisateurs secondaires ?

On distingue deux types de bandes spectrales : bandes soumises à des licences associées aux PUs et bandes qui ne sont pas soumises à des licences et qui ne sont pas occupées par les PUs. Les SUs peuvent soit utiliser uniquement des bandes non soumises à des licences (cette technique est appelée *overlay*) ou bien coexister avec les PUs dans leurs bandes (cette technique est appelée *underlay*) (Akyildiz et al., 2008). Dans ce travail, on va se focaliser uniquement sur un CRN où les PUs et les SUs peuvent coexister dans les mêmes bandes.

Comme cela a déjà été expliqué, le réseau primaire a un droit exclusif pour utiliser les bandes licenciées qui lui sont associées. Cependant, un PU peut partager sa bande avec les utilisateurs secondaires qui ne nuiront pas à sa transmission. Par conséquent, le concepteur du CRN doit prendre en considération l'interférence engendrée par les utilisateurs secondaires avant de leur assigner une ou plusieurs bandes spectrales. Il est à noter

que dans certains cas, les bandes du spectre sont sous-utilisées et que plusieurs utilisateurs secondaires peuvent utiliser la même bande. Dans ce cas, on distingue deux types d'interférences : (i) interférence secondaire-primaire qui est l'interférence engendré par chacun des SUs aux PUs et (ii) interférence secondaire-secondaire qui est l'interférence entre les utilisateurs secondaires. D'un autre côté, lors de l'affectation des utilisateurs secondaires aux bandes spectrales, le CRN doit prendre en considération, si cela existe, la qualité de service requise par les utilisateurs primaires et secondaires.

1.4 Techniques de partage du spectre

(Feizresan et Omid, 2009) présente trois types de classification des technique de partage du spectre. La première catégorie est basée sur la technologie d'accès. Dans cette catégorie, on distingue deux techniques essentielles : (i) la technique de partage du spectre *underlay* et (ii) la technique de partage du spectre *overlay*. La deuxième catégorie est basée sur l'architecture du CRN et donc les deux technique sont : (i) le partage du spectre centralisé et (ii) le partage du spectre distribué. Finalement, la dernière catégorie est basée sur le comportement de l'accès au spectre. Celui-ci peut être soit : (i) un partage du spectre coopératif ou bien (ii) un partage du spectre non coopératif. Les sections qui suivent vont expliquer chacune des catégories.

1.4.1 Partage du spectre *Underlay* et *Overlay*

L'idée de la technique de partage du spectre *underlay* est que les utilisateurs primaires et secondaires peuvent coexister dans les mêmes bandes du spectre. Les puissances de transmission des utilisateurs secondaires sont vues comme un bruit par les récepteurs primaires. Leurs transmissions ne doivent pas nuire à celle des utilisateurs primaires. L'interférence engendrée par la présence des utilisateurs secondaires doit être tolérable par les utilisateurs primaires (World et al., 2005). Cette technique est assurée par plusieurs mécanismes. Parmi ces mécanismes, on retrouve le mécanisme de l'étalement du spectre (en anglais *spectrum spreading*). Ce mécanisme a été développé pour les réseaux cellulaires (Ianculescu et Mudra, 2005). La figure 1.3, tirée de l'article (Yan

et Rawat, 2011), montre un exemple de la technique de partage du spectre *underlay*. Elle montre la densité spectrale de puissance (*power spectral density*) en fonction de la fréquence (*Frequency*) pour les utilisateurs primaires (*licensed primary user*) et les utilisateurs secondaires (*unlicensed secondary user*).

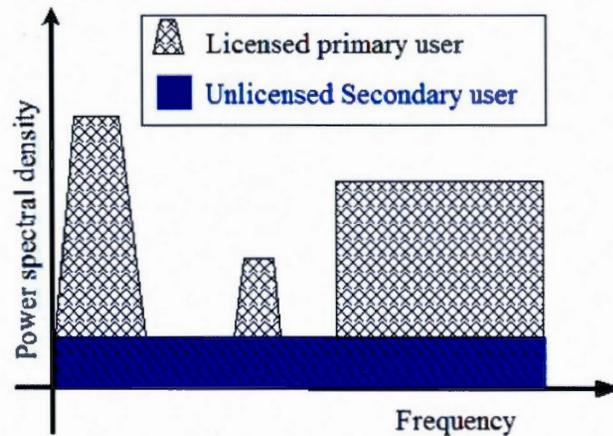


Figure 1.3 Un exemple de la technique de partage du spectre Underlay (Yan et Rawat, 2011)

D'un autre côté, la technique de partage du spectre *overlay* utilise uniquement les bandes non soumises à des licences, inutilisées par les utilisateurs primaires. Le CRN détecte donc les trous du spectre, et les partage entre les utilisateurs secondaires qui veulent effectuer leurs transmissions. Cependant, si un utilisateur primaire lâche la bande qu'il utilise, cette dernière pourra être utilisée par les utilisateurs secondaires à condition de libérer la bande lorsque l'utilisateur primaire reprend sa transmission. La technique de partage du spectre *overlay* est décrite dans la figure 1.4 (Yan et Rawat, 2011).

1.4.2 Partage du spectre centralisé et distribué

Les techniques de partage du spectre peuvent être classifiées selon l'architecture en deux catégories : centralisé et distribué. En effet, un partage du spectre centralisé est basé sur une entité centralisée qui effectue l'opération de contrôle et de partage du spectre entre les

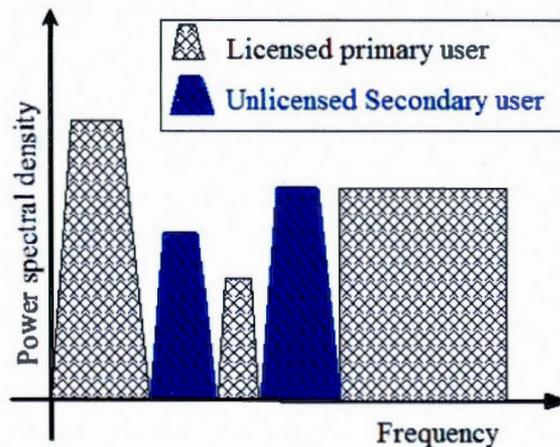


Figure 1.4 Un exemple de la technique de partage du spectre Overlay (Yan et Rawat, 2011)

utilisateurs. Cette entité centralisée (appelée dans certain cas *Fusion center* ou *spectrum broker*) procède à la détection du spectre et à la collection des informations concernant chaque entité du CRN. En se basant sur ces mesures, elle décide de l'allocation des ressources en affectant les utilisateurs secondaires aux bandes spectrales et en partageant, le cas échéant, la puissance disponible.

D'un autre côté, le partage du spectre distribué exige que chaque nœud du CRN est responsable de sa propre allocation. En général, les solutions distribuées ont besoin d'un minimum de coopération entre les différents nœuds du CRN afin de minimiser les communications de contrôle ou la charge (*overhead*) entre eux. Chaque nœud se base sur certaines politiques locales du nœud avant de décider de son allocation. De plus, il se base aussi sur des politiques globales du CRN (par exemple synchroniser l'accès aux bandes spectrales) et des informations sur les nœuds voisins pour décider de son allocation.

1.4.3 Partage du spectre coopératif et non coopératif

L'idée du partage du spectre coopératif se base sur la coopération des nœuds entre eux afin de décider sur l'allocation du spectre qui leur convient. Par exemple, les nœuds du CRN peuvent former des sous-groupes ou des coalitions pour pouvoir maximiser leurs profits. Cette technique prend en compte la communication entre les nœuds du CRN. Ceci veut dire que l'interférence mesurée à chaque nœud est diffusée aux autres nœuds du CRN. À noter que les coalitions peuvent être statiques (les mêmes nœuds gardent les mêmes coalitions) ou dynamiques (les coalitions changent dans le temps dépendamment des conditions de transmissions de chaque utilisateur).

Dans le partage du spectre non coopératif appelé aussi égoïste (en anglais *selfish*), on considère chaque utilisateur individuellement au lieu d'un groupe d'utilisateurs. Contrairement à la solution coopérative, chaque utilisateur tente d'utiliser le spectre en voulant maximiser son profit ou son utilisation du spectre (par exemple, maximiser son débit de transmission). L'entité qui s'occupe du partage du spectre décide par la suite des utilisateurs qui vont être servis.

1.5 Partage du spectre dans la littérature

Le problème de l'allocation des ressources (allocation des bandes spectrales ou de la puissance de transmission) dans les réseaux à radios cognitives a été traité dans la littérature en utilisant plusieurs modèles théoriques. En effet, la théorie des jeux a constitué récemment un outil très populaire pour développer des algorithmes de partage des ressources. Le chapitre 2 donne plus de détails à propos de l'utilisation de la théorie des jeux dans le partage des ressources. Le problème de partage du spectre a été modélisé et résolu en utilisant la théorie d'optimisation comme dans (Zhang et Leung, 2009; Pei-Pei et al., 2010), la théorie des graphes comme dans (Driouch et Ajib, 2009; Chen, Zhang et Niu, 2009), etc. Aussi, on retrouve une multitude de travaux qui ont proposé des heuristiques ou des méta-heuristiques capables d'assurer des performances quasi optimales pour résoudre le problème d'allocation des ressources (Mitran et al., 2008; Zhang et

Leung, 2009).

1.6 Équité dans le partage des ressources

L'équité entre les utilisateurs est un point très important dans une allocation des ressources. Le résultat du jeu ne doit pas toujours favoriser certains utilisateurs par rapport aux autres même si leurs conditions de transmission sont meilleurs. Le jeu doit donc établir un compromis entre l'efficacité et l'équité pour décider sur l'allocation des ressources entre les utilisateurs. Souvent, l'équité est introduite dans le calcul de l'utilité globale du système. Il existe plusieurs façon d'assurer l'équité entre les utilisateurs : max-min (Tang, Wang et Chen, 2010), équité proportionnelle ou logarithmique (Tang, Misra et Xue, 2008), *round robin* (Hahne, 1991), etc. Il est important de noter que l'équité peut être assurée par deux façon : (i) équité à court terme entre les utilisateurs sur une même période d'allocation et (ii) équité à long terme qui est évaluée après plusieurs périodes d'allocation.

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer l'équité d'une allocation de ressources. Dans ce travail, on va se focaliser sur l'indice de *Jain* (Jain, Chiu et Hawe, 1984). Il est défini par la relation suivante :

$$Index = \frac{(\sum_{i=1}^N y_i)^2}{N * \sum_{i=1}^N y_i^2} \quad (1.1)$$

où y_i représente le débit de la i^{eme} transmission.

L'indice de Jain est populaire et utilisé pour évaluer l'équité d'une allocation de ressources (Lan et al., 2010). En effet, c'est un indice continue (contrairement à l'indice Min-Max) situé entre 0 et 1 (en se basant sur l'équation 1.1) qui peut s'appliquer à n'importe quel nombre d'utilisateurs. Aussi, la mesure qu'il apporte a une relation directe avec la perception des utilisateurs (Jain, Durresi et Babic, 1999). Un indice plus grand veut dire qu'il y a une grande équité entre les utilisateurs et vice versa.

Puisque l'indice de Jain est situé entre 0 et 1, l'indice de Jain va être utilisé dans tout ce qui suit en pourcentage. Par exemple, un indice de Jain d'une allocation est égale à 0.5 va être interprété comme une allocation équitable à 50%.

L'équité dans l'allocation des ressources a été déjà traitée en utilisant l'indice de Jain. En effet, les auteurs de l'article (Yang, Li et Tian, 2010) proposent un algorithme de contrôle de puissance efficace et équitable entre les utilisateurs secondaires. Le problème a été modélisé comme un jeu coopératif de négociation (Nash bargaining power control game). Ils ont montré par une étude analytique que le résultat du jeu assure l'équité entre les utilisateurs secondaires. Ils ont aussi évalué l'équité par des résultats numériques en utilisant l'indice de Jain. Un travail similaire est présenté par les auteurs dans (Akter et Natarajan, 2010). Ils ont proposé une solution efficace et équitable pour le problème de contrôle de puissance pour les utilisateurs secondaires. De plus, leur approche pour assurer l'équité est de prendre en compte l'historique des allocations. Plus précisément, l'expérience d'un utilisateur dans le temps est quantifiée en introduisant des poids dynamiques d'équité pour chaque utilisateur secondaire. La dynamique des poids est ensuite modélisée en utilisant un modèle appelé *Homo Equalis society model* (Gintis, 2000) (c'est un modèle inspiré du modèle des êtres humains dans la société). L'indice de Jain a montré que leur proposition atteint des résultats satisfaisants en terme d'équité (la proposition est équitable à 96%).

CHAPITRE II

THÉORIE DES JEUX DANS LES RÉSEAUX À RADIOS COGNITIVES

Ce chapitre présente l'état de l'art de l'application de la théorie des jeux dans les réseaux à radios cognitives. Il présente les principales approches de la théorie des jeux à savoir les jeux coopératifs et les jeux non coopératifs. Dans chaque approche, nous allons présenter les méthodes les plus utilisées dans la littérature. Ce chapitre est organisé comme suit. Il commence par une brève introduction sur la théorie des jeux. Il présente ensuite une vue d'ensemble de l'utilisation de la théorie des jeux dans les réseaux sans fil suivie par l'application de la théorie des jeux dans les réseaux à radios cognitives. Après, les deux approches de la théorie des jeux : approches coopératives et approches non coopératives seront présentées. Le chapitre est conclu par une discussion qui porte sur l'équité dans l'allocation des ressources.

2.1 Théorie des jeux

La théorie des jeux est une branche connue et utilisée des mathématiques appliquées. Elle est utilisée dans plusieurs domaines, notamment les sciences appliquées et les sciences sociales. On retrouve plusieurs exemples d'applications de la théorie des jeux en économie, en sciences politiques, en biologie, en informatique, en philosophie, en télécommunication, etc. L'évolution de la théorie des jeux dans l'histoire est basée sur les principaux travaux suivants (Han et al., 2011) :

– *Mathematical Principles of the Theory of Wealth* écrit par Augustin Cournot en 1838.

Il introduit une explication intuitive de la solution connue sous le nom de l'équilibre de Nash (en anglais *Nash equilibrium*) que John Nash développera par la suite.

- *Mathematical Physics* écrit par Francis Ysidro Edgeworth en 1881. Il a démontré la notion d'un équilibre concurrentiel entre deux personnes dans une économie à deux membres (ou aussi à deux types différents).
- *Algèbre et Calcul des Probabilités* (Comptes rendus de l'Académie des Sciences, volume 184, 1927) écrit par Emile Borel. Celui-ci a introduit pour la première fois la notion des stratégies mixtes pour arriver à une solution ou un résultat stable dans un jeu.
- *Theory of Games and Economic Behavior* écrit par John Von Neumann et Oskar Morgenstern en 1944. Ce livre constitue la première analyse moderne de la théorie des jeux utilisée à nos jours. Von Neumann et Morgenstern se sont basés sur le travail de John Nash dans les jeux non-coopératifs et les jeux de la négociation, pour fournir un cadre méthodologique pour les modélisations basées sur la théorie des jeux.

En se basant sur les travaux de John Nash, Von Neumann et Morgenstern, la théorie des jeux a connu un développement scientifique et une croissance énorme que ça soit dans les formalisations théoriques ou dans son application dans différents domaines. A ce propos, trois prix Nobels ont été attribués dans les sciences économiques sur des travaux basés sur la théorie des jeux (Han et al., 2011). Le premier a été offert en 1994 à John Harsanyi, John Nash et Reinhard Selten pour leur analyse pionnière des équilibres dans les jeux non coopératifs. Le deuxième a été donné à Robert Aumann et Thomas Schelling en 2005 pour leur analyse qui a amélioré la compréhension des conflits et de la coopération dans la théorie des jeux. Le troisième a été donné en 2007 à Leonid Hurwicz, Eric Maskin et Roger Myerson qui ont bâti les fondements de la conception des mécanismes basée sur la théorie des jeux.

2.2 Théorie des jeux dans les réseaux sans fil

Les réseaux sans fil ont connu récemment une explosion dans la demande ainsi que dans les technologies utilisées. Aujourd'hui, ces réseaux doivent répondre aux demandes croissantes des utilisateurs tout en maintenant un niveau de performance élevé, une

communication omniprésente et une utilisation optimale des ressources du réseau. Ceci exige le développement d'un modèle analytique pour modéliser et résoudre les défis rencontrés. A ce propos, la théorie des jeux est considérée ces dernières années comme un outil efficace pour concevoir les réseaux sans fil du futur. Cela permettra de combiner des règles décisionnelles avec les différentes techniques et formalisations de la théorie des jeux dans la nouvelle génération des réseaux sans fil. L'utilisation de la théorie des jeux permet un fonctionnement plus efficace des nœuds du réseaux sans fil et permet à chaque utilisateur du réseau de répondre à ses besoins (Han et al., 2011).

Parmi les exemple les plus populaires de l'application de la théorie des jeux pour concevoir la nouvelle génération des réseaux sans fil, on retrouve la modélisation du problème du contrôle de puissance dans les réseaux cellulaires. Dans une liaison montante (i.e. Uplink) par exemple, le défi était de concevoir un mécanisme qui permet à des équipements qui utilisent la même fréquence (comme dans un système CDMA), de réguler ou de contrôler leurs puissances de transmission, en tenant compte de l'interférence qu'ils provoquent dans le réseau. Ce problème a été modélisé comme un jeu non coopératif. En effet, dans un tel type de jeu qui comporte un nombre donné de joueurs, chaque joueur choisi une façon de jouer ou une stratégie de jeu. Celle-ci a un impact soit positif ou négatif sur l'utilité (c-à-d la mesure de son gain dans le jeu) des autres utilisateurs. En résumé, le problème de contrôle de puissance est modélisé comme un jeu non coopératif, où la puissance de transmission (stratégie de jeu) d'un utilisateur (joueur) a un impact (à cause de l'interférence engendrée) sur le débit de transmission et la qualité de service (utilité) des autres utilisateurs. Un exemple de solution de ce problème est de résoudre le jeu non coopératif décrit précédemment pour retrouver l'équilibre de Nash (Han et al., 2011).

En général, la modélisation d'un jeu comporte :

- Un nombre fini de joueurs.
- Un ensemble d'actions (ou stratégies) que chaque joueur peut prendre.
- Une fonction d'utilité qui mesure le gain (ou la perte) d'un joueur dans le jeu.

Les interactions entre les joueurs sont modélisées comme un jeu, dans lequel chaque

joueur choisit une stratégie de jeu ou bien une seule stratégie est imposée à tous les joueurs, afin d'améliorer le bénéfice des joueurs.

2.3 Théorie des jeux dans les réseaux à radios cognitives

Les auteurs de l'article (Wang, Wu et Liu, 2010) présentent une vue d'ensemble de l'application de la théorie des jeux dans les réseaux à radios cognitives. En général, quand on parle de l'allocation des ressources dans les CRNs, il s'agit soit de l'allocation de la puissance de transmission des utilisateurs ou de l'affectation des utilisateurs secondaires aux bandes du spectre. Le problème de l'allocation des ressources est donc modéliser comme un jeu où :

- Les joueurs sont les utilisateurs secondaires.
- Les stratégies de jeu sont les puissances de transmission ou les bandes du spectre.
- L'utilité de chaque joueur est sa performance ou sa qualité de service (par exemple : un débit de transmission requis).

Il est important à noter que dans certains cas, les utilisateurs primaires peuvent être considérés comme des joueurs dans le jeu. Cela est souvent utilisé dans le problème de contrôle de puissance comme c'est le cas dans (Attar, Nakhai et Aghvami, 2009).

L'objectif de l'utilisation de la théorie des jeux dans les réseaux à radios cognitives est de proposer une allocation des ressources (allocation des bandes du spectre ou de puissance) *efficace* (ou optimale) et *équitable*. Une allocation des ressources est dite efficace (ou aussi qu'il est un optimum selon Pareto) si on ne peut pas améliorer les performances d'un système sans dégrader les performances des autres systèmes impliqués dans le jeu (Etkin, Parekh et Tse, 2007). D'un autre côté, l'équité est un point très important pour mesurer la performance de l'allocation des ressources. Elle est en général introduite dans l'utilité de chaque participant au jeu. La section 1.6 donne plus de détails sur l'équité dans l'allocation des ressources dans les réseaux à radios cognitives.

Il existe plusieurs types de jeu. Dans ce travail, on va se focaliser sur deux types : coopératif et non coopératif. Un jeu coopératif est un jeu dans lequel les joueurs essaient

de coopérer afin de maximiser leurs gains dans le jeu. Cependant, un jeu non coopératif est un jeu où chaque joueur essaye de maximiser son utilité individuellement sans considération des autres. Les prochaines sections présentent des travaux de la littérature sur l'allocation des ressources pour les réseaux à radios cognitives basés sur la théorie des jeux.

2.3.1 Approches non coopératives

Dans un jeu non coopératif, les joueurs sont égoïstes c'est-à-dire que chacun choisit une stratégie du jeu qui maximise son utilité. Dans la plupart des solutions des jeux non coopératifs, on utilise la notion de l'équilibre de Nash pour quantifier le résultat du jeu. L'équilibre de Nash est le concept clé pour comprendre les jeux non coopératifs. Étant donné un jeu qui comporte deux ou plusieurs joueurs où chacun choisit sa stratégie, le jeu atteint l'équilibre de Nash lorsque chaque joueur choisit la meilleure stratégie en prenant en compte les décisions des autres. L'équilibre de Nash est donc défini par un profil de stratégies associées aux joueurs, où chacun ne peut pas choisir une meilleure stratégie pour améliorer son utilité. Mathématiquement, l'équilibre de Nash peut être formalisé comme suit : étant donné un nombre de joueurs N , chacun peut choisir une stratégie s_n parmi les stratégies possibles et chacun a une utilité u_n , l'équilibre de Nash donne le profil des stratégies s^* pour tous les joueurs, qui arrive à satisfaire pour chaque joueur n , l'équation suivante :

$$u_n(s_n^*, s_{-n}^*) \geq u_n(s_n, s_{-n}^*) \quad (2.1)$$

où s_{-n} représente les stratégies de tous les joueurs sauf le joueur n .

Il est important de noter que l'équilibre de Nash donne juste le résultat du jeu et non comment y arriver. C'est juste une façon pour quantifier le résultat du jeu et s'assurer que chaque joueur a bien choisi la stratégie qui lui convient pour maximiser ses bénéfices du jeu. Cependant, c'est au concepteur du jeu de savoir comment atteindre l'équilibre de Nash. En général, le jeu est formalisé comme un problème d'optimisation, linéaire

ou non linéaire dépendamment du modèle du système. Ce genre de problème est en général complexe à résoudre. En pratique, les chercheurs et les ingénieurs proposent des algorithmes exacts ou des heuristiques capable d'atteindre l'équilibre de Nash.

Le problème de l'ordonnancement des utilisateurs aux bandes du spectre a été traité par les auteurs de l'article (Felegyhazi et al., 2007). En effet, ils ont traité le problème de l'allocation des bandes du spectre des nœuds qui utilisent des radios multiples. Le problème de l'allocation du spectre est modélisé comme un jeu non coopératif où chaque utilisateur à radio multiples essaye d'utiliser les bandes disponibles du spectre. Les auteurs concluent que le jeu atteint l'équilibre de Nash avec équilibrage de charge (load balancing) par rapport aux bandes existantes. Chaque utilisateur essaye de distribuer ses radios sur les bandes disponibles afin d'atteindre l'équilibre de Nash. De ce résultat, les auteurs ont proposé trois algorithmes de partage des bandes du spectre efficaces, capable de faire l'équilibrage de charge entre les bandes du spectre et capables aussi d'atteindre l'équilibre de Nash. Chaque algorithme utilise des informations différentes. Le premier est un algorithme centralisé qui a besoin des informations parfaites du système pour décider sur l'allocation optimale. Le second par contre est un algorithme distribué qui se base sur les informations parfaites du système. Le troisième est un algorithme distribué qui peut utiliser des informations imparfaites du système.

Le problème de contrôle de puissance a été déjà traité par les auteurs de l'article (Etkin, Parekh et Tse, 2007). Ils ont modélisé le problème de partage des bandes non licenciées entre différents utilisateurs comme un jeu non coopératif. En utilisant des méthodes analytiques, ils ont conclu qu'une allocation efficace peut être appliquée en utilisant des stratégies de pénalité. Ceci est atteint par le biais des jeux répétitifs. Ils ont utilisé l'équilibre de Nash ainsi que l'optimalité selon Pareto pour prouver l'optimalité de la solution. La fonction d'utilité utilisée est le débit de transmission et la solution consiste en une allocation de puissance. Leurs résultats ont montré que les débits obtenus avec les stratégies de pénalités sont les meilleurs que l'on peut espérer dans un jeu non coopératif. Dans ce cas, la perte des performances due à la non coopération des utilisateurs est très faible.

2.3.2 Approches coopératives

La deuxième catégorie des jeux est les jeux coopératifs. Dans cette section, on va se focaliser sur deux types de jeux coopératifs (Wang, Wu et Liu, 2010) : (i) les jeux de négociation et (ii) les jeux de coalitions.

Les jeux de négociation

Un jeu de négociation est un jeu où chaque joueur a la possibilité d'établir un accord bénéfique avec les autres joueurs pour améliorer son profit (Wang, Wu et Liu, 2010). Dans ce type de jeux, les joueurs ont des conflits d'intérêts entre eux, d'où la nécessité d'établir un compromis entre eux. Cependant, aucun accord ne peut être imposé à un joueur sans son approbation. Les joueurs doivent ainsi arriver à trouver des compromis entre eux afin de maximiser leurs utilités. Ces compromis peuvent être aussi vu comme des coalitions entre les joueurs.

La solution la plus connue pour ce genre de jeux est appelé NBS (*Nash bargaining solution*). Le NBS peut être modélisé comme suit. Nous considérons un ensemble de joueurs N , et chacun a une utilité u_n . Nous notons u_n^0 l'utilité du joueur n lorsqu'il n'arrive pas à trouver un accord avec les autres joueurs. La solution, dite NBS, est donnée par :

$$\arg \max_{u_1, \dots, u_N, u_n > u_n^0} \prod_{n=1}^N (u_n - u_n^0) \quad (2.2)$$

Les jeux de négociation ont été déjà utilisés pour traiter le problème de l'allocation des ressources dans les réseaux à radios cognitives. En effet, les auteurs dans (Attar, Nakhai et Aghvami, 2009) proposent une allocation de puissance pour les utilisateurs primaires et secondaires. Ils ont modélisé le problème du contrôle de puissance comme un jeu coopératif entre les utilisateurs primaires et secondaires pour satisfaire la qualité de service des utilisateurs exprimée en terme du débit de transmission. Les utilisateurs primaires et secondaires sont responsables d'informer sur l'état du canal et leurs limitations en terme

de puissance afin de calculer l'allocation optimale des canaux ainsi que l'allocation optimale de la puissance de transmission pour chaque utilisateur. Le NBS est ensuite utilisé pour proposer la stratégie de l'allocation des ressources pour les utilisateurs. Le NBS permet de maximiser le débit de transmission de tous les utilisateurs et d'économiser de manière considérable la puissance de transmission.

Le NBS a été aussi utilisé par les auteurs dans (Xu et Li, 2010). En effet, ils ont conçu une nouvelle structure flexible pour établir la coopération entre les utilisateurs secondaires. Elle permet aux utilisateurs secondaires de maximiser leurs performances en optimisant l'utilisation des bandes sous licences. La solution du modèle est donnée en utilisant le NBS qui donne une allocation des ressources optimale entre les utilisateurs secondaires. Ils ont proposé un algorithme optimal et distribué ainsi qu'une heuristique efficace et centralisée capable d'arriver à des performances quasi optimales.

Les jeux de coalition

Dans les jeux de coalition, les joueurs tentent de coopérer en formant des coalitions ou des sous-groupes afin d'améliorer leurs gains dans le jeu. Chaque coalition sera vu par la suite comme une seule entité dans le jeu. Le résultat du jeu permettra à chaque coalition de recevoir un gain. Ce gain représente le bénéfice de la coalition qui devra pas la suite le distribuer sur chacun des joueurs.

L'application des jeux de coalition dans les réseaux à radios cognitives est très bénéfique. En effet, grâce aux avantages qu'elle peut tirer de la diversité spatiale et la diversité multi-usagers, la coopération aide à l'amélioration des performances du réseau. Les auteurs de l'article (Mathur, Sankaranarayanan et Mandayam, 2006) ont étudié la formation des coalitions dans un système contenant des bandes à interférence gaussienne. Grâce à la coopération des récepteurs, ils ont modélisé le système comme un jeu de coalition capable de maximiser le débit de transmission des utilisateurs. Ils ont montré que la grande coalition (la coalition qui comporte tous les liens transmetteur-récepteur) est stable et est capable de maximiser l'utilisation du spectre ainsi que le débit des utiliza-

teurs. Ceci veut dire qu'on ne peut pas former une autre coalition capable de donner de meilleurs performances. Cependant, pour pouvoir allouer le débit à chaque utilisateur de la coalition, les auteurs ont modélisé chaque coalition en utilisant un jeu de négociation. La solution de ce problème a été trouvée en utilisant le NBS.

Les auteurs de l'article (Rajasekharan, Eriksson et Koivunen, 2011) ont modélisé le problème de l'allocation des bandes du spectre dans l'*overlay* en utilisant les jeux de coalition. Les utilisateurs secondaires détectent les bandes non utilisées par les utilisateurs primaires, et essaient de former des coalitions entre eux pour décider sur l'allocation des bandes du spectre. L'utilité de chaque utilisateur est calculée en se basant sur la probabilité de détection des utilisateurs primaires lors de la phase de détection. De plus, ils ont utilisé le mécanisme VCG (Vickrey-Clarke-Groves) (Makowski et Ostroy, 1987) pour trouver l'allocation optimale entre les utilisateurs. L'idée du mécanisme VCG est la suivante : étant donné un ensemble de biens et un ensemble d'enchérisseurs, le VCG détermine la décision sociale qui alloue d'une manière optimale les biens aux enchérisseurs qui proposent les meilleures offres. Ayant trouvé l'allocation optimale, le VCG calcule combien chaque enchérisseur paye pour avoir le bien qui lui a été donné. Ainsi, la décision sociale est optimale lorsque chaque enchérisseur fait une soumission véridique (*bid truthfully*), c'est-à-dire la valeur de l'offre est égale à la valeur du paiement.

[Cette page a été laissée intentionnellement blanche]

CHAPITRE III

MODÈLE D'ALLOCATION DES RESSOURCES ENTRE LES UTILISATEURS SECONDAIRES

Ce chapitre explique la solution que nous proposons au problème de partage du spectre entre les utilisateurs secondaires. Le problème de partage des ressources est modélisé comme un jeu en se basant sur le mécanisme VCG. La suite du chapitre est organisée comme suit. Il commence par expliquer en détails le modèle du système ainsi que les hypothèses du modèle proposé. Ensuite, il donne les trois types de la fonction d'utilité pour atteindre chacun des objectifs du modèle proposé. Le modèle de partage du spectre basé sur le mécanisme VCG sera par la suite expliqué en détails. Après, le problème proposé étant NP-difficile (Boyd et Vandenberghe, 2004), la méthode SQP (*Sequential Quadratic Programming*) utilisée pour résoudre le problème proposé sera détaillée.

3.1 Modèle du système

Soit un réseau à radios cognitives qui contient un ensemble de transmissions primaires et secondaires. Le spectre est divisé en un ensemble de bandes. Les transmissions secondaires vont donc essayer de coexister avec les transmissions primaires avec un effet tolérable sur la qualité requise par les transmissions primaires (technique de partage du spectre *underlay*). Soient aussi C le nombre des bandes spectrales disponibles, N le nombre des transmissions secondaires (*secondary transmissions* STs) et M le nombre des transmissions primaires (*primary transmissions* PTs). La n^e transmission secondaire ST_n est composée d'un transmetteur secondaire STr_n et d'un récepteur secondaire SRe_n .

De même, la m^e transmission primaire PT_m est composée d'un transmetteur primaire PTr_m et d'un récepteur primaire PRe_m . Chaque PT utilise une seule bande parmi les C bandes disponibles. Chaque ST choisi pour effectuer sa transmission utilise une seule bande. Nous supposons aussi que les transmissions primaires sur chaque bande sont indépendantes et donc chaque PT doit tenir compte de l'interférence des STs qui utilisent la même bande et non des PTs qui utilisent des bandes différentes. Dans ce travail, le gain dans chaque bande est géré par une distribution aléatoire exponentielle assumant l'évanouissement de Rayleigh.

La figure 3.1 donne un scénario d'un CRN qui contient une transmission primaire et deux transmissions secondaires. Le scénario donne un exemple d'une seule bande utilisée par un seul PT et deux STs. Comme la figure le montre, chaque ST ou PT doit tenir compte de l'interférence à la réception des autres transmissions.

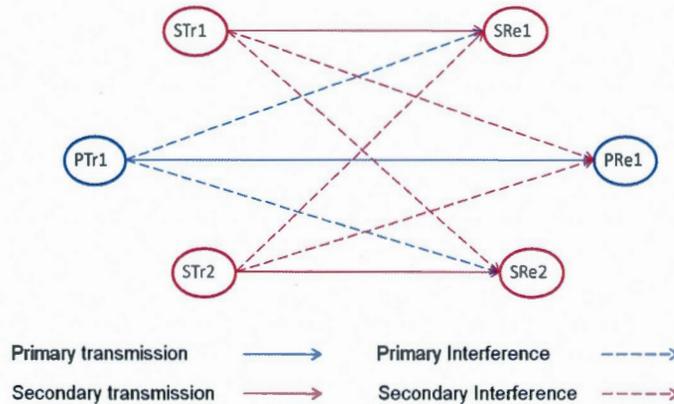


Figure 3.1 Un scénario du modèle du système

Pour chaque ST_n , $\forall n \in [1, N]$, et une bande c , $\forall c \in [1, C]$, soit la variable $x_{n,c}$ définie comme suit :

$$x_{n,c} = \begin{cases} 1 & \text{si } ST_n \text{ utilise la bande } c \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

La variable $x_{n,c}$ désigne l'allocation ou l'affectation de la transmission secondaire ST_n à

la bande c .

Pour chaque ST_n , $\forall n \in [1, N]$, soit la fonction d'utilité u_n qui représente le profit que ST_n veut maximiser. Le calcul de la fonction d'utilité est décrit en détail dans la section 3.2.

L'utilité globale de tous les utilisateurs est définie comme suit :

$$u_{tot}(\mathbf{X}) = \sum_{n=1}^N u_n(\mathbf{X}) \quad (3.1)$$

où la matrice \mathbf{X} désigne les allocations $x_{n,c}$ i.e. $\mathbf{X} = (x_{n,c})_{1 \leq n \leq N, 1 \leq c \leq C}$.

Le problème de partage du spectre est modélisé comme un jeu. Les joueurs dans le jeu sont les STs. Chaque joueur a une fonction d'utilité qu'il veut maximiser en choisissant la meilleure stratégie. Dans notre cas, les stratégies sont les puissances de transmission que chaque ST choisit pour effectuer sa transmissions dans une bande. Il est clair que chaque ST va choisir une puissance de transmission différente dépendamment de la bande utilisée et des conditions de transmission sur chaque bande. A ce propos, on propose de modéliser le problème comme un jeu. Puisque ce travail vise à trouver une allocation conjointe des bandes et des puissances, le jeu est considéré comme non coopératif pour l'allocation des bandes et coopératif pour l'allocation des puissances. En effet, chaque ST est choisi dans le jeu sur la base de son utilité si elle arrive à satisfaire ses contraintes. Ainsi, chaque ST peut être vu indépendamment des autres (non coopération). D'un autre coté, les fonctions d'utilité utilisées dans ce travail se base sur le débit des données. Celui-ci considère pour chaque ST l'interférence causée par tous les autres STs qui effectue leurs transmissions en se basant sur leurs puissances (coopération).

Nous proposons aussi d'utiliser le mécanisme VCG (Vickrey-Clarke-Groves) pour trouver les allocations des STs aux bandes du spectre. L'application du VCG à notre problème est décrite en détails dans la section 3.3.

Sans perte de généralité, nous supposons que les STs et les PTs utilisent la modulation

adaptative (Catreux et al., 2002) avec un taux d'erreur par bit (en anglais bit error rate, BER) fixe. Cette hypothèse aidera à calculer le débit de transmission qui sera utilisé dans la fonction d'utilité et ne limite donc pas le modèle proposé. Si l'hypothèse de la modulation adaptative n'est pas supposée, seules la fonction d'utilité et les contraintes du modèle devront être reformulées. On pourra par exemple fixer le débit de transmission et prendre le BER comme une fonction d'utilité à minimiser.

Sans perte de généralité, nous supposons que chaque transmission primaire utilise une seule bande. Le nombre des bandes est donc égal au nombre des PTs i.e. $M = C$. Dans le cas où $M < C$, on considère deux types de bandes, le premier type qui contient les M PTs et le deuxième contient les $(C - M)$ bandes restantes. On construit donc un modèle qui contient deux types de bandes : le premier qui contient les M PTs et le deuxième qui contient les PTs avec une puissance de transmission nulle et sans exigence sur les performances à satisfaire. Dans le cas où $M > C$, le système primaire (que nous ne contrôlons pas) doit ordonnancer les transmissions primaires de sorte qu'une seule transmission primaire utilisera une seule bande.

Dans ce travail, les PTs et les STs ont des exigences à satisfaire qui sont en terme de débit de transmission. Si une transmission primaire n'arrive pas à satisfaire un débit de transmission requis qu'on note R_{pt} malgré l'utilisation de sa puissance maximale, elle va effectuer sa transmission avec le débit qu'elle peut atteindre et ne pourra donc pas coexister avec des transmissions secondaires dans sa bande. Cependant, s'elle arrive à satisfaire son débit de transmission requis, elle va utiliser uniquement le débit requis R_{pt} dans sa transmission (et non pas un débit plus élevé) de façon à partager sa bande avec des transmissions secondaires et tolérer une interférence générée par ces transmissions secondaires. D'un autre côté, chaque transmission secondaire a un débit de transmission minimum requis qu'on note R_{st} (nous supposons que R_{st} est le même pour toutes les transmissions secondaires). Nous supposons qu'un ST va effectuer sa transmission si et seulement si le débit qu'il peut garantir est supérieur à R_{st} . Contrairement au débit des PTs, le débit des STs peut être plus grand que le débit requis R_{st} .

3.2 Fonctions d'utilité

Dans ce travail, nous proposons trois modèles considérant trois fonctions d'utilité différentes. Donc, le modèle de partage du spectre doit atteindre un des trois objectifs. Le premier objectif est de maximiser la somme des débits des transmissions de tous les STs (*Sum Data Rate*, SDR). Le deuxième objectif est de maximiser le SDR équitablement entre les STs. Le troisième objectif est de maximiser le nombre de STs servis dans le jeu. La suite explique comment calculer la fonction d'utilité pour atteindre chacun des objectifs cités ci-dessus.

3.2.1 Maximisation de la somme des débits de transmission

Le premier objectif de notre modèle de partage du spectre est de maximiser la somme des débits de transmission (en anglais *Maximisation of the secondary Sum data Rate*, MSR) des STs choisis dans le jeu. Il est à noter que cette fonction d'utilité ne prend pas en compte l'équité d'allocation des ressources entre les transmissions secondaires. Dans ce qui suit, on va calculer le débit de transmission en supposant une valeur du BER fixe (Attar, Nakhai et Aghvami, 2009).

Si le n^e ST utilise la bande c , une approximation du BER pour la modulation adaptative M-QAM, est donnée dans (Chung et Goldsmith, 2001) comme suit :

$$BER_{n,c} = c_1 x_{n,c} \exp\left(\frac{-c_2 \gamma_{n,c}}{f(b_{n,c})}\right) \quad (3.2)$$

où

$$f(b_{n,c}) = 2^{c_3 b_{n,c}} - c_4 \quad (3.3)$$

où $c_1 = 0.2$, $c_2 = 1.6$, $c_3 = 1$, $c_4 = 1$, $b_{n,c}$ est le nombre de bits par symbole et $\gamma_{n,c}$ représente le rapport signal sur bruit et interférence SINR (en anglais Signal to Interference-plus-Noise Ratio) du n^e ST quand il utilise la c^e bande. Cette approximation

est valide à moins de 1.5 dB d'erreur, $b_{n,c} \geq 2$ et $BER_{n,c} \leq 10^{-3}$ (Chung et Goldsmith, 2001).

En supposant que la transmission dans toutes les bandes est assurée avec une même bande passante B , le débit de transmission R est donné par : $R = b.B$. En développant les équations (3.2) et (3.3), le débit du n^e ST utilisant la c^e bande, est donné par l'équation suivante :

$$R_{n,c}^{st} = \frac{B}{c_3} \log_2 \left(c_4 + \frac{c_2 \gamma_{n,c} x_{n,c}}{\ln\left(\frac{c_1}{BER_{n,c}}\right)} \right) \quad (3.4)$$

Le débit de transmission pour les PTs est donné par la même équation (3.4) en éliminant la variable x .

Le SINR $\gamma_{n,c}^{st}$ du n^e ST utilisant la c^e bande et le SINR $\gamma_{m,c}^{pt}$ du m^e PT utilisant la c^e bande, sont données par les relations suivantes (Attar, Nakhai et Aghvami, 2009) :

$$\gamma_{n,c}^{st} = \frac{p_n^{st} G_{nn'}^{st}}{N_0 + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N p_i^{st} x_{i,c} G_{in'}^{st} + p^{pt} G_{nn'}^{pt}} \quad (3.5)$$

$$\gamma_{m,c}^{pt} = \frac{p^{pt} G_{mm'}^{pt}}{N_0 + \sum_{n=1}^N p_n^{st} x_{n,c} G_{nn'}^{st}} \quad (3.6)$$

$\forall n \in [1, N]$, $\forall c \in [1, C]$ et $\forall m \in [1, M]$. Les valeurs p^{pt} et p^{st} représentent la puissance de transmission pour les PTs et les STs respectivement. $G_{mm'}^{pt}$ et $G_{nn'}^{st}$ sont les gains sur la bande c , de la transmission de PTr_m à $PRE_{m'}$ et de STr_n à $SRe_{n'}$ respectivement. N_0 est la variance du bruit blanc gaussien. Il est à noter que la puissance de transmission des PTs est fixe et elle est la même pour tous les PTs tandis que la puissance de transmission des STs est différente d'un ST à un autre.

Le SINR est un moyen de mesure de la qualité d'une connexion sans fil. L'énergie d'un signal subit un évanouissement avec la distance. Le terme du haut dans les équations 3.5

et 3.6 représente la puissance à la réception. Le terme du bas comporte deux parties : le premier terme est le bruit dans la bande de transmission représentée par N_0 et le deuxième est l'interférence apportée par les autres transmissions. Pour une transmission primaire PT, l'interférence est causée par les utilisateurs secondaires qui partagent la bande avec PT puisque nous supposons que la technique de partage du spectre utilisée dans notre cas est *underlay*. Par contre, l'interférence pour une transmission secondaire ST dans une bande c est causée par le PT_c ainsi que toutes les STs qui utilisent la bande c .

Puisque $M = C$ et que chaque PT utilise une seule bande, le SINR des PTs peut être simplifié comme suit :

$$\gamma_{m,c}^{pt} = \begin{cases} \gamma_{cc}^{pt} & \text{si } m = c \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Finalement, puisque l'objectif est de maximiser le SDR de tous les STs, la fonction d'utilité du n^e ST est calculé comme suit :

$$u_n^{MSR}(\mathbf{X}) = \sum_{c=1}^C R_{n,c}^{st} \quad (3.7)$$

3.2.2 Maximisation de la somme des débits de transmission avec équité entre les STs

Le deuxième objectif de notre modèle de partage du spectre est de maximiser la somme des débits de transmission tout en assurant l'équité entre les STs (en anglais *Fair Maximisation of the secondary Sum data Rate*, FMSR). Le débit de transmission est calculé en utilisant l'équation (3.4). Comme dans (Yaïche, Mazumdar et Rosenberg, 2000) qui présente une allocation de la bande passante dans le contexte des réseaux sans fil, l'équité est introduite en utilisant la fonction logarithmique. De plus, les auteurs dans (Kelly, Maulloo et Tan, 1998) proposent une *fonction d'évaluation* (proposée par le mécanisme

de Kelly) définie comme : $w \cdot \log(R)$, w étant l'offre du joueur et R est la récompense du joueur dans le jeu. Ainsi, la fonction d'utilité dans notre cas est donnée par l'équation suivante :

$$u_n^{MSR}(\mathbf{X}) = \sum_{c=1}^C w_n \cdot \log(1 + R_{n,c}^{st}) \quad (3.8)$$

où w_n représente le débit de transmission minimal requis pour les STs i.e. $w_n = R_{st}$ (il est à noter que tous les STs ont le même débit de transmission minimum requis R_{st}).

3.2.3 Maximisation du nombre de STs servis

Le troisième objectif de notre modèle de partage du spectre est de maximiser le nombre des STs choisis dans le jeu (en anglais *Maximisation of the Number of Served STs*, MNS). La fonction d'utilité dans ce cas est donnée par la relation suivante :

$$u_n^{MNS}(\mathbf{X}) = \sum_{c=1}^C x_{n,c}, \forall n \in [1, N] \quad (3.9)$$

3.3 Modèle de partage du spectre basé sur le mécanisme VCG

3.3.1 Application du VCG au problème de partage du spectre

Le mécanisme VCG vise à :

- Faire une *décision sociale* qui correspond à la détermination de l'allocation des STs au spectre disponible.
- Calculer la valeur du *transfère* τ_n pour chaque ST, en se basant sur de l'allocation trouvée par la décision sociale. Le transfère représente le prix que chaque ST doit payer à cause de l'impact que son allocation peut causer aux autres STs.

Le VCG prend une fonction d'évaluation comme entrée pour trouver la décision sociale. La fonction d'évaluation dans notre cas est l'une des fonctions d'utilité décrites dans la section 3.2. La décision sociale est prise de façon à maximiser l'utilité globale de tous les STs. Les contraintes du problème sont :

- La contrainte d'interférence : puisque notre modèle du système utilise l'*underlay* comme technique de partage du spectre, les PTs ne doivent pas être affectés pendant leurs transmissions. A ce propos, chaque PT doit satisfaire un débit de transmission requis R_{pt} .
- La contrainte d'utilisation des bande : chaque ST choisi dans le jeu doit utiliser une seule bande.
- La contrainte du débit de transmission des utilisateurs secondaires : les STs qui seront choisis dans le jeu doivent avoir un débit de transmission minimum requis R_{st} .
- La contrainte de la puissance de transmission : la puissance de transmission des STs choisis dans le jeu ne doit pas dépasser une puissance seuil p_{max} .

Finalement, la décision sociale est la solution du problème d'optimisation suivant :

$$\mathbf{X}^* = \arg \max_{\mathbf{X}} u_{tot}(\mathbf{X}) \quad (3.10)$$

sujet à :

$$\sum_{c=1}^C x_{n,c} \leq 1, \forall n \in [1, N] \quad (3.11)$$

$$x_{n,c}(R_{st} - R_{n,c}^{st}) \leq 0, \forall n \in [1, N], \forall c \in [1, C] \quad (3.12)$$

$$R_{pt} \leq R_{m,c}^{pt}, \forall m \in [1, M], \forall c \in [1, C] \quad (3.13)$$

$$0 \leq p_n^{st} \leq p_{max}, \forall n \in [1, N] \quad (3.14)$$

$$x_{n,c} \in \{0, 1\}, \forall n \in [1, N], \forall c \in [1, C] \quad (3.15)$$

Il est à noter que dans le cas où l'objectif est de maximiser le nombre des STs servis, on utilise la même définition du débit de transmission décrite dans la section 3.2.1.

Le problème d'optimisation décrit précédemment par les équations (3.10)-(3.15) est un problème non linéaire avec des variables entières i.e. $x_{n,c}$ et des variables réelles i.e. p_n . Ce genre de problème d'optimisation est appelé un problème de programmation entière mixte (en anglais *Mixed Integer Nonlinear Programming* MINLP)(Grossmann et Kravanja, 1995).

La solution du problème d'optimisation exprimé par les équations précédentes donne l'allocation optimale des STs aux bandes du spectre ainsi que l'allocation de la puissance de transmission. Soit x_n^{opt} la solution optimale du n^e ST. Cette solution représente la bande que le n^e ST va utiliser pour effectuer sa transmission (si aucune solution n'a été trouvé pour le n^e ST, alors $x_n^{opt} = 0$).

Une fois la décision sociale est faite, c'est-à-dire que les STs qui effectueront leurs transmissions sont choisis, l'allocation optimale sera utilisée pour le calcul du transfère τ_n pour chaque ST. La valeur du transfère du n^e ST est calculée en prenant en considération l'utilité des STs concurrents pour l'allocation optimale trouvée dans la présence de ST_n et lorsque il ne participe pas au jeu. Pour cela, soit \mathbf{x}'_n l'allocation des bandes de tous les STs sauf le n^e ST i.e. $\mathbf{x}'_n = (x_1, \dots, x_{n-1}, x_{n+1}, \dots, x_N)$, $x_i \in [1, C] \cup \{0\}$ pour $i \neq n$. Ainsi, la valeur du transfère est donnée par la relation suivante :

$$\tau_n = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N u_i(x_i^{opt}) - \max_{\mathbf{x}'_k} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N u_i(x_i) \quad (3.16)$$

Le premier terme de l'équation (3.16) représente l'allocation optimale calculée dans la présence du n^e ST tandis que le deuxième terme représente l'allocation calculée quand le n^e ST ne participe pas au jeu. Notons que $\tau_n \leq 0$ puisque le premier terme de l'équation (3.16) est toujours plus petit que le deuxième terme (l'allocation du n^e ST peut être exploitée pour servir d'autres STs et donc améliorer l'utilité globale de tous les STs). τ_n représente l'*inconvenient* (en anglais *inconvenience*) que le n^e ST cause autres STs.

Pour chaque ST_n , on introduit la récompense v_n (en anglais *pay-off*) définie comme suit :

$$v_n(x_n^{opt}) = u_n(x_n^{opt}) + \tau_n \quad (3.17)$$

$$v_n(x_n^{opt}) = u_n(x_n^{opt}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N u_i(x_i^{opt}) - \max_{x'_k} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N u_i(x_i) \quad (3.18)$$

3.3.2 Algorithme de partage du spectre

Le mécanisme VCG indique que quand un ST rapporte ou fait une soumission véridique (en anglais *reports truthfully*), sa récompense sera égale à son utilité i.e. $v_n = u_n$. Ceci veut dire que l'allocation accordée au n^e ST n'a aucun inconvénient par rapport aux autres STs et qu'elle est donc considérée comme une stratégie optimale. On vise donc à réduire le plus possible la valeur du transfère pour chaque ST choisi dans le jeu. Idéalement, l'allocation optimale vise à avoir pour chaque ST n , une valeur du transfère $\tau_n = 0$. Or, puisque on peut prédire la stratégie optimale pour chaque ST qui réduira la valeur du transfère, celui-ci servira à *pénaliser* chacun des ST dans les périodes d'allocation qui suivent. A chaque fois qu'une allocation est faite, la valeur du transfère doit être calculée pour chaque ST. Les STs qui causent beaucoup d'inconvénients aux autres STs doivent être pénalisés en éliminant la valeur du transfère de leurs utilités. Chaque allocation va ainsi pénaliser les prochaines allocations.

Pour résumer, à chaque période de partage du spectre, l'algorithme proposé pour l'allocation du spectre procédera comme suit :

1. Soient N STs, M PTs et C bandes disponibles. Nous supposons que $C = M$ et que chaque PT utilise une seule bande. Chaque ST a une valeur du transfère cumulative qu'on note τ_n^{cum} .
2. Pour chaque ST n , on calcule la valeur de sa récompense v_n calculée comme suit : $v_n = u_n + \tau_n^{cum}$ où u_n représente l'utilité du n^e ST. Celui-ci participera par la suite dans le jeu avec la nouvelle valeur de sa récompense v_n .

3. On calcule la décision sociale pour déterminer l'allocation optimale des STs en solvant le problème d'optimisation défini par les équations (3.10)-(3.15).
4. Pour chaque ST n , on construit et on résout un problème d'optimisation similaire en éliminant le n^e ST afin de déterminer la valeur du transfère τ_n^{act} .
5. Une fois les N problèmes d'optimisation sont résolus, on calcule le transfère actuel pour chaque ST n : τ_n^{act} .
6. La valeur du transfère cumulative est mise à jour pour chaque ST n pour être utilisée dans les prochaines périodes d'allocation : $\tau_n^{cum} \leftarrow \tau_n^{cum} + \tau_n^{act}$.
7. On alloue les STs aux bandes du spectre qui sont la solution de la décision sociale.

Il est important de noter qu'une seule bande peut être utilisée par plusieurs STs parce que des fois la bande est sous-utilisée et peut donc supporter plus qu'un seul ST.

3.3.3 Complexité

La solution du modèle de partage du spectre basé sur le mécanisme VCG est calculée en résolvant $N + 1$ problèmes d'optimisation (la décision sociale ainsi que N autres problèmes, un pour chaque ST, pour calculer la valeur du transfère pour chaque ST). De plus, chacun des problèmes d'optimisation est considéré comme un problème NP-difficile (Boyd et Vandenberghe, 2004). Il est donc très coûteux de résoudre $N + 1$ problèmes d'optimisations à chaque période d'allocation ce qui rend la complexité de calcul très élevée. Pour cela, on propose d'utiliser la méthode SQP (*Sequential Quadratic Programming*) (Boggs et Tolle, 1995) pour résoudre nos problèmes d'optimisation. SQP est une méthode populaire et utilisée pour résoudre les problèmes non-linéaires. L'application de la SQP est expliquée en détails dans la section 3.4.

Par ailleurs, la complexité de calcul peut être réduite en parallélisant l'exécution des problèmes indépendants. En effet, une fois la décision sociale est faite, les N problèmes d'optimisations pour calculer la pénalité correspondante à chacun des STs sont indépendants et peuvent donc être résolus en parallèle. La résolution du modèle est vu comme la résolution de deux problèmes au lieu de $N + 1$ problèmes ce qui réduit de manière

considérable la complexité du modèle.

Il est à noter que la période entre deux partages doit prendre en compte le temps d'exécution des problèmes d'optimisations pour déterminer la décision sociale et la valeur du transfère pour chaque ST. En effet, une fois la décision sociale est faite, les STs choisis vont être alloués à leurs bandes correspondantes. Après, on résout les N problèmes d'optimisation pour déterminer la pénalité pour chaque ST. Puisque leur exécution est faite en parallèle, le temps d'exécution des N problèmes est donné par : $t_{max} = \max_{n \in [1, N]} (t_n)$, t_n étant le temps d'exécution du problème pour déterminer la pénalité du n^e ST. La période d'attente avant de recalculer la décision sociale doit donc être supérieure à t_{max} .

3.4 Résolution du problème d'optimisation en utilisant le SQP

SQP est une méthode efficace pour résoudre les problèmes non linéaires. Elle décompose le problème initial en sous-problèmes qui ont une fonction objective quadratique et des contraintes linéaires. Rappelons que le problème d'optimisation proposé est un problème NP-difficile (Boyd et Vandenberghe, 2004). Pour utiliser le SQP dans notre cas, on décompose le problème initial en N sous-problèmes, un pour chaque bande (i.e. on fixe une bande et on cherche l'allocation des STs pour chaque bandes), ou en C sous-problèmes, un pour chaque ST (i.e. on fixe un ST et on cherche la meilleur bande à allouer pour chaque ST). Dans ce travail, on propose de fixer la bande et chercher l'allocation des STs pour chaque bande du spectre. Ainsi, dans tout ce qui suit, on fixe l'indice de la bande c , $\forall c \in [1, C]$, et on construit le sous-problème à résoudre pour les N STs en éliminant l'indice c du problème défini par les équations (3.10)-(3.15). Rappelons que les variables du modèle sont $x_{n,c}$ et p_n^{st} . Pour simplifier la notation, on définit le vecteur $\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 & \dots & y_{2N} \end{bmatrix}^T$ défini comme suit : $y_n = x_{n,c}$ pour $n = 1, \dots, N$ et $y_n = p_n^{st}$ pour $n = (N + 1), \dots, 2N$. La variable du sous-problème généré est donc le vecteur \mathbf{y} .

La fonction Lagrangien associée au sous-problème construit est défini comme suit :

$$\begin{aligned}
L(\mathbf{y}, \lambda) = & \sum_{n=1}^N u_n \\
& - \sum_{n=1}^N \lambda_n^1 (x_{n,c} - 1) \\
& - \sum_{n=1}^N \lambda_n^2 x_{n,c} (R_{st} - R_{n,c}^{st}) \\
& - \lambda_c^3 (R_{pt} - R_{c,c}^{pt}) \\
& - \sum_{n=1}^N \lambda_n^4 (p_n^{st} - p_{max})
\end{aligned} \tag{3.19}$$

$\lambda = [\lambda_1^1, \dots, \lambda_N^1, \lambda_1^2, \dots, \lambda_N^2, \lambda_c^3, \lambda_1^4, \dots, \lambda_N^4]^T$ est le vecteur multiplicateur de Lagrange.

Soit la matrice Hessienne associée à $L(\mathbf{y}, \lambda)$:

$$[\mathbf{HL}(\mathbf{y}, \lambda)]_{i,j} = \frac{\partial^2 L(\mathbf{y}, \lambda)}{\partial y_i \partial y_j}, \forall i, j \in [1, 2N] \tag{3.20}$$

Soit aussi le vecteur de chacune des trois contraintes du sous-problème \mathbf{f} , \mathbf{g} et \mathbf{h} . Elles sont définies comme suit : $\mathbf{f} = [f_1 \dots f_N]^T$, $\mathbf{g} = [g_1 \dots g_N]^T$, $\mathbf{h} = h_c$ et $\mathbf{l} = [l_1 \dots l_N]^T$, où :

$$f_n(\mathbf{y}) = x_{n,c} - 1, \forall n \in [1, N] \tag{3.21}$$

$$g_n(\mathbf{y}) = x_{n,c} (R_{st} - R_{n,c}^{st}), \forall n \in [1, N] \tag{3.22}$$

$$h_c(\mathbf{y}) = R_{pt} - R_{c,c}^{pt} \tag{3.23}$$

$$l_n(\mathbf{y}) = p_n^{st} - p_{max}, \forall n \in [1, N] \tag{3.24}$$

Sachant que le SQP est une approche itérative, à chaque itération k , on résout le sous-problème construit pour trouver une solution $(\mathbf{y}^k, \lambda^k)$, en partant d'une solution initiale faisable $(\mathbf{y}^0, \lambda^0)$. A l'itération $k + 1$, SQP va essayer d'améliorer la solution précédente pour trouver une meilleure solution $(\mathbf{y}^{(k+1)}, \lambda^{(k+1)})$. Le même processus est répété jusqu'à ce que la condition de convergence soit atteinte.

A ce propos, soit le vecteur de correction $\mathbf{s} = \left[\begin{matrix} (\mathbf{s}_y^k)^T & (\mathbf{s}_\lambda^k)^T \end{matrix} \right]^T$ à la k^e itération défini comme suit :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}^{k+1} \\ \lambda^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}^k + \mathbf{s}_y^k \\ \lambda^k + \mathbf{s}_\lambda^k \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Le vecteur \mathbf{s} est obtenu en résolvant le problème de programmation quadratique suivant (Conn, Gould et Toint, 2000) :

$$\underset{\mathbf{s}}{\text{minimize}} \quad \nabla \mathbf{L}(\mathbf{y}^k, \lambda^k)^T \times \mathbf{s} + \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \times \mathbf{HL}(\mathbf{y}^k, \lambda^k) \times \mathbf{s}$$

sujet à

$$\mathbf{f}(\mathbf{y}^k) + \mathbf{Jf}(\mathbf{y}^k)^T \times \mathbf{s} \geq 0 \quad (3.26)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{y}^k) + \mathbf{Jg}(\mathbf{y}^k)^T \times \mathbf{s} \geq 0$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{y}^k) + \mathbf{Jh}(\mathbf{y}^k)^T \times \mathbf{s} \geq 0$$

$$\mathbf{l}(\mathbf{y}^k) + \mathbf{Jl}(\mathbf{y}^k)^T \times \mathbf{s} \geq 0$$

où k est le numéro de l'itération, $\nabla \mathbf{L}(\mathbf{y}^k, \lambda^k)$ est le gradient de la fonction Lagrangienne défini comme suit :

$$\nabla \mathbf{L}(\mathbf{y}, \lambda) = \left[\begin{matrix} \frac{\partial L(\mathbf{y}, \lambda)}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial L(\mathbf{y}, \lambda)}{\partial y_{2N}} \end{matrix} \right]^T \quad (3.27)$$

où \mathbf{Jf} , \mathbf{Jg} , \mathbf{Jh} et \mathbf{Jl} sont les matrices Jacobiennes de \mathbf{f} , \mathbf{g} , \mathbf{h} et \mathbf{l} respectivement. Par exemple, \mathbf{Jf} est définie comme suit :

$$\mathbf{Jf}(\mathbf{y}^k) = \left[\nabla f_1(\mathbf{y}^k) \quad \dots \quad \nabla f_N(\mathbf{y}^k) \right]^T \quad (3.28)$$

où ∇f_n est le gradient de la fonction f_n .

Pour résoudre le problème quadratique donné par l'équation (3.26), on propose d'utiliser la méthode de Newton (Sun, 1998). Le vecteur \mathbf{s} est donc solution de l'équation suivante (Conn, Gould et Toint, 2000) :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{HL}(\mathbf{y}^k, \lambda^k) & \mathbf{A} \\ \mathbf{A}^T & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{s}_y^k \\ \mathbf{s}_\lambda^k \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \nabla \mathbf{L}(\mathbf{y}^k, \lambda^k) \\ \mathbf{f}(\mathbf{y}^k) \\ \mathbf{g}(\mathbf{y}^k) \\ \mathbf{h}(\mathbf{y}^k) \\ \mathbf{l}(\mathbf{y}^k) \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

où la matrice \mathbf{A} est la matrice Jacobienne associée aux quatre contraintes \mathbf{f} , \mathbf{g} , \mathbf{h} et \mathbf{l} . Elle est définie comme suit :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{Jf}(\mathbf{y}^k) & \mathbf{Jg}(\mathbf{y}^k) & \mathbf{Jh}(\mathbf{y}^k) & \mathbf{Jl}(\mathbf{y}^k) \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

L'objectif de la méthode de Newton est de résoudre l'équation (3.29) à chaque itération pour trouver le vecteur de correction \mathbf{s} . La solution optimale est trouvée quand la condition de convergence est vérifiée. En effet, au fur et à mesure que le nombre d'itération augmente, la méthode converge vers une solution optimale $(\mathbf{y}^*, \lambda^*)$ quand le vecteur de correction est suffisamment petit. Pour vérifier que la condition de convergence est vérifiée, les conditions d'optimalité de KKT (Karush-Kuhn-Tucker) (Shetty, 1993) sont utilisées.

De plus, la méthode SQP peut être améliorée en introduisant des *fonctions de mérites* comme dans (Tzallas-regas et Rustem, 2010) ou des *filtres* comme dans (NIE, 2003), pour mesurer la progression de la méthode et s'assurer qu'elle converge vers la solution optimale.

Pour résumer, l'utilisation de la méthode SQP pour résoudre le problème d'optimisation proposé est décrite dans ce qui suit :

1. Trouver une solution initiale et faisable (y^0, λ^0) du problème (itération $k = 0$).
2. A partir de l'itération $k = 1$, résoudre l'équation (3.29) pour trouver le vecteur de correction s .
3. Vérifier la condition de convergence en utilisant les conditions d'optimalité de KKT.
4. Si la condition de convergence est vérifiée, la méthode est arrivée à la solution optimale à l'itération courante (y^k, λ^k) .
5. Sinon poser $k \leftarrow k + 1$ et aller à l'étape 2.

[Cette page a été laissée intentionnellement blanche]

CHAPITRE IV

RÉSULTATS DE SIMULATION

Ce chapitre présente les résultats de simulation du modèle de partage du spectre proposé. Le chapitre commence par présenter les paramètres et les outils qui sont utilisés dans les simulations. Ensuite, l'évaluation de la performance en terme du SDR des STs et du nombre des STs servis ainsi que l'évaluation de l'équité seront présentées en détails pour les trois fonctions d'utilité présentées dans la section 3.2 : MSR, FMSR et MNS.

4.1 Paramètres de simulation

L'évaluation du modèle de partage des ressources proposé est réalisée en utilisant Matlab. Rappelons que le problème d'optimisation proposé est un problème MINLP. Pour résoudre ce genre de problème, un environnement d'optimisation nommé TOMLAB (Holmström, 1999) est utilisé. Pour des fins de simulation, nous supposons un CRN contenant huit transmissions secondaires ($N = 8$), quatre transmissions primaires ($M = 4$) et quatre bandes spectrales ($C = 4$), chacune étant utilisée par un PT. Le gain de transmission sur chaque bande suit par une distribution aléatoire exponentielle selon l'évanouissement de Rayleigh. La variance du bruit blanc gaussien est $N_0 = 1$. Le BER requis pour les transmissions primaires et secondaires est fixé à $BER = 10^{-4}$. Sauf mention contraire, le débit de transmission requis pour les PTs est $R_{pt} = 0.3$ bit/sec/Hz. Tous les PTs ont le même débit de transmission requis. Tous les PTs ont la même puissance de transmission. La puissance de transmission maximale des STs est fixée à $p_{max} = 30dB$.

4.2 Évaluation de la performance

La première évaluation du modèle proposé concerne l'évaluation du SDR des transmissions secondaires. L'évaluation est faite en faisant varier la valeur de la puissance de transmission des PTs (de 1dB à 30dB). Pour chaque valeur de puissance, le SDR moyen est calculé en se basant sur 50 itérations, c'est-à-dire que l'allocation est répétée 50 fois avant de calculer le SDR moyen des STs.

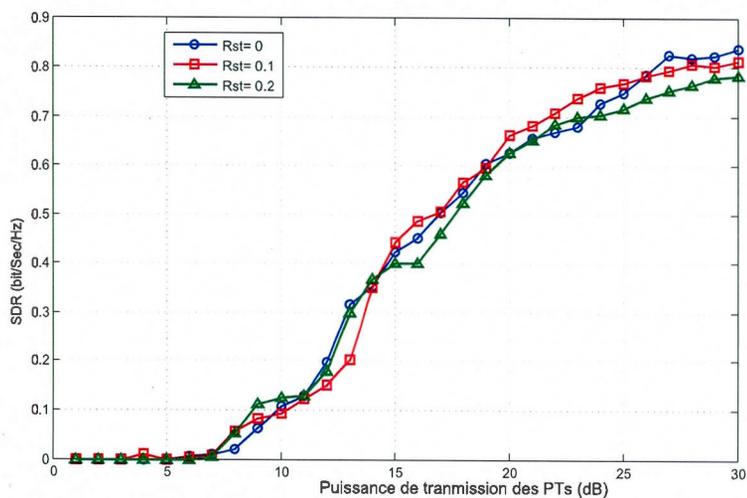


Figure 4.1 SDR quand la fonction d'utilité est MSR

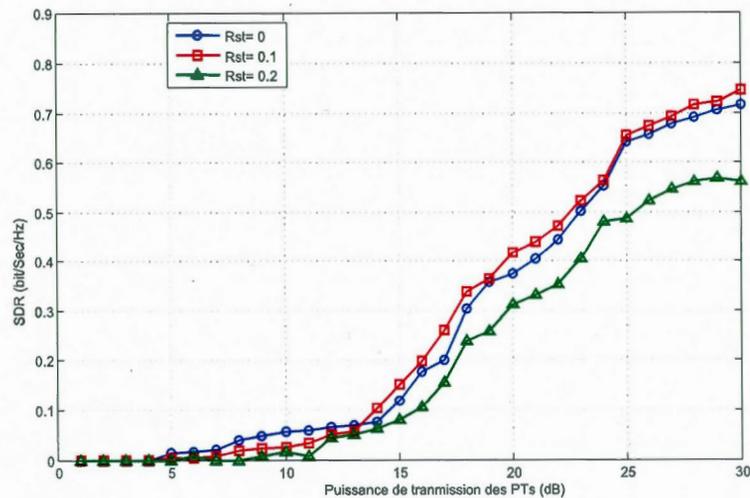


Figure 4.2 SDR quand la fonction d'utilité est FMSR

Les figures 4.1, 4.2 et 4.3 montrent le SDR quand l'objectif est MSR, FMSR et MNS respectivement. Toutes les figures sont tracées pour différentes valeurs du débit de transmission minimum requis pour les transmissions secondaires i.e. $R_{st} = 0, 0.1, 0.2$ bit/sec/Hz. Toutes les transmissions secondaires ont le même R_{st} . Il est important de rappeler que si une transmission primaire n'arrive pas à satisfaire son débit de transmission requis, aucun ST n'utilisera sa bande spectrale après l'allocation.

Les figures 4.1, 4.2 et 4.3 montrent que pour des petites valeurs de la puissance de transmission des PTs (moins de 5dB), le SDR est presque égal à zéro. Ceci est expliqué par le fait que la puissance de transmission des PTs est faible et donc l'interférence permise par les PTs est très faible ou même égale à zéro. Pour ces valeurs, même les transmissions primaires ne peuvent pas parfois garantir leurs R_{pt} . C'est très rare que les PTs et les STs peuvent coexister dans cette zone. Cependant, l'interférence permise par les PTs (grâce au gain des PTs dans les bandes spectrales) ainsi que le gain des STs dans les bandes permettent parfois la transmission de quelques utilisateurs secondaires.

A partir d'une puissance de transmission de 5 dB, le SDR commence à augmenter. En

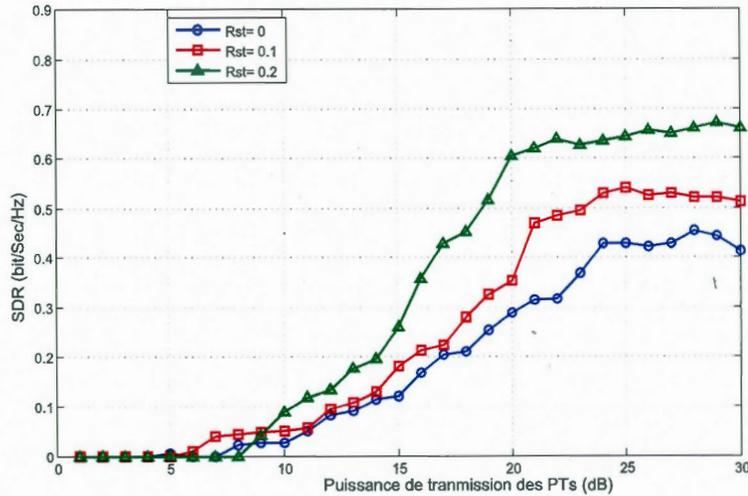


Figure 4.3 SDR quand la fonction d'utilité est MNS

effet, le SDR dans les trois figures augmentent avec la puissance de transmission des PTs. Les courbes du SDR dans la figure 4.1 (l'objectif dans ce cas est de maximiser le SDR), quand $R_{st} = 0, 0.1$ et 0.2 bit/sec/Hz, sont proches. Par exemple, le SDR réalisé avec une puissance de transmission des PTs de 30 dB est de l'ordre de 0.8 bit/sec/Hz. Cependant, les courbes du SDR dans la figure 4.2 (l'objectif dans ce cas est de maximiser équitablement le SDR) quand $R_{st} = 0$ et 0.1 bit/sec/Hz sont proches tandis que la courbe du SDR quand $R_{st} = 0.2$ bit/sec/Hz est inférieure aux deux autres. Par exemple, le SDR réalisé dans le cas où $R_{st} = 0$ et 0.1 bit/sec/Hz et une puissance de transmission des PTs de 30 dB est 0.75 bit/sec/Hz tandis que le SDR réalisé dans le cas où $R_{st} = 0.2$ bit/sec/Hz pour la même puissance de transmission des PTs est 0.54 bit/sec/Hz. En revanche, la figure 4.3 (l'objectif est de maximiser le nombre des STs servi) montre que le SDR accroît quand le débit de transmission minimum requis pour les STs augmente. Par exemple, le SDR réalisé pour une puissance de transmission des PTs de 30 dB, quand $R_{st} = 0, 0.1$ et 0.2 bit/sec/Hz est respectivement 0.41, 0.51 et 0.68 bit/sec/Hz.

Comme prévu, le MSR donne un meilleur SDR par rapport aux autres fonctions d'utilité.

Ceci est expliqué par le fait que dans le cas du MSR, les STs qui maximisent le SDR indépendamment de l'équité ou du nombre des STs servis, sont choisis dans le jeu. Le MNS, par contre, tend à maximiser le nombre des STs servis indépendamment de leurs débits de transmission. Par conséquent, le MNS assure un SDR inférieur aux deux autres cas. Le FMSR donne des performances intermédiaires en terme du SDR puisque son objectif est de maximiser équitablement le SDR des STs. Il est par conséquent considéré comme un compromis entre le cas du MNS et le cas du MSR. Toutefois, quand $R_{st} = 0.2$ bit/sec/Hz, le SDR dans le cas du FMSR est inférieur au SDR dans le cas du MNS. Or, le nombre des STs choisis dans le jeu dans le cas du MNS est supérieur à ceux dans le cas du FMSR comme le montrent les figures 4.5 et 4.6. Puisque $R_{st} = 0.2$ bit/sec/Hz, le SDR est donc plus important.

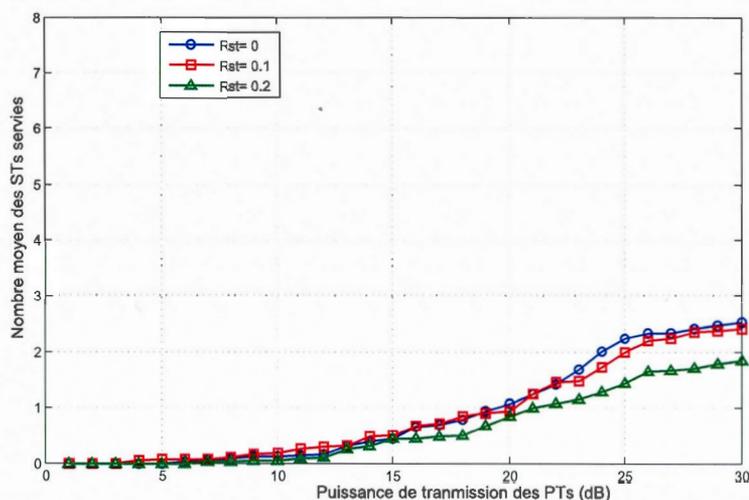


Figure 4.4 Le nombre moyen des STs servis quand la fonction d'utilité est MSR

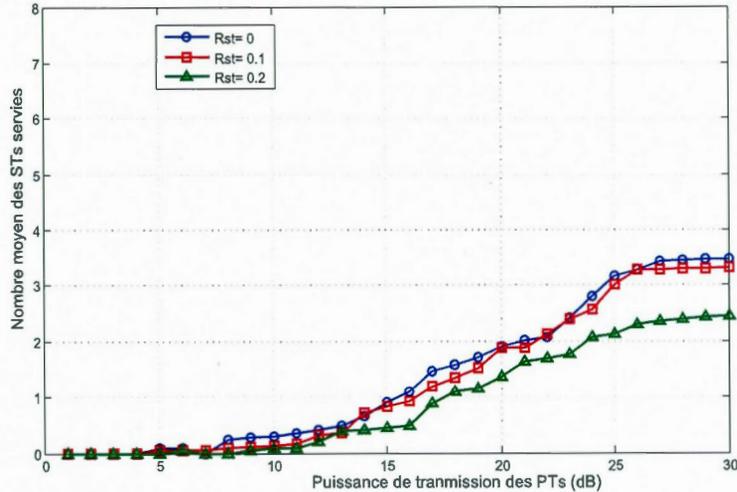


Figure 4.5 Le nombre moyen des STs servis quand la fonction d'utilité est FMSR

Contrairement à l'évaluation du SDR, les figures 4.4, 4.5 et 4.6 montrent le nombre des STs servis pour les différentes valeurs de R_{st} . Comme les figures le montrent, le nombre des STs choisis dans le jeu est plus important dans le cas du MNS. Le nombre des STs servis est plus faible dans le cas du MSR et le cas du FMSR est un cas intermédiaire entre le MNS et le MSR. Ceci est prévu puisque l'objectif dans le cas du MNS est de maximiser le nombre des STs choisis dans le jeu. Par ailleurs, le nombre des STs servis diminue quand le R_{st} augmente dans les trois cas (les courbes quand $R_{st} = 0$ et $R_{st} = 0.1$ dans le cas du MSR et FMSR sont proches). Le nombre des STs choisis dans le jeu est alors important pour des petites valeurs de R_{st} . Rappelons que dans le cas du MNS, le nombre des STs choisis dans le jeu quand $R_{st} = 0$ bit/sec/Hz peut arriver à huit STs ce qui veut dire que toutes les transmissions secondaires sont choisies dans l'allocation.

Le nombre des STs servis dans le cas du MSR et du FMSR reste relativement petit même pour des grandes valeurs de la puissance de transmission des PTs. Les figures 4.4 et 4.5 montrent que même pour une puissance de transmission des PTs de 30dB, le nombre moyen des STs servis pour le MSR et le FMSR est autour de 2.5 et 3.2 respectivement

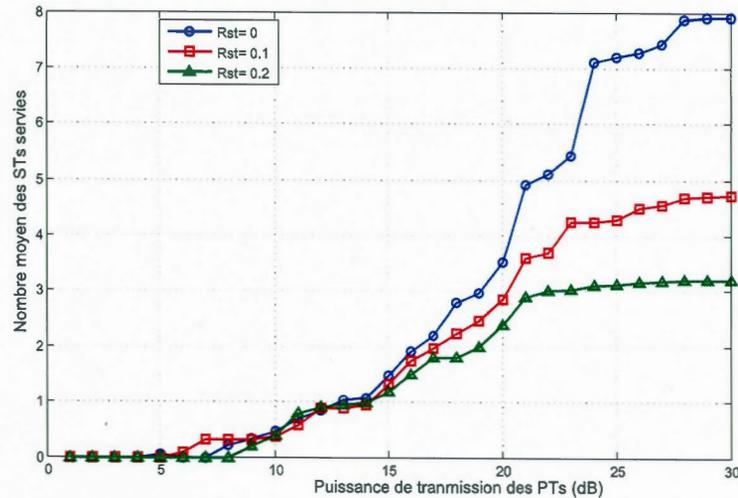


Figure 4.6 Le nombre moyen des STs servis quand la fonction d'utilité est MNS

quand $R_{st} = 0$ ou $R_{st} = 0.1$, et autour de 1.9 et 2.4 respectivement quand $R_{st} = 0.2$. En effet, puisque l'objectif est de maximiser le débit de transmission, l'algorithme d'allocation favorise l'allocation des STs capable de maximiser le SDR (comme c'est expliqué précédemment dans les figures 4.1, 4.2 et 4.3). C'est pour cela qu'on constate que le nombre des STs servis dans le cas du MSR et FMSR est relativement faible alors que leur SDR est plus important. D'un autre côté, le cas du FMSR introduit l'équité entre les STs ce qui permet de donner la chance à plus des STs pour effectuer leurs transmissions. C'est pour cela que le cas du FMSR garantit un nombre des STs servis meilleur que le cas du MSR.

Il est important de noter que le nombre des STs servis dans les figures 4.4 (le cas du MSR) et 4.5 (le cas du FMSR) varie de quelques unités même pour les grandes valeurs de la puissance de transmission des PTs. Cependant, les figures du SDR 4.1 et 4.2 associées aux cas du MSR et FMSR montrent une variation importante du SDR entre 20dB et 30dB. Ceci veut dire que dans cette zone, les STs qui garantissent des débits de transmission importants sont choisis. En effet, puisque la puissance de transmission

des PTs est importante par rapport au bruit, l'interférence permise par chaque PT est importante et les STs peuvent alors assurer un débit de transmission plus important. Ainsi, puisque le cas du MSR et FMSR vise à maximiser le débit de transmission, les STs garantissant des grands débits de transmission sont alloués.

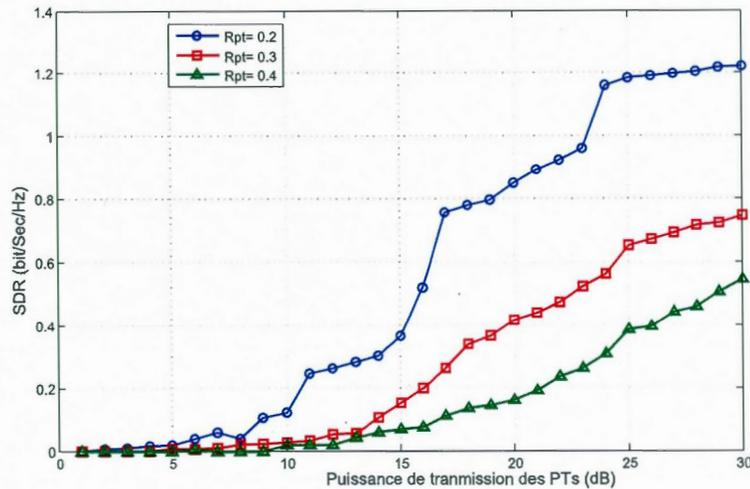


Figure 4.7 SDR dans le cas du FMSR pour différentes valeurs de R_{pt}

Pour évaluer l'impact du débit de transmission requis pour les PTs, on considère les figures 4.7 et 4.8 dans le cas du MNS et du FMSR. Elles montrent le SDR et le nombre moyen des STs servis dans le cas du FMSR et le cas du MNS respectivement pour différentes valeurs de R_{pt} quand $R_{st} = 0.1$ bit/Sec/Hz. Comme prévu, le SDR diminue quand R_{pt} augmente dans le cas du FMSR alors que le nombre des STs servis accroît quand le R_{pt} diminue dans le cas du MNS. En effet, notre système modèle suppose que quand un PT arrive à satisfaire son débit de transmission requis R_{pt} , il transmet en utilisant uniquement le débit R_{pt} pour pouvoir coexister avec la maximum des STs possible dépendamment de la fonction d'utilité utilisée. Plus R_{pt} est petit plus l'interférence allouée est grande. Ainsi, pour une fonction d'utilité FMSR, les STs maximisant le SDR sont choisis ce qui explique pourquoi le SDR augmente quand le R_{pt} diminue dans la figure 4.7. De même, pour une fonction d'utilité MNS, la figure 4.8 montre que le nombre des

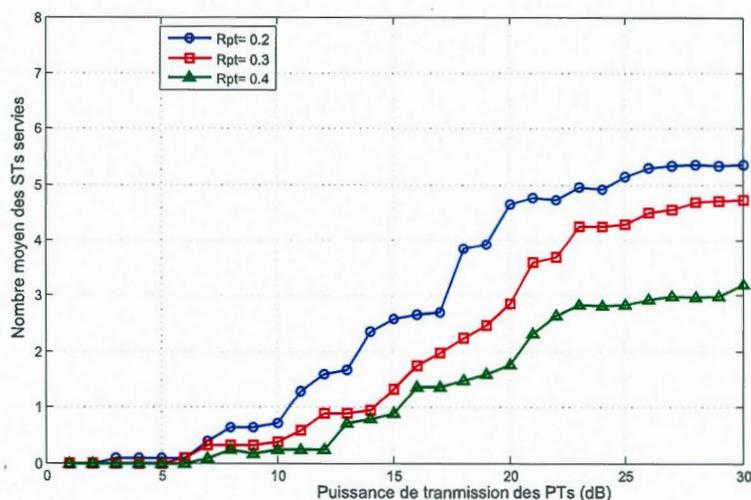


Figure 4.8 Nombre moyen des STs servi dans le cas du MNS pour différentes valeurs de R_{pt}

STs servis dans le jeu accroît quand le R_{pt} diminue.

Pour résumer, les performances du modèle proposé sont meilleures pour des petites valeurs de R_{pt} . Un débit de transmission requis pour les PTs petit permet de maximiser le SDR si l'objectif est de maximiser le débit de tous les STs, ou maximiser le nombre des STs servis si l'objectif est de choisir un nombre maximum des STs.

4.3 Évaluation de l'équité

Pour évaluer l'équité du modèle proposé, l'indice de Jain présenté dans la section 1.6 est utilisé. Il est important de noter que l'équité parfaite a un indice égal à 1 ($0 \leq Index \leq 1$).

La figure 4.9 montre l'indice d'équité calculé pour une puissance de transmission des PTs de 30 dB, $R_{st} = 0.1$ bit/sec/Hz et $R_{pt} = 0.3$ bit/sec/Hz. L'indice d'équité est calculé en utilisant l'équation (1.1) pour différents nombre d'itérations (c'est-à-dire les

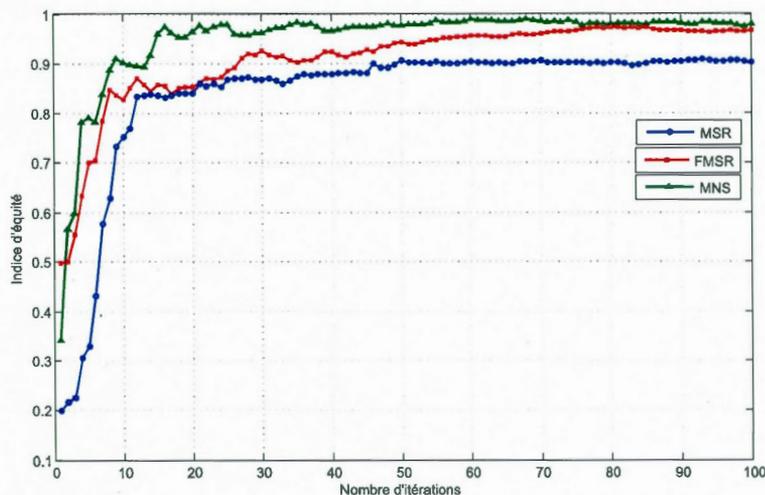


Figure 4.9 Indice d'équité de Jain quand la fonction d'utilité est MSR, FMSR et MNS

allocations). Le gain de la bande spectrale est généré à chaque itération. Comme la figure 4.9 le montre, l'indice d'équité augmente quand le nombre d'itération augmente. Ceci est expliqué par le fait que la valeur du transfère τ est plus significative quand le nombre d'itérations est important parce qu'un nombre important des allocations est pris en considération. Quand l'historique des allocations est important (plus que 30 itérations), l'indice d'équité dans les trois cas est supérieur à 0.9 ce qui veut dire que l'algorithme proposé est équitable à 90%. Cependant, l'équité réalisée dans le cas du MNS est plus importante que celle réalisée dans le cas du MSR et du FMSR. Cela est dû au fait que l'objectif dans le cas du MNS est de maximiser le nombre des STs servis et ceux-ci ont presque le même débit de transmission. De plus, l'équité réalisée dans le cas du FMSR est comme prévu meilleure que celle réalisée dans le cas du MSR.

CONCLUSION

Ce mémoire a présenté un modèle optimal de partage du spectre basé sur le mécanisme VCG (Vickrey–Clarke–Groves) dans un jeu. La contribution de ce travail est dans le cas où les utilisateurs primaires peuvent coexister avec les utilisateurs secondaires dans les mêmes bandes spectrales (technique de partage du spectre *underlay*). Le modèle proposé vise à partager les bandes spectrales entre les utilisateurs secondaires pour maximiser l'utilité globale de tous les utilisateurs secondaires. Pour cela, une allocation conjointe des bandes spectrales et de la puissance de transmission est proposée. Trois fonctions d'utilité sont étudiées dans ce travail : (i) maximisation de la somme des débits de transmission des utilisateurs secondaires (*Maximization of the Sum data Rate of STs*, MSR), (ii) maximisation de la somme des débits de transmission tout en assurant l'équité entre les utilisateurs secondaires (*Fair Maximization of the Sum data Rate of STs*, FMSR) et (iii) maximisation du nombre de transmissions secondaires servies (*Maximization of the Number of Served secondary transmissions*, MNS). Le modèle étant NP-difficile, nous avons proposé la méthode SQP (*Sequential Quadratic Programming*) pour résoudre le problème non linéaire proposé.

Les résultats de simulations ont montré que le modèle proposé est équitable à 90% en utilisant l'indice de Jain dans les trois cas. Quand l'historique des allocations est important, le modèle peut être équitable à 98% dans le cas du MNS et du FMSR. Cependant, l'équité assurée dans le cas du MNS est meilleure par rapport aux cas du MSR et FMSR. D'un autre côté, le MSR maximise la somme des débits de transmission des utilisateurs secondaires. Le MNS maximise le nombre des transmissions secondaires servies. La fonction d'utilité du FMSR est considérée comme un compromis entre les deux autres fonctions d'utilité puisque elle assure des performances intermédiaires en terme de la somme des débits de transmission et le nombre des utilisateurs secondaires

servis.

Nous présentons aussi quelques propositions pour des travaux futurs pour améliorer ce travail.

- Faire des simulations plus poussées en se basant sur des tests de performances réels (*benchmark*) pour tester le modèle et l'algorithme proposé.
- Étudier les imperfections dans la collecte d'informations concernant les transmissions primaires et secondaires. Le modèle proposé suppose avoir les informations sur le gain des canaux. Il sera utile d'étudier la robustesse du modèle proposé face à l'imperfection du système, si l'une des de ces informations est erronée ou obsolète.
- Le modèle proposé dans ce mémoire suppose que chaque transmission primaire ou secondaire a le droit d'utiliser une seule bande. Nous pourrions aussi traiter le cas où les utilisateurs peuvent utiliser plusieurs bandes spectrales pour effectuer leurs transmissions.
- Il sera très utile d'étudier la mobilité des liens primaires. Par exemple, les transmissions primaires utilisent leurs bandes selon une distribution donnée (par exemple, les utilisateurs primaires utilisent leurs bandes en suivant une distribution de poisson).
- Renforcer le modèle proposé en introduisant la priorité des utilisateurs secondaires. Par exemple, un utilisateur secondaire qui a déjà effectué plusieurs transmissions durant plusieurs périodes d'allocation, est plus prioritaire qu'à un utilisateur qui vient d'entrer dans le système.

BIBLIOGRAPHIE

- Akter, L., et B. Natarajan. 2010. « Modeling fairness in resource allocation for secondary users in a competitive cognitive radio network ». In *IEEE Wireless Telecommunications Symposium (WTS)*, p. 1–6.
- Akyildiz, I., W. Lee, M. Vuran et S. Mohanty. 2006. « Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks : a survey ». *Computer Networks*, vol. 50, no. 13, p. 2127–2159.
- . 2008. « A survey on spectrum management in cognitive radio networks ». *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, p. 40–48.
- Attar, A., M. Nakhai et A. Aghvami. 2009. « Cognitive radio game for secondary spectrum access problem ». *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 4, p. 2121–2131.
- Boggs, P., et J. Tolle. 1995. « Sequential quadratic programming ». *Acta numerica*, vol. 4, no. 1, p. 1–51.
- Boyd, S., et L. Vandenberghe. 2004. *Convex optimization*. Cambridge Univ Pr.
- Catreux, S., V. Erceg, D. Gesbert et R. Heath Jr. 2002. « Adaptive modulation and mimo coding for broadband wireless data networks ». *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 6, p. 108–115.
- Chen, K., Y. Peng, N. Prasad, Y. Liang et S. Sun. 2008. « Cognitive radio network architecture : part i—general structure ». In *Proceedings of the 2nd international conference on Ubiquitous information management and communication*, p. 114–119. ACM.
- Chen, Q., Q. Zhang et Z. Niu. 2009. « A graph theory based opportunistic link scheduling for wireless ad hoc networks ». *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 10, p. 5075–5085.
- Chung, S., et A. Goldsmith. 2001. « Degrees of freedom in adaptive modulation : a unified view ». *IEEE Transactions on Communications*, vol. 49, no. 9, p. 1561–1571.
- Conn, A., N. Gould et P. Toint. 2000. *Trust-region methods*. T. 1. Society for Industrial Mathematics.
- Driouch, E., et W. Ajib. 2009. « An efficient scheduling algorithm for downlink multi-antenna cdma systems ». In *IEEE International Symposium on a World of Wi-*

- reless, *Mobile and Multimedia Networks Workshops, 2009. WoWMoM 2009*, p. 1–9.
- Driouch, E. M., et W. Ajib. 2012. « On the user scheduling in cognitive radio mimo networks ». In *IEEE Globecom - Cognitive Radio and Netw. Symp. (GC12 CogRN)*, Anaheim, CA, USA.
- Etkin, R., A. Parekh et D. Tse. 2007. « Spectrum sharing for unlicensed bands ». *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 25, no. 3, p. 517–528.
- Feizresan, H., et M. Omid. 2009. « Spectrum sharing in cognitive radio networks ».
- Felegyhazi, M., M. Cagalj, S. Bidokhti et J. Hubaux. 2007. « Non-cooperative multi-radio channel allocation in wireless networks ». In *IEEE 26th INFOCOM. International Conference on Computer Communications*, p. 1442–1450.
- Ferkouss, O. E., et W. Ajib. 2012a. « Efficient and fair resource allocation for cognitive radio networks ». *IEEE Transactions on Wireless Communications*.
- . 2012b. « Game theory based resource allocation for cognitive radio networks ». In *IEEE Globecom - Cognitive Radio and Netw. Symp. (GC12 CogRN)*, Anaheim, CA, USA.
- Gintis, H. 2000. *Game theory evolving : A problem-centered introduction to modeling strategic behavior*. Princeton Univ Pr.
- Grossmann, I., et Z. Kravanja. 1995. « Mixed-integer nonlinear programming techniques for process systems engineering ». *Computers & chemical engineering*, vol. 19, p. 189–204.
- Hahne, E. 1991. « Round-robin scheduling for max-min fairness in data networks ». *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 9, no. 7, p. 1024–1039.
- Han, Z., D. Niyato, W. Saad, T. Başar et A. Hjørungnes. 2011. *Game theory in wireless and communication networks : theory, models, and applications*. Cambridge Univ Pr.
- Haykin, S. 2005. « Cognitive radio : brain-empowered wireless communications ». *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 2, p. 201–220.
- Holmström, K. 1999. « The tomlab optimization environment in matlab ». *Adv. Model. Optim..* no. 1, p. 47–69.
- Ianculescu, C., et A. Mudra. 2005. « Cognitive radio and dynamic spectrum sharing ». In *SDR technical conference*, p. 14–18.
- Jackson, M. 2000. « Mechanism theory ». *The Encyclopedia of Life Support Systems*.
- Jain, R., D. Chiu et W. Hawe. 1984. « A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems ». *DEC research report*

TR-301.

- Jain, R., A. Duresi et G. Babic. 1999. Throughput fairness index : An explanation. Rapport, Tech. rep., Department of CIS, The Ohio State University.
- Kelly, F., A. Maulloo et D. Tan. 1998. « Rate control for communication networks : shadow prices, proportional fairness and stability ». *Journal of the Operational Research society*, p. 237–252.
- Kolodzy, P., et al. 2001. « Next generation communications : Kickoff meeting ». In *Proc. DARPA*. T. 10.
- Lan, T., D. Kao, M. Chiang et A. Sabharwal. 2010. *An axiomatic theory of fairness in network resource allocation*. IEEE.
- Makowski, L., et J. M. Ostroy. 1987. « Vickrey-clarke-groves mechanisms and perfect competition ». *Journal of Economic Theory*, vol. 42, no. 2, p. 244–261.
- Mathur, S., L. Sankaranarayanan et N. Mandayam. 2006. « Coalitional games in gaussian interference channels ». In *IEEE International Symposium on Information Theory*, p. 2210–2214.
- Mitola III, J., et G. Maguire Jr. 1999. « Cognitive radio : making software radios more personal ». *IEEE Personal Communications*, vol. 6, no. 4, p. 13–18.
- Mitran, P., L. Le, C. Rosenberg et A. Girard. 2008. « Resource allocation for down-link spectrum sharing in cognitive radio networks ». In *IEEE 68th Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall*, p. 1–5.
- NIE, P. Y. 2003. « Composite-step like filter methods for equality constraint problems ». *J. Comput. Math. Optim.*, vol. 21, no. 5, p. 613–624.
- Peha, J. 1998. « Spectrum management policy options ». *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 1, no. 1, p. 2–8.
- Pei-Pei, C., Z. Qin-Yu, W. Ye et M. Jing. 2010. « Multi-objective resources allocation for ofdm-based cognitive radio systems ». *Information Technology Journal*, vol. 9, no. 3, p. 494–499.
- Rajasekharan, J., J. Eriksson et V. Koivunen. 2011. « Cooperative game theory and auctioning for spectrum allocation in cognitive radios ». In *IEEE 22nd Int. Symp. on Personal Indoor and Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, p. 656–660.
- Shetty, M. 1993. *Nonlinear programming*. Wiley Online Library.
- Sun, W. 1998. « Newton's method and quasi-newton-sqp method for general lc1 constrained optimization ». *Applied mathematics and computation*, vol. 92, no. 1, p. 69–84.
- Tang, J., S. Misra et G. Xue. 2008. « Joint spectrum allocation and scheduling for fair spectrum sharing in cognitive radio wireless networks ». *Computer Networks*,

- vol. 52, no. 11, p. 2148–2158.
- Tang, L., H. Wang et Q. Chen. 2010. « Power allocation with max-min fairness for cognitive radio networks ». In *Global Mobile Congress (GMC)*, p. 1–5. IEEE.
- Tzallas-regas, G., et B. Rustem. 2010. « Switching stepsize strategies for SQP ».
- Vickrey, W. 1961. « Counterspeculation, auctions, and competitive sealed tenders ». *The Journal of finance*, vol. 16, no. 1, p. 8–37.
- Wang, B., Y. Wu et K. Liu. 2010. « Game theory for cognitive radio networks : An overview ». *Computer Networks*, vol. 54, no. 14, p. 2537–2561.
- World, W., L. Berlemann, G. Dimitrakopoulos et K. Moessner. 2005. « Cognitive radio and management of spectrum and radio resources in reconfigurable networks ». *Wireless World*, p. 28.
- Xu, H., et B. Li. 2010. « Efficient resource allocation with flexible channel cooperation in ofdma cognitive radio networks ». In *IEEE INFOCOM Proceedings*, p. 1–9.
- Yaïche, H., R. Mazumdar et C. Rosenberg. 2000. « A game theoretic framework for bandwidth allocation and pricing in broadband networks ». *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 8, no. 5, p. 667–678.
- Yan, G., et D. Rawat. 2011. « Spectrum sensing methods and dynamic spectrum sharing in cognitive radio networks : A survey ». *International Journal of Research and Reviews in Wireless Sensor Networks (IJRRWSN)*, vol. 1, no. 1.
- Yang, C., J. Li et Z. Tian. 2010. « Optimal power control for cognitive radio networks under coupled interference constraints : a cooperative game-theoretic perspective ». *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 4, p. 1696–1706.
- Zhang, Y., et C. Leung. 2009. « Resource allocation for non-real-time services in ofdm-based cognitive radio systems ». *IEEE Communications Letters*, vol. 13, no. 1, p. 16–18.