

UNIVERSITE SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH  
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES FÈS  
DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE



## PROJET DE FIN D'ETUDES

MASTER SCIENCES ET TECHNIQUES  
SYSTEMES INTELLIGENTS & RESEAUX

---

# Réseaux Radio Cognitifs

---

LIEU DE STAGE : LABORATOIRE SIGNAUX SYSTEMES ET COMPOSANTS(LSSC),  
FST FÈS

RÉALISÉ PAR : *AIT AMEUR Lahssaine*

ENCADRÉ PAR : *Mme Fatima MRABTI*

SOUTENU LE 22/06/2012

DEVANT LE JURY COMPOSÉ DE :

*Mme A.Begdouri Président*

*Mme I.Chaker Examineur*

*Mme F.MRABTI Examineur*

*Mr M.Ouzarf Examineur*

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2011-2012



## *Dédicace*

### *A mes chers parents*

*Pour vos encouragements, votre immense amour, votre soutien et l'éducation que vous m'avez donnée depuis l'enfance. Vos conseils m'ont permis d'atteindre le but espéré et désiré. Aucune dédicace ne pourrait exprimer l'amour, le dévouement et l'estime que je vous porte.*

### *A mes frères et mes sœurs*

*Veillez trouver dans ce travail, le témoignage de l'attachement et des sentiments fraternels les plus sincères. Je vous souhaite le bonheur, le succès et une vie pleine de joie.*

### *A mes ami(e)s*

*Avec tous mes amours et mes attachements, veuillez accepter mes sentiments les plus sincères et je vous souhaite tout le bonheur et le succès.*



## *Remerciements*

*Je voudrais tout d'abord remercier Monsieur ZARGHILI Arsalane pour m'avoir accueilli dans son équipe de recherche de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès pour effectuer un Master en Informatique option systèmes intelligents et Réseaux.*

*Je tiens à exprimer ma plus vive reconnaissance à mon Directrice de Recherche, Madame MRABTI Fatiha. Je la remercie très sincèrement pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant de diriger cette recherche. Son soutien, sa disponibilité, ses précieux conseils, m'ont permis d'achever ce travail. Enfin, je tiens à la remercier pour ses qualités humaines d'écoute et son soutien moral pendant les moments difficiles.*

*Je tiens tout d'abord à remercier l'ensemble des personnes qui m'ont fait l'honneur d'être membres de mon jury*

*Mes plus sincères remerciements vont également à tous les professeurs et les personnels de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès pour m'avoir donné des cours de très bonne qualité et pour leur soutien tout au long de mes études à la FST.*

*Je remercie également l'ensemble des membres de laboratoire SSC (Signaux, Systèmes et Composants) ainsi que les thésards pour leur accueil chaleureux, mais aussi pour les conseils et explications qu'ils ont su me fournir et pour une ambiance de travail particulièrement favorable.*

*Je tiens à remercier également les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin tout au long de ce travail*

*Enfin un grand merci à mes amis, chers frères, mes bien chères sœurs et surtout à mes parents pour m'avoir toujours soutenu et encouragé.*

## Présentation du laboratoire d'accueil

Ce Projet de Fin d'Etude a été effectué avec l'équipe de recherche signaux Systèmes et Télécom du (LSSC) du département génie électrique de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès. Ce laboratoire a été créé en 1996 et il est composé de quatre équipes de recherche qui développent les thèmes suivants (Figure 1) :

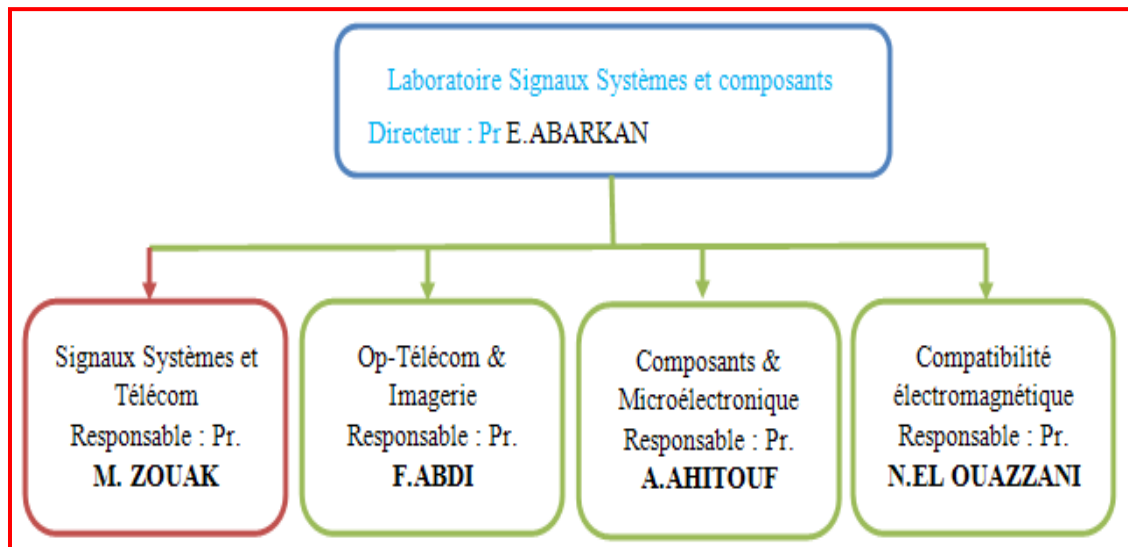


Figure 1: Structure du laboratoire signaux systèmes et composants

### Equipe 1: Signaux systèmes et télécommunication

- ✓ Localisation de ressources en radiocommunication mobile.
- ✓ Formation à distance: E-Learning.
- ✓ Intelligence artificielle: Réseaux de neurones & algorithmes génétiques.
- ✓ Robotique.

### Equipe 2: Composants et microélectronique

- ✓ Technologie des composants électroniques, optiques et des capteurs.
- ✓ Composants à base de semi-conducteur, de faibles dimensionnalités - nano structures.
- ✓ Modélisation, caractérisations et tests de fiabilité.
- ✓ CAO des circuits intégrés et description par VHDL.
- ✓ Conception d'IP pour la compression et le traitement d'images statiques et dynamiques (JPEG, JPEG 2000,...).
- ✓ La compatibilité électromagnétique dans les circuits intégrés.



### **Equipe 3: OP télécoms et Imagerie**

- ✓ Etude des composants avancés pour les télécommunications et le traitement de l'information
- ✓ Imagerie

### **Equipe 4: CEM – électronique - Hyperfréquence**

- ✓ Etude des antennes des circuits rapides et CEM.



## *Liste des abréviations*

- ADS:** Accès dynamique au spectre  
**ANRT:** Agence National de Règlementation de Télécommunications  
**CRA:** Cognitive Radio Architecture  
**CRTC:** Canadian Radio-Television and Telecommunications Commission  
**DEUM:** Dynamic Exclusive Use Model  
**FCC:** Federal Communications Commission  
**GSM:** Global System for Mobile  
**HAM:** Hierarchical Access Model  
**HMM:** Modèles de Markov Cachés  
**IA:** Intelligence Artificielle  
**IEEE:** Institute of Electrical and lectronics Engineers  
**ISM:** Industrielle, Scientifique et Médicale  
**LTM:** Long Term Memory  
**OPRS:** Open source planning Tools  
**OSA:** Accès Opportuniste au Spectre  
**POMDP:** Processus de Décision Markovien Partiellement Observé  
**QoS:** Qualité de Service  
**QoI:** Quality of Information  
**RF:** Radio fréquence  
**RRC:** Réseaux à Radios Cognitifs  
**RSB:** Rapport Signal à Bruit  
**RXML:** Radio XML  
**SDR:** Software Defined Radio  
**SMA:** Systèmes Multi Agents  
**SOA:** Spectrum Overlay Approach  
**SP:** Sensorial Perception  
**STM:** Short Term Memory  
**SUA:** Spectrum Underlay Approach  
**TAR:** Technologie d'Accès Radio



## Sommaire

<i>Dédicace</i> -----	1
<i>Remerciements</i> -----	2
<i>Présentation du laboratoire d'accueil</i> -----	3
<i>Liste des abréviations</i> -----	5
<i>Liste des Figures</i> -----	8
<i>Introduction Générale</i> -----	9
<b>Chapitre1 : Le Réseau Radio Cognitif</b> -----	<b>10</b>
<b>I. Introduction</b> -----	<b>11</b>
<b>I. Architecture de RRC</b> -----	<b>12</b>
I.1 Les Réseaux Primaires (RP) -----	12
I.2 Les Réseaux Secondaires (RS)-----	13
<b>II. Cycle Cognitif</b> -----	<b>15</b>
II.1 La capacité cognitive -----	15
II.2 La capacité d'auto-configuration-----	17
II.3 La capacité d'auto-organisation -----	18
<b>III. Les types d'accès</b> -----	<b>19</b>
<b>IV. Fonctionnement des RRC</b> -----	<b>21</b>
<b>Chapitre2 : La Détection des Bandes Libres</b> -----	<b>23</b>
<b>I. Introduction</b> -----	<b>24</b>
<b>II. L'évolution d'accès au spectre radio</b> -----	<b>25</b>
<b>III. L'accès dynamique et statique au spectre</b> -----	<b>25</b>
III.1 Accès statique au spectre -----	25
III.2 Accès dynamique au spectre-----	26



<b>IV. Méthodes de détection des bandes libre</b>	<b>27</b>
IV.1 Méthode énergétique: radiomètre	28
IV.2 Méthode de Détection Cyclostationnaire	29
<b>Chapitre3: Méthodes de diffusion du spectre</b>	<b>31</b>
<b>I. Introduction</b>	<b>32</b>
<b>II. Les méthodes d'accès et de diffusion du spectre.</b>	<b>32</b>
II.1 Méthode Des Enchères	32
II.2 Méthode de Théorie des jeux	33
II.3 Méthodes des Systèmes Multi Agents	33
II.4 Les approches de Markov:	34
<b>III. Partie Simulation</b>	<b>34</b>
III.1 Le Modèle POMDP	35
III.2 Modélisation du Système et Résultats de Simulation	36
III.3 Résultats Numériques	38
<b>Conclusion et Perspectives</b>	<b>41</b>
<b>References</b>	<b>42</b>





## Liste des Figures

Figure 1: Structure du laboratoire signaux systèmes et composants .....	3
Figure 2: L'évolution de réseaux radio cognitive.....	12
Figure 3: le fonctionnement des réseaux secondaires .....	14
Figure 4: Exemple de trous spectraux .....	15
Figure 5: Cycle de cognition de Mitola .....	16
Figure 6: RRC opérant sur les bandes spectrales licenciées.....	20
Figure 7: Réseau à radio cognitive opérant sur les bandes spectrales non licenciée.....	21
Figure 8: Classification des modèles de l'accès dynamique au spectre radio .....	26
Figure 9: Bloc d'un détecteur radiomètre .....	28
Figure 10: RSB minimum requis: bruit non certain $U=3\text{dB}$ .....	28
Figure 11: Diagramme d'état pour $N=2$ de Markov .....	36
Figure 12: Occupation de spectre pour $N$ canaux.....	37
Figure 13: Occupation de spectre pour $N=2$ .....	38
Figure 14: Structure d'une slot .....	38
Figure 15:Exécution du protocole optimal d'occupation de spectre.....	38
Figure 16 : Exécution du protocole optimal ( $N=2$ ) et ( $B=2$ ) d'occupation de spectre .....	39
Figure 17: performances de l'approche gloutonne avec la stratégie optimale.....	40



## *Introduction Générale*

Une étude réalisée par Federal Communications Commission (FCC) a montré que certaines bandes de fréquences sont partiellement occupées dans des emplacements et à des moments particuliers. C'est dans ce cadre que des études sont menées dans le domaine des réseaux radios cognitifs (RRC).

Le (RRC) est un système qui permet à un terminal de pouvoir interagir avec son environnement en le percevant et le modélisant afin de s'y adapter [1].

L'idée du RRC est de partager le spectre entre un utilisateur dit Secondaire, et un Utilisateur dit primaire dans l'objectif d'une exploitation maximal du spectre radio.

Pour que cela fonctionne, l'utilisateur secondaire doit être capable de détecter les espaces blancs (des portions inutilisées de la bande de fréquences allouée), de se configurer pour transmettre, de détecter le retour de l'utilisateur primaire et ensuite cesser de transmettre et chercher un autre espace blanc.

Ce mémoire a pour objectif de faire une étude bibliographique de ce thème qu'est les réseaux radio cognitifs. Et on va commencer à tester les acquis on simulons une méthode de diffusion de spectre basée sur la théorie du processus de décision partiellement observable de Markov (POMDP). Cette approche intègre la conception des protocoles d'accès au spectre à la couche de MAC.

Le travail présenté dans ce mémoire sera décrit en trois chapitres :

Le premier chapitre portera sur la radio cognitive, sa définition, architecture, fonctionnement.

Deuxième chapitre traitera les différentes méthodes de détection des bandes libres à savoir la méthode radiomètre et la méthode cyclostationnaire avec les avantages et les inconvénients de chacune.

Dans le troisième chapitre nous présenterons les différentes méthodes de diffusion et d'accès au spectre, tels que, théorie des enchères, théorie des jeux, modèle multi agents, et enfin le modèle de Markov. Aussi on donnera les résultats de simulation du cas d'accès au spectre on appliquons le Processus de Décision Markovien Partiellement Observé.



# *Chapitre 1*

## *Le Réseau Radio Cognitif*



## I. Introduction

En transmission radio (tel en GSM, WiFi...), certaines bandes de fréquences sont d'ores et déjà surchargés aux heures de pointe. Cependant, l'utilisation du spectre de fréquence n'est pas uniforme: selon les heures de la journée ou la position géographique, une bande fréquentielle peut être surchargée pendant qu'une autre reste inutilisée. Chose qui mène à une perte en capacité d'utilisation de fréquences dans un réseau licencié.

Chose qui a mené à introduire la notion du cognitif [2]. Il s'agit de mettre en place un réseau non licencié capable d'étudier l'environnement radio et de détecter les fréquences libres afin de les attribuer à d'autres utilisateurs. C'est les Réseaux Radio Cognitif (RRC).

Un Réseau Radio Cognitif (RRC) [3], est un ensemble de matériels et logiciels fonctionnant de manière dynamique et autonome dans l'environnement de travail, et ceci on exploite l'intelligence artificielle (IA).

IA c'est la construction de programmes informatiques qui s'adonnent à des tâches qui sont, pour l'instant, accomplies de façon plus satisfaisante par des êtres humains car elles demandent des processus mentaux de haut niveau tels que: l'apprentissage perceptuel, l'organisation de la mémoire et le raisonnement critique. C'est aussi Aptitude à s'adapter à une situation, à choisir en fonction des circonstances.

Les techniques d'IA peuvent être utiles pour utiliser le processus d'apprentissage dans le RRC. Les techniques d'IA qui ont été proposées dans la littérature comme des candidats possibles pour la RRC sont :

- Réseaux de neurones artificiels
- Algorithmes méta-heuristiques
- Modèle de Markov caché

Les RRCs ont vu le jour vers la fin du siècle dernier et ils sont encore dans la recherche (figure 2). Ils peuvent s'appliquer dans diverse domaines tel que:

- Amélioration de l'efficacité spectrale ;
- Amélioration de la fiabilité du lien radio ;
- Automatisation de la gestion des ressources radio.

Ces applications nécessitent une modification au niveau de:

- La Topologie avancée du réseau ;
- Techniques de collaboration;

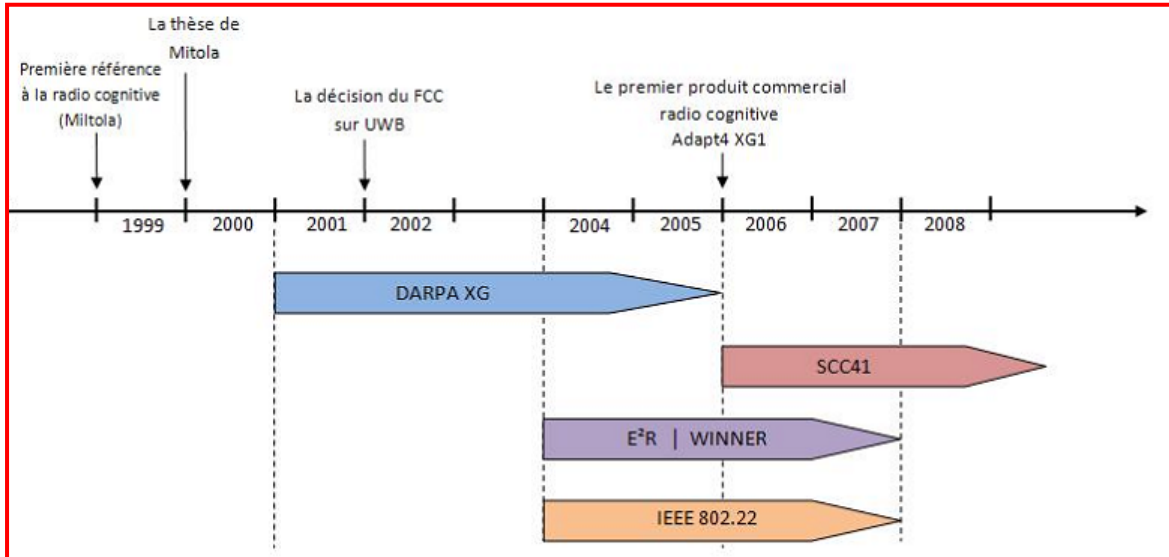


Figure 2: L'évolution de réseaux radio cognitive

## I. Architecture de RRC

L'architecture est un ensemble complet et cohérent de règles de conception par lesquelles un ensemble de composants spécifiés réalise un ensemble déterminé de fonctions et de services qui évoluent à travers divers points de conception au cours du temps. Dans cette section, nous décrirons l'architecture des RRC qui peut être décomposé en deux groupes: réseau primaire et réseau secondaire [4].

### I.1 Les Réseaux Primaires (RP)

Le réseau primaire est doté d'une licence d'exploitation de certaines bandes spectrales. Cette licence est donnée par des organismes gouvernementaux (tel l'ANRT, Agence National de Règlementation de Télécommunications, au Maroc).

Les réseaux cellulaires et les réseaux de diffusion TV sont un bon exemple de réseaux primaires dans lesquels les bandes spectrales sont propriétaires. Le réseau primaire dispose de deux composants, station de base et utilisateur (dit primaire dans notre contexte).



### I.1.1 Station de base

La station de base est une structure fixe du réseau primaire qui possède la capacité de gérer la bande spectrale allouée. En système cellulaire c'est le contrôleur de stations de bases et le point d'accès en WiFi.

### I.1.2 Utilisateur Primaire (UP)

Utilisateur final dans un réseau primaire. C'est un client doté d'une permission d'accès aux ressources spectrales sous un contrat.

L'accès est contrôlé uniquement par les stations de base et ne doit subir aucune interférence des intrus.

## I.2 Les Réseaux Secondaires (RS)

C'est un réseau, dit intrus, qui accède aux ressources spectrales sans autorisation réglementaire. Il s'installe au pied d'un réseau primaire afin de profiter des spectres non utilisés par ce dernier. C'est un réseau doté du caractère "cognitif", c'est la Réseau Radio Cognitif (RRC).

Pour un fonctionnement complet (Figure 2), le réseau secondaire dispose de quatre composantes: Le courtier spectral, le serveur spectral, la station de base et l'utilisateur secondaire.

### I.2.1 Le courtier spectral

Le courtier spectral est une entité du RRC qui cherche l'information sur les fréquences libres, pour les stockées dans le serveur spectrale (base de données). Ces fréquences sont mise à jour d'une manière régulière.

### I.2.2 Serveur spectral

Le serveur spectral est une entité de stockage (base de données) du RRC qui sert à partager les ressources spectrales entre différents utilisateurs dans le même réseau. Ce serveur est connecté à un réseau secondaire et agit comme un gestionnaire d'information.

### I.2.3 Station de base des RRC

La station de base des RRCs, appelée aussi station de base non licenciée, est une infrastructure fixe avec des capacités cognitives. Elle consulte la base de données pour obtenir des fréquences libres et les attribuer aux US [5]

### I.2.4 Utilisateur Secondaire (US)

L'utilisateur secondaire (US) est un client du réseau RRC, appelé aussi utilisateur non-licencié, c'est un terminal qui ne possède pas de licence pour transmettre sur une bande spectral.

Ces utilisateurs pourront partager la bande spectrale avec les utilisateurs primaires ou bien profiter de l'absence des utilisateurs primaires pour transmettre des données sans interférer les UP.

Le fonctionnement de ces différents éléments est illustré dans le schéma suivant:

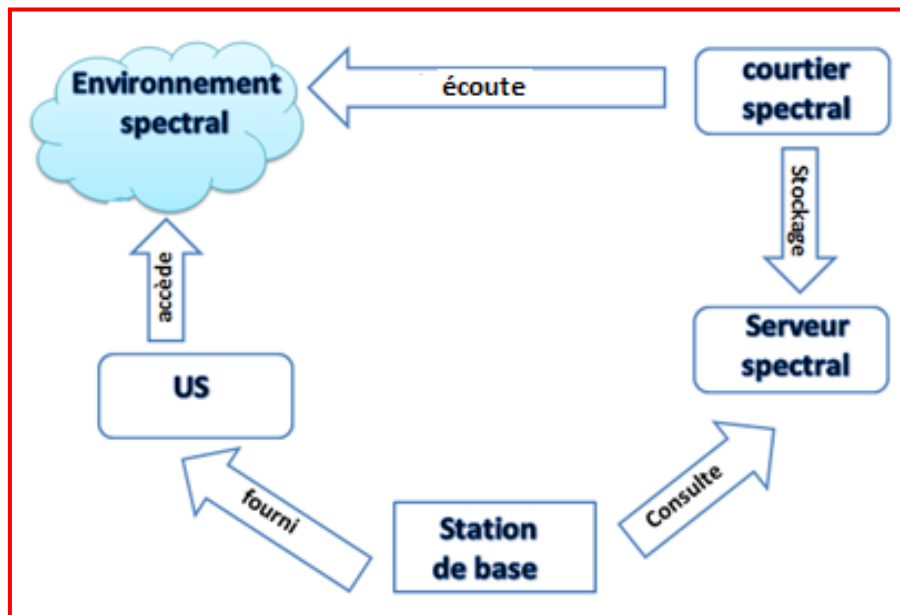


Figure 3: le fonctionnement des réseaux secondaires

Les deux réseaux, primaire et secondaire, fonctionnent selon un cycle cognitif.

## II. Cycle Cognitif

Un RRC doit être capable de réaliser trois tâches essentielles. Il doit surveiller l'environnement (capacité cognitive), analyser les informations collectées (capacité d'auto-organisation) et s'adapter à l'environnement (capacité d'auto-configuration) [6].

### II.1 La capacité cognitive

L'importante étape de la capacité cognitive est le sondage spectral. Le RRC surveille les bandes spectrales qui sont à sa portée pour détecter les trous spectraux (figure 4), qui sont des bandes de fréquences non utilisées par les UP. Pour s'y faire, le RRC devrait incorporer un mécanisme pour gérer la communication et le partage du spectre entre les UP et les US.

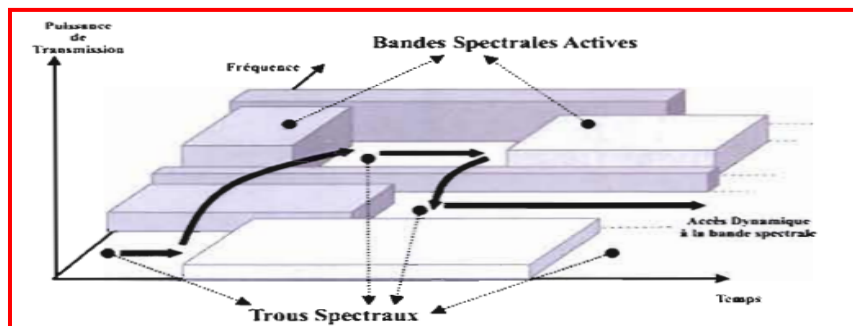


Figure 4: Exemple de trous spectraux

Le RRC doit analyser la bande spectrale. Dans cette phase, les trous spectraux sont analysés pour déterminer ceux qui offrent le meilleur service.

Puis la décision spectrale doit être faite. À cette étape et après que l'analyse des différents trous spectraux détectés ait été réalisée, le RRC commence par déterminer le débit nécessaire pour le transfert des données, le mode de transmission adéquat et la bande passante de transmission (figure 5).



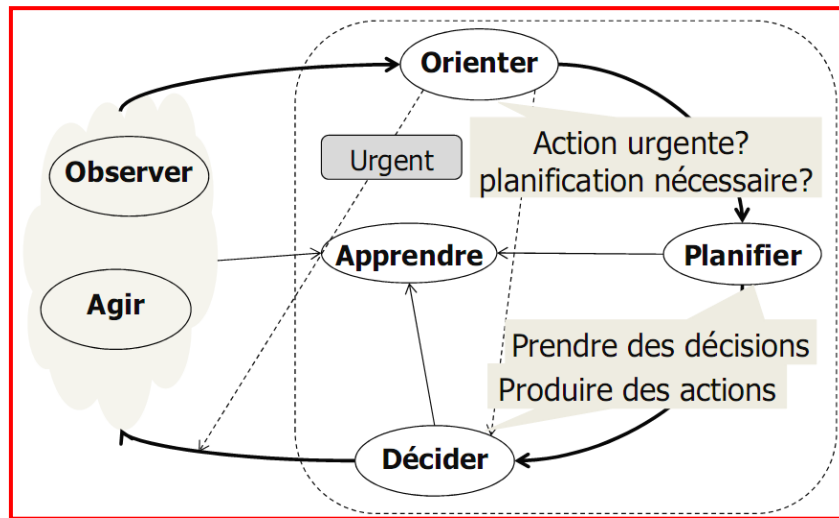


Figure 5: Cycle de cognition de Mitola

### II.1.1 Phase d'observation (détecter et percevoir)

Le RRC observe son environnement par l'analyse du flux de stimuli entrant. Cela peut inclure la surveillance de conversion audio-texte des diffusions radios (par exemple, la chaîne météo). Dans la phase d'observation, le RRC associe l'emplacement, la température, le niveau de lumière des capteurs, et ainsi de suite pour en déduire le contexte de communication [7].

### II.1.2 Phase d'orientation

La phase d'orientation détermine l'importance d'une observation en liant à celle-ci une série connue de stimuli. Cette phase fonctionne à l'intérieur des structures de données qui sont analogues à la mémoire à court terme (STM), que les gens emploient pour s'engager dans un dialogue sans forcément se souvenir de tout à la même mesure que dans la mémoire à long terme.

### II.1.3 Phase de planification

La plupart des stimuli sont traités avec délibérative plutôt qu'avec réactivité. Un message entrant du réseau serait normalement traité par la génération d'un plan (dans la phase de plan, la voie normale). Dans la recherche de qualité et de solidité industrielle des RRC, les modèles formels de la causalité seraient intégrés dans les outils de planification [8].

Ces outils permettent la synthèse de radiofréquences et des comportements d'accès à l'information dans le but d'atteindre un objectif basé sur les perceptions, les règles d'architectures radio, et les préférences de l'utilisateur appris auparavant.



#### II.1.4 Phase de décision

La phase de décision sélectionne parmi les plans candidats. La radio peut alerter l'utilisateur d'un message entrant (exemple : paging) ou reporter l'interruption à plus tard (par exemple, se comporter comme une secrétaire qui filtre les appels pendant une réunion importante) en fonction des niveaux de QoI statué dans cette phase.

#### II.1.5 Phase d'action

Cette phase lance les processus sélectionnés qui utilisent les effecteurs sélectionnés qui accèdent au monde extérieur ou aux états internes de RRC. L'accès au monde extérieur consiste principalement à composer des messages qui doivent être envoyés dans l'environnement en audio ou exprimés dans différents langages, texte, RXML... appropriés.

#### II.1.6 Phase d'apprentissage

L'apprentissage dépend de la perception, des observations, des décisions et des actions. L'apprentissage initial est réalisé à travers la phase d'observation dans laquelle toutes les perceptions sensorielles sont continuellement comparées à l'ensemble de l'expérience antérieure pour continuellement compter les événements et se souvenir du temps écoulé depuis le dernier événement.

### II.2 La capacité d'auto-configuration

La capacité d'auto-configuration permet aux ondes radios d'être dynamiquement programmées selon leur environnement. Plus spécifiquement, la radio cognitive peut être programmée pour transmettre et recevoir sur une variété de fréquences et d'utiliser différentes technologies de transmission supportées par sa conception matérielle.

Pour s'ajuster à l'environnement, divers paramètres (fréquence d'opérabilité, modulation, et la puissance de transmission) appartenant à RRC doivent être capables de se reconfigurer, selon le besoin. Ces paramètres s'accordent avec l'environnement spectral. Ces paramètres sont [9]:

#### II.2.1 Fréquence d'opérabilité

Le RRC est capable de changer de fréquence d'opérabilité lorsque cette dernière n'est plus disponible. Cette fonctionnalité se combine généralement avec une méthode (méthodes



d'accès au spectre) qui permet de sélectionner d'une manière dynamique la nouvelle bande de fréquence appropriée basée sur les informations collectées de l'environnement radio. La fréquence la plus adéquate est sélectionnée.

## II.2.2 Modulation

Le RRC reconfigure son procédé de modulation selon les besoins de l'utilisateur et selon les conditions de la bande spectrale. La modification de la modulation permet de changer les caractéristiques de transmission pour fournir des opportunités d'accès et d'utilisation de spectres.

## II.2.3 Puissance de transmission

Cette fonctionnalité permet à un dispositif de balayer entre plusieurs puissances de transmission durant le processus de transfert des données. En effet, lors du changement d'une BS (Station de Base) à une autre, les paramètres de transmission changent entre autre la puissance de transmission.

Ainsi, le contrôleur de puissance va élever le niveau de puissance, pour satisfaire les besoins de la transmission, sans dépasser les limites permises. Le contrôleur réduit la puissance pour permettre à d'autres usagers d'utiliser les mêmes BS et de diminuer l'interférence causée aux autres transmissions secondaires.

## II.3 La capacité d'auto-organisation

Nous avons vu que le RRC devrait avoir une capacité de sondage et une capacité d'auto-configuration pour répondre aux exigences de l'environnement dynamique [10]. Toutefois le RRC devrait implémenter plusieurs systèmes de gestion pour être capable de s'auto-organiser selon les fonctions de sondage et de reconfiguration :

### II.3.1 Gestion des ressources radios

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



### II.3.2 Gestion de la mobilité et la connexion

Dans les réseaux de radios cognitives, les informations sur la topologie et le routage du réseau sont complexes. Un bon mécanisme de gestion de la mobilité et de la connexion faciliterait la tâche des RRC à découvrir les voisins disponibles et à choisir la bonne route à prendre [11].

### II.3.3 Gestion de la sécurité

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

## III. Les types d'accès

Selon l'architecture présentée par [12], le RRC est un ensemble de plusieurs types de réseaux qui coexistent sur les mêmes bandes spectrales. Les auteurs soulignent qu'à cause de cette hétérogénéité, il existe différents types d'accès à ces réseaux (accès au RRC, Accès au réseau ad-hoc à RRC, Accès au réseau licencié).

#### Accès au RRC :

Les utilisateurs accèdent à leur station de base en utilisant les spectres licenciés ou non-licenciés.

#### Accès au réseau ad-hoc à radio cognitive :

Les utilisateurs peuvent communiquer entre eux à travers des connexions ad-hoc sur des spectres licenciés ou non-licenciés.

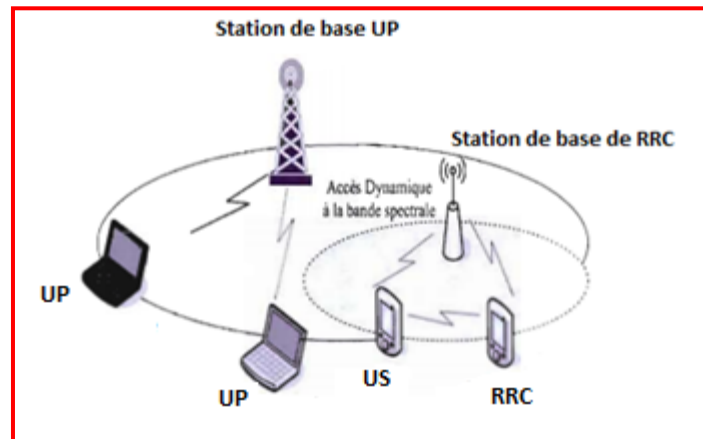
#### Accès au réseau licencié :

Les utilisateurs accèdent à la station de base en utilisant les spectres licenciés. Un modèle d'un RRC qui coexiste avec un réseau primaire est modélisé dans la Figure 5. Ces RRC partagent avec les réseaux primaires les bandes spectrales tant que celles-ci sont libres.

On peut remarquer ici l'importance à bien détecter ces opportunités afin de réaliser leurs transmissions avec succès sans générer de l'interférence aux propriétaires de la bande spectrale. D'autre part, les réseaux primaires ne font aucun effort pour protéger les

transmissions des utilisateurs de l'interférence qu'ils génèrent, d'où la nécessité de développer des techniques pour éviter ces interférences.

Enfin, lors de l'apparition des UP, les non licenciés doivent évacuer le canal et trouver une autre bande spectrale libre pour continuer la transmission sans interruption (figure 6).

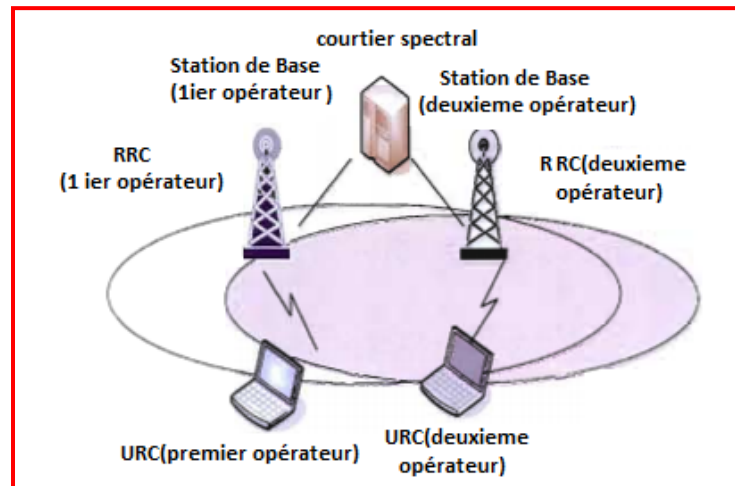


**Figure 6: RRC opérant sur les bandes spectrales licenciées**

Les bandes spectrales non-licenciées sont connues sous le nom de Bande industrielle, scientifique et médicale (bande ISM). L'usage de ces bandes devient de plus en plus important dans les nouvelles technologies de communication sans-fil comme la WiFi.

Cependant il reste beaucoup de problèmes à résoudre pour pouvoir partager le spectre entre les différents RRC d'une manière efficace. Etant donné l'absence des réseaux primaires, les RRC ont tous le même droit d'accès à ces bandes ISM. Sur ces bandes, le comportement du RRC est différent de celui des RRC opérant sur les bandes spectrales licenciées.

Le comportement des RRC sur les bandes licenciées se résume à détecter le plus efficacement possible les transmissions des utilisateurs tandis que sur les bandes-ISM les RRC se concurrencent les bandes spectrales entre eux sans se soucier de l'interférence causée aux autres RRC (figure 7).



**Figure 7: Réseau à radio cognitive opérant sur les bandes spectrales non licenciée**

Nous avons mis au point les éléments qui constituent un RRR, ainsi que son architecteur, nous présentons ci-après son fonctionnement.

Après avoir décrit les composantes d'un RRC il est nécessaire de connaître comment-elle fonctionne ?

#### IV. Fonctionnement des RRC

En effet, soit on ne tient pas compte de la dimension géographique de l'apparition des opportunités ou soit cette dimension est considérée au mieux avec une faible mobilité des transmetteurs primaires. Pour tenir compte de la mobilité des UP et donc de la variabilité géographique des opportunités, la solution idéale serait de considérer à la fois les dimensions fréquentielles, temporelles et géographiques. Théoriquement, cela nécessite d'implémenter sur une zone géographique cible un grand nombre de capteurs d'opportunité permettant d'avoir une information en tout point et en temps réel [13].

Or cette zone peut être trop large lorsque la mobilité des UP est importante. Par la suite, un grand nombre de capteurs doit être utilisé. De plus, il arrive que des capteurs soient installés à des endroits non fréquentés par les US. Ceci n'est donc pas judicieux.

Le concept de RRC propose plutôt d'incorporer ces capteurs dans les terminaux sujets de l'accès opportuniste. Ainsi, chaque terminal détecte de façon autonome au lieu où il se trouve les bandes non utilisées par les UP. Ensuite, la mobilité des terminaux (capteurs) permet de pallier le manque d'informations sur la dimension géographique d'une part et de n'avoir cette



information que sur la zone d'activité des UP d'autre part. Ce qui permet donc une réutilisation des bandes libres sans interférence aux UP [14].

Le concept cité dans ce chapitre sert à donner des notions sur les RRC, leurs origines, ses composantes fonctionnelles et leur architecteur.

Les méthodes de détections des fréquences libres et méthodes d'attribution de ces fréquences feront l'objet de deuxième et troisième chapitre.



# *Chapitre 2*

## *La Détection des Bandes Libres*





## I. Introduction

Par opposition aux systèmes actuels où l'allocation de spectre est statique, les terminaux radio cognitive de demain pourront chercher et utiliser de manière dynamique des fréquences pour l'accès au réseau en détectant les bandes libres du spectre radio. Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux différentes méthodes de détection d'un signal en précisant leurs avantages et leurs inconvénients. Ensuite, deux méthodes de détection : cyclostationnaire dite détection multi-cycles et énergétique dite radiomètre seront étudiées. Puis les avantages et les inconvénients de chacune

Dans la littérature, on peut trouver plusieurs définitions d'une bande de fréquence libre. Nous considérons qu'une bande de fréquence est libre lorsque le signal radio filtré sur cette bande est seulement composé du bruit (thermique) [15]. Dans le cas contraire, ce signal sera constitué d'un nombre inconnu mais non nul de signaux de télécommunication en plus du bruit. Ceci est un problème de détection binaire des signaux que l'on reformule comme un problème de test d'hypothèses. Deux hypothèses sont possibles  $H_0$  et  $H_1$ :

$$H_0: y(t)=b(t) \quad (1)$$

$$H_1: y(t)=b(t)+x(t)$$

La résolution de ce problème largement abordé dans le passé, dépend du degré de connaissance que l'on dispose sur le bruit ou/et le signal. Si l'on considère un bruit stationnaire blanc gaussien et si l'on dispose d'une connaissance suffisante sur le signal, alors on peut envisager l'utilisation du filtrage adapté à la forme du signal attendu [16].

La principale difficulté de cette détection est d'obtenir une bonne estimation de la variance du bruit en raison du caractère non coopératif de l'accès opportuniste. Comme le signal recherché est du type télécom, une alternative intéressante consiste à choisir un modèle cyclostationnaire plutôt qu'un modèle stationnaire du signal. Ce modèle est d'autant plus intéressant lorsque le bruit est du type stationnaire [17].

Le problème de détection de (1) se résume à un test de présence du caractère cyclostationnaire du signal testé. Plusieurs articles et notamment proposent différents tests sur une fréquence cyclique donnée. Tester la présence d'un signal quelconque de fréquence



cyclique inconnue dans un intervalle donné nécessite de répéter l'un de ces tests autant de fois que la longueur de l'intervalle l'exige.

## II. L'évolution d'accès au spectre radio

La première transmission radio remonte à 1896 lorsque Marconi réussissait pour la première fois à transmettre de l'information sur les ondes radio. Cette découverte, connue aujourd'hui sous le sigle TSF (Télégraphe Sans Fil), fait suite aux travaux pionniers de Maxwell et Hertz sur l'électromagnétisme. Mais la révolution la plus importante va se produire en 1901 quand Marconi arrive à établir une transmission radio transatlantique ouvrant ainsi une nouvelle ère des télécommunications longues distances.

En 1971, dans le but d'optimiser l'utilisation de cette ressource, apparaît le concept cellulaire qui consiste à partager l'espace géographique en motifs, constitué chacun d'entre eux d'un nombre défini de cellules. Il devient alors possible de réutiliser le même canal radio sur chaque motif. Le partage du spectre, jusqu'alors limité aux seules dimensions fréquentielle et temporelle, considère la nouvelle dimension géographique [18].

Au lendemain de cette découverte, les TSF de première génération communiquaient tous sur la même fréquence. L'augmentation de leur nombre et de leur puissance ne tardent pas à poser de problèmes puisque les interférences entre émetteurs rendaient fréquemment impossible une réception correcte des messages. De nouveaux procédés ont été alors mis en œuvre pour accorder les stations d'émission et de réception sur des longueurs d'ondes choisies, marquant ainsi le début du partage du spectre selon sa dimension fréquentielle.

## III. L'accès dynamique et statique au spectre

### III.1 Accès statique au spectre

L'accès statique où chaque TAR (Technologie d'Accès Radio) dispose de droits exclusifs sur sa bande de fréquences dédiée,

### III.2 Accès dynamique au spectre

L'ADS permet plus de flexibilité en termes de partage de cette bande avec d'autres systèmes tout en évitant les interférences entre Tars. Pour cela, plusieurs approches de l'ADS ont été proposées.

Afin de bien différencier chacune de ces approches, une classification en sous modèles est présentée dans la figure 8.

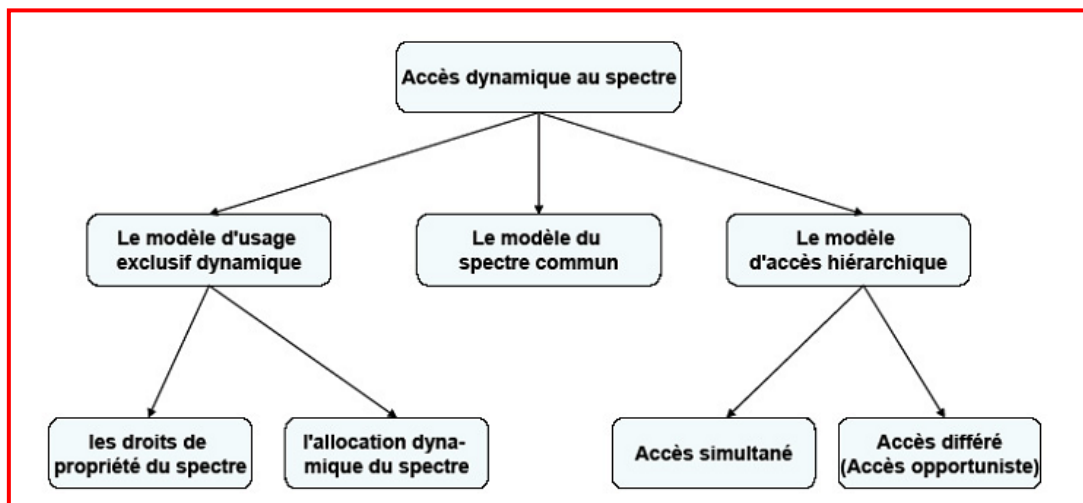


Figure 8: Classification des modèles de l'accès dynamique au spectre radio

Le modèle d'usage exclusif dynamique (Dynamic Exclusive Use Model) s'inspire de la politique actuelle de gestion du spectre où chaque bande de fréquences est à usage exclusif. Cependant, ce modèle introduit plus de flexibilité pour améliorer l'efficacité spectrale sans toutefois éliminer les trous observés dans l'utilisation du spectre.

Deux approches sont proposées dans ce modèle: les droits de propriété du spectre (Spectrum propre rights Approcha) et l'allocation dynamique du spectre (Dynamics Spectrum allocation Approach). La première approche donne plus de droits à un utilisateur du spectre dans la gestion de sa bande allouée. Il est ainsi libre de la sous-louer, de la partager avec une contre partie, de choisir sa technologie radio, etc.

La deuxième approche stipule qu'à un instant donné et à un lieu géographique précis, une bande allouée est une bande à usage exclusif. Mais cette allocation peut être dynamique en fonction de la demande et non statique comme c'est le cas dans la politique actuelle [19].



. Le modèle du spectre commun (Spectrum Commons ou Open Sharing Model) propose l'idée d'un spectre à accès ouvert s'inspirant du succès suscité par l'accès sans licence des bandes ISM

Deux approches peuvent être classées suivant ce modèle: l'approche à accès simultané SUA (Spectrum Underlay Approach) et l'approche à accès différé SOA (Spectrum Overlay Approach).

Dans l'approche à accès simultané, les US accèdent aux ressources spectrales partagées au même moment que les UP tout en respectant des contraintes sévères en termes de puissance d'émission. Pour cela, les US doivent étaler leur spectre d'émission sur une large bande afin d'apparaître comme du bruit au regard des UP.

De ce fait, aucune détection des UP n'est effectuée car on se place dans le pire cas (i.e. les UP transmettent continuellement). Les transmissions à courte portée, haut débit et faible puissance de transmission sont les principales concernées par cette approche.

#### **IV. Méthodes de détection des bandes libre**

L'objectif de ce travail est de répondre à la question de détection des bandes de fréquences libres. Le cadre d'étude est l'accès opportuniste au spectre radio.

Deux méthodes de détection sont envisageables [20]. La détection d'énergie est une méthode simple, de complexité de calcul réduite et n'exigeant aucune information sur le signal à détecter, mais elle nécessite une connaissance exacte de la variance du bruit supposé blanc gaussien. La détection cyclostationnaire est plus robuste vis-à-vis des incertitudes d'estimation de la variance du bruit et capable de détecter des signaux à faibles Rapport Signal à Bruit (RSB)

Cependant, pour minimiser le temps de détection des bandes libres, nous proposons une architecture hybride de détection combinant les détections d'énergie et cyclostationnaire.

## IV.1 Méthode énergétique: radiomètre

La détection énergétique ou radiomètre repose sur un modèle stationnaire et déterministe du signal noyé dans un bruit stationnaire blanc gaussien et de densité spectrale mono-latérale  $\sigma_0$  connue. Un diagramme simplifié du radiomètre est donné par la figure 9:

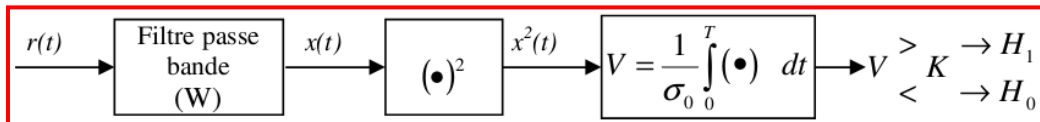


Figure 9: Bloc d'un détecteur radiomètre

Nous démontrons que le test statistique  $V$  suit une loi chi-deux ( $\chi^2$ ) à  $2TW$  degrés de liberté. Sous l'hypothèse  $H_0$ , cette loi est centrée alors que sous  $H_1$  elle est non centrée avec un paramètre de non centralisation  $\lambda$  égale à  $E_s/\sigma_0$ ,  $E_s$  étant l'énergie du signal  $S(t)$ . Pour  $TW$  de plus en plus grand, la statistique  $V$  tend à être une variable gaussienne [21].

Le résultat théorique montre que le radiomètre peut détecter un faible signal dans le bruit. Cependant ce résultat suppose une connaissance précise du niveau de bruit  $\sigma_0$ . Dans le cas contraire, par exemple  $(1-\varepsilon_1)\sigma_0 \leq \hat{\sigma}_0 \leq (1+\varepsilon_2)\sigma_0$ , les performances du radiomètre se dégradent même lorsqu'on augmente indéfiniment  $TW$  comme le montre le tracé théorique de la figure 9.

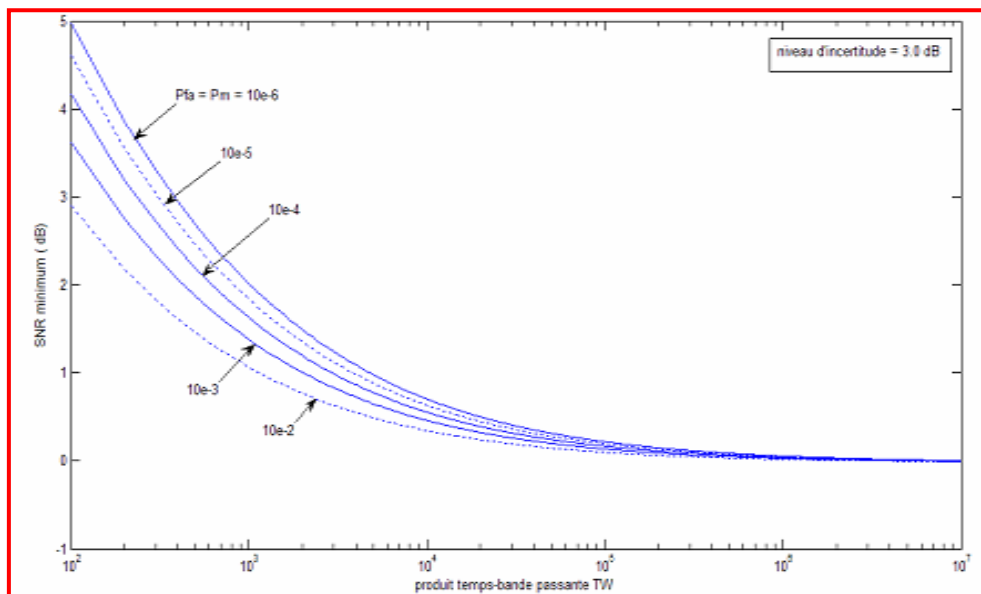


Figure 10: RSB minimum requis: bruit non certain  $U=3\text{dB}$

On définit  $U$  par:

$$U = 10 \log_{10} \left[ \frac{1 + \varepsilon_2}{1 - \varepsilon_1} \right]$$

Dans les systèmes de télécommunication actuels, des estimateurs de canal permettent au terminal d'évaluer les propriétés du canal et le niveau de bruit grâce à la connaissance d'une portion de trame émise. Pour les systèmes radio cognitive, il n'est plus possible d'avoir accès à la nature du signal émis des canaux testés, rendant impossible l'estimation de canal. D'où le besoin d'avoir des techniques de test indépendantes de la connaissance du niveau de bruit.

Malgré sa faible complexité et sa facilité d'implémentation, le radiomètre ne permet pas une détection fiable des bandes libres surtout si l'incertitude portant sur le niveau du bruit est importante ou que le rapport signal à bruit est faible.

## IV.2 Méthode de Détection Cyclostationnaire

Le choix du modèle cyclostationnaire du signal conduit la recherche d'une bande de fréquences libre à un problème de test d'hypothèse sur le signal radio  $x(t)$ :

Sous  $H_0$   $x(t)$  est du type stationnaire et la bande est considérée comme libre

Sous  $H_1$   $x(t)$  est du type cyclostationnaire et la bande est considérée comme occupée

Ceci se traduit, non plus par la détection d'un signal dans le bruit, mais plutôt par un test de cyclostationnaire conduisant ainsi à rendre la solution indépendante de la connaissance sur le bruit. Dans [22], un test statistique permet de vérifier la présence de cycles dans le signal testé. Bien que les performances soient bonnes, ce test nécessite de connaître à l'avance les fréquences cycliques susceptibles d'être présentes dans le signal.

Dans le cas contraire, la détection d'un signal cyclostationnaire devra s'effectuer fréquence par fréquence sur un ensemble important de fréquences cycliques à partir de ce test monocycle, nous en présentons une extension visant à tester simultanément un ensemble de plus en plus important de fréquences cycliques. En effet, plus le nombre d'échantillons dans un segment de données est important plus l'ensemble de fréquences cycliques testées est grand et plus les performances de détection sont bonnes. Nous faisons référence à ce test comme un test multi-cycles.



Aucune de ces méthodes ne peut donc être favorisée car d'une part le radiomètre n'est pas efficace et d'autre part le détecteur cyclostationnaire n'est pas rapide. On peut dire que :

- ✓ La méthode de détection énergétique :
  - Pas besoin de connaissances sur le signal à détecter
  - Non robuste face aux fluctuations du niveau du bruit
  - Prochaine étape : détection plus robuste
- ✓ Les méthodes de détection cyclostationnaire :
  - Robustes aux fluctuations du niveau du bruit
  - Pas besoin de la totalité de la bande de fréquence pour détecter un signal
  - Détectent un utilisateur primaire pendant que les utilisateurs secondaires communiquent
  - Nécessitent des connaissances sur le signal à détecter (fréquence cyclique)

On peut constater que ces méthodes sont complémentaires. En effet, les avantages de l'une sont les inconvénients de l'autre et vice-vers-ça.

Ainsi, dans le but de détecter les bandes libres rapidement et avec le minimum d'informations a priori, nous proposons une architecture de détection hybride qui allie la simplicité du radiomètre et la robustesse du détecteur cyclostationnaire.



# *Chapitre 3*

## *Méthodes de diffusion du spectre*





## I. Introduction

Généralement, la notion de RRC est associée avec la notion d'accès dynamique au spectre qui consiste à introduire plus de flexibilité dans les schémas conventionnels d'attribution et d'accès au spectre.

L'idée principale d'attribution est d'ouvrir les ressources spectrales licenciées aux utilisateurs secondaires pour qu'ils puissent exploiter les portions du spectre non utilisées par les utilisateurs primaires à un instant et une localisation donnés sans générer d'interférences aux utilisateurs primaires.

Dans cette partie, nous considérons un processus de décision markovien partiellement observé (POMDP) assez particulier dans lequel l'agent a la possibilité d'observer l'état de l'environnement, ou une partie de celui-ci de son choix, en sélectionnant une action spécifique.

## II. Les méthodes d'accès et de diffusion du spectre.

L'accès opportuniste met en concurrence deux entités à objectifs parfois contradictoires : les US qui désirent améliorer leurs performances en exploitant le maximum d'opportunités et les UP qui cherchent à se protéger des interférences.

Ainsi, l'identification des opportunités (trous dans le spectre) représente une tâche cruciale de l'accès opportuniste. Les USs doivent absolument assurer cette tâche afin que les UP acceptent de partager leurs ressources.

Dans la littérature on trouve quatre méthodes d'attribution de spectre au utilisateur RRC (Méthode des Enchères, méthode de théorie des jeux, méthode de système multi agents et méthode de Markov) [23].

### II.1 Méthode Des Enchères

Les enchères sont basées sur le concept de vente et d'achat des biens ou de services et constituent un moyen commercial efficace de délivrer des licences de spectre, selon un processus équitable et transparent, à ceux qui accordent le plus de valeur aux fréquences.



Le but principal de l'utilisation des enchères dans les RRC est de fournir une motivation aux utilisateurs secondaires pour maximiser leur utilisation du spectre. Afin d'utiliser pleinement le spectre.

## **II.2 Méthode de Théorie des jeux**

La Théorie des jeux peut être définie comme un cadre mathématique qui se compose de modèles et de techniques utilisés pour analyser le comportement itératif des individus préoccupés par leur propre bénéfice [24].

Dans la littérature existante, nous avons constaté que les concepts théoriques du jeu ont été largement utilisés pour l'attribution de fréquences dans les RRC, où lorsque les utilisateurs primaires et secondaires participent à un jeu, ils ont un comportement rationnel pour choisir les stratégies qui maximisent leurs propres gains.

Pour les RRC, les jeux de négociation sont appliqués pour allouer des bandes de fréquences dans les réseaux centralisés et décentralisés; l'auteur de [25] propose de concevoir des réseaux autonomes sécurisés où les terminaux et les stations de base interagissent et s'auto-adaptent d'une manière intelligente sans avoir besoin d'un contrôleur central ou d'un régulateur.

## **II.3 Méthodes des Systèmes Multi Agents**

L'association des systèmes multi agents (SMA) avec le RRC assure un futur remarquable pour la gestion optimale des fréquences (en comparaison avec les techniques de contrôle rigides proposées par les opérateurs de télécommunications) [26].

Dans le cas de l'utilisation des bandes sans licence, le terminal doit coordonner et coopérer pour un usage meilleur du spectre sans causer d'interférences.

Cependant, l'allocation des ressources est un enjeu important dans les systèmes de RRC. Il peut être fait en effectuant la négociation parmi les utilisateurs secondaires. Dans [27] les auteurs proposent un modèle basé sur les agents pour la négociation du spectre dans un RRC



## II.4 Les approches de Markov:

Les approches de la théorie des jeux ne modélisent pas l'interaction entre les utilisateurs secondaires et primaires pour l'accès au spectre. Cette modélisation peut être réalisée en utilisant efficacement les chaînes de Markov.

Peu de recherches ont été effectuées dans ce domaine, dans [28], un modèle de Markov est présenté, où chaque US sélectionne aléatoirement sa propre chaîne au lieu d'échanger des messages de contrôle avec les autres utilisateurs voisins. Une approche très intéressante utilisant les modèles de Markov est développée par les auteurs de [29] pour analyser les différentes politiques proposées pour le partage du spectre.

Cette approche sera l'objectif de simulation pour la diffusion de spectre

## III. Partie Simulation

Nous présentons dans cette partie une approche inter couche à l'OSA (Accès Opportuniste au Spectre), qui intègre la détection du spectre avec l'accès au spectre. Nous adoptons une approche théorique dans le cadre du processus de décision partiellement observable de Markov (POMDP).

Cette formulation conduit à des politiques optimales pour la détection et l'accès au spectre. Bien que la formulation POMDP puisse sembler naturelle, la spécificité d'OSA des réseaux ad hoc conduit à un certain nombre de questions non triviales. Le problème de la synchronisation des utilisateurs opportunistes, en présence de collisions et d'erreurs de détection a reçu peu d'attention.

Pour cela on applique un protocole d'accès au spectre qui permet aux utilisateurs secondaires (US) de trouver des opportunités d'accès au spectre sans aucun coordinateur central, tel que l'US n'est pas obligé d'écouter le spectre régulièrement lorsqu'il ne possède pas des données à transmettre.

Cette approche est basée sur le processus de décision partiellement observable de Markov (POMDP) qu'est souvent employé pour l'accès dynamique au spectre dans les réseaux ad hoc. Les protocoles décentralisés assurent le saut synchrone dans le spectre entre l'émetteur et le récepteur.



### III.1 Le Modèle POMDP

Une extension des processus de décision markoviens, très utile en pratique, est de considérer que l'agent n'observe pas (ou pas entièrement) l'état de l'environnement. Les processus de décision markoviens partiellement observés (POMDP) modélisent l'interaction dans ce cas. Dans cette section, nous présentons ce modèle et expliquons brièvement les différentes approches de la littérature pour sélectionner les actions dans un tel cadre.

#### III.1.1 Définitions

Un Processus de décision markovien partiellement observable (POMDP) est un modèle stochastique issu de la théorie de la décision et de la théorie des probabilités. Les modèles de cette famille sont, entre autres, utilisés en intelligence artificielle pour le contrôle de systèmes complexes comme des agents intelligents.

POMDP est une aide à la prise de décision automatisée. La politique de POMDP informe des utilisateurs de RRC quelle action à exécuter. Elle peut être une fonction ou une cartographie et dépend typiquement des états de canal.

#### III.1.2 Etat interne

Dans un POMDP, l'agent ne connaissant pas l'état de l'environnement, il est nécessaire de rassembler l'ensemble des informations auquel il accède pour déterminer les actions à effectuer. Ces informations sont appelées état interne ou état d'information.

#### III.1.3 Stratégie optimale

Dans cette section, nous fournissons la formulation détaillée de stratégie optimale basée sur l'approche opportuniste pour sentir le canal [30].

L'accès au canal basé sur POMDP est connu comme stratégie optimale qui modélisent l'occurrence du système de canal réseau comme chaîne de Markov de temps discret avec le nombre de l'état de canal est formulé comme états de  $M=2^N$ , où  $N$  est nombre de canal. Le diagramme d'état pour  $N=2$  est illustré dans la figure 11( $\alpha$  et  $\beta$  sont les probabilités conditionnelles).

L'état (0,1) indique que le premier canal est disponible et le second canal est occupé. La durée de la partie observable signifie que l'utilisateur RRC sélectionne un ensemble de canaux

à sentir et un ensemble de canaux pouvant être accessibles on se basant sur les résultats de détection.

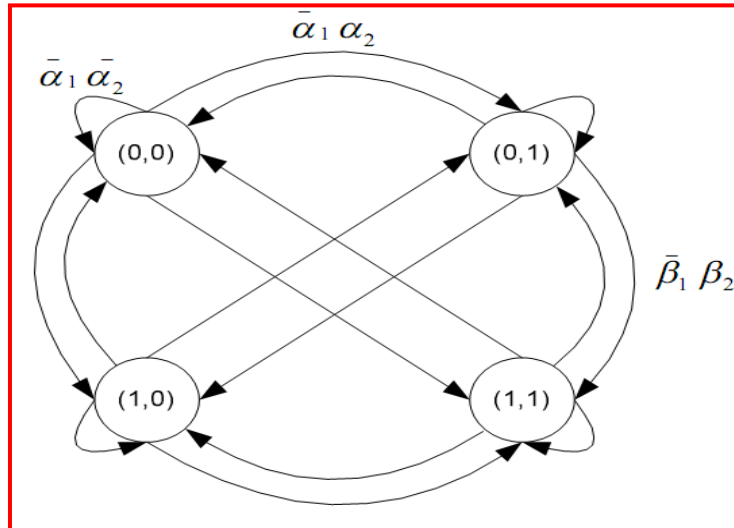


Figure 11: Diagramme d'état pour N=2 de Markov

L'objectif de ceci est de maximiser la sortie US sous la contrainte de l'interférence à l'unité centrale en exploitant l'histoire de détection et les statistiques d'occupation de spectre.

## III.2 Modélisation du Système et Résultats de Simulation

### III.2.1 Modèle d'allocation de canal

Le modèle de communication opportuniste que nous considérons consiste en N canaux indépendants dont l'occupation varie dans le temps. Ces N canaux sont attribués par licence à un réseau primaire composé d'utilisateurs qui communiquent selon une structure à trames temporelles. On notera  $X_t(i)$  l'état du canal i au début de chaque intervalle de temps  $t \in \mathbb{N}$  (figure 11).

$X_t(i)$  est égal à 0 quand le canal i est occupé et à 1 quand le canal est libre (voir figure 12). On suppose que la disponibilité du canal évolue de manière markovienne : l'état du canal i au début de chaque trame t dépend uniquement de l'état du canal au début de la trame t-1.

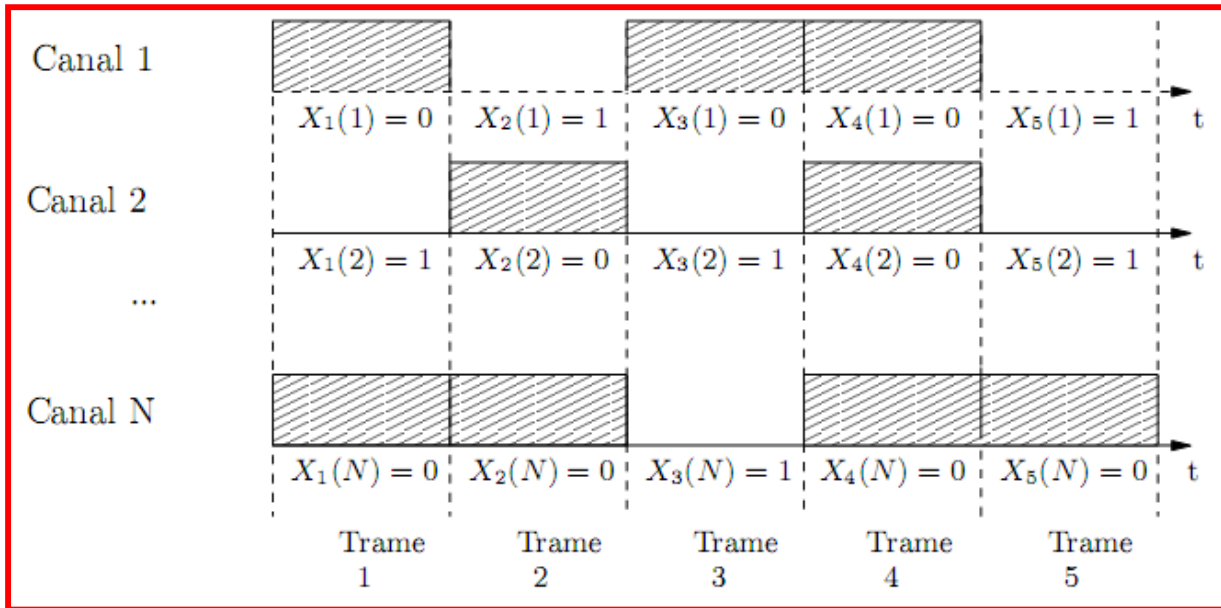


Figure 12: Occupation de spectre pour N canaux

Considérons maintenant un utilisateur secondaire recherchant des opportunités pour transmettre ses données dans les canaux temporairement inutilisés par les utilisateurs primaires.

Nous nous intéressons à un modèle avec un seul utilisateur secondaire. Des cadres similaires avec plusieurs utilisateurs secondaires ont également été considérés : en particulier, un algorithme pour un modèle décentralisé dans le cas où les canaux sont sans mémoire a été introduit notre cas. De plus, certaines recherches ont considéré un cas où l'observation de l'état n'est pas parfaite.

L'utilisateur secondaire ne pouvant observer à chaque instant l'ensemble des canaux, une de ses tâches principales consiste à choisir quels canaux observer à chaque intervalle de temps afin de transmettre le maximum de données. Dans ce modèle, l'accès au canal peut être interprété comme une tâche de planification dans une classe particulière de processus de décision markoviens partiellement observés appelés « restless bandits ».

### III.2.2 Modélisation par un POMDP

Les UP sont autorisés d'utiliser le spectre. Cependant, les US peuvent accéder au canal si le canal est disponible pour éviter l'interférence à l'US. Nous considérons le groupe des US, Les canaux existés sont mis en commun entre UP et un grand nombre d'US. Chaque canal a

le  $B_i$  de largeur de bande ( $i=1, \dots, N$ ). Le diagramme d'évolution d'état pour  $N=2$  est illustré dans la figure 13.

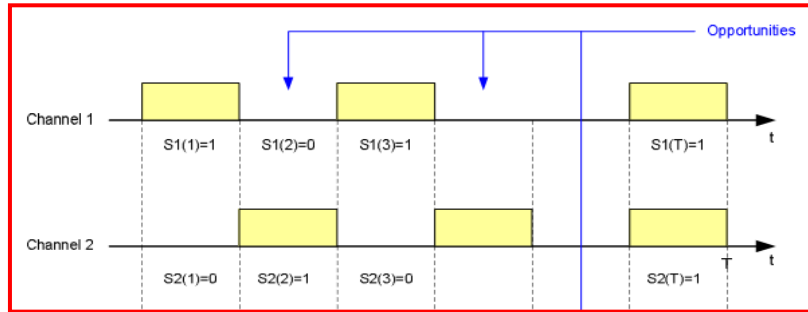


Figure 13: Occupation de spectre pour  $N=2$



Figure 14: Structure d'une slot

### III.3 Résultats Numériques

Nous supposons que les erreurs de détection peuvent être ignorées et se concentrer sur US.

Nous considérons 2 canaux ( $N=2$ ) indépendants avec la même largeur de bande  $B = 1$  et des probabilités de transition  $\{\alpha, \beta\}$  (figure 15).

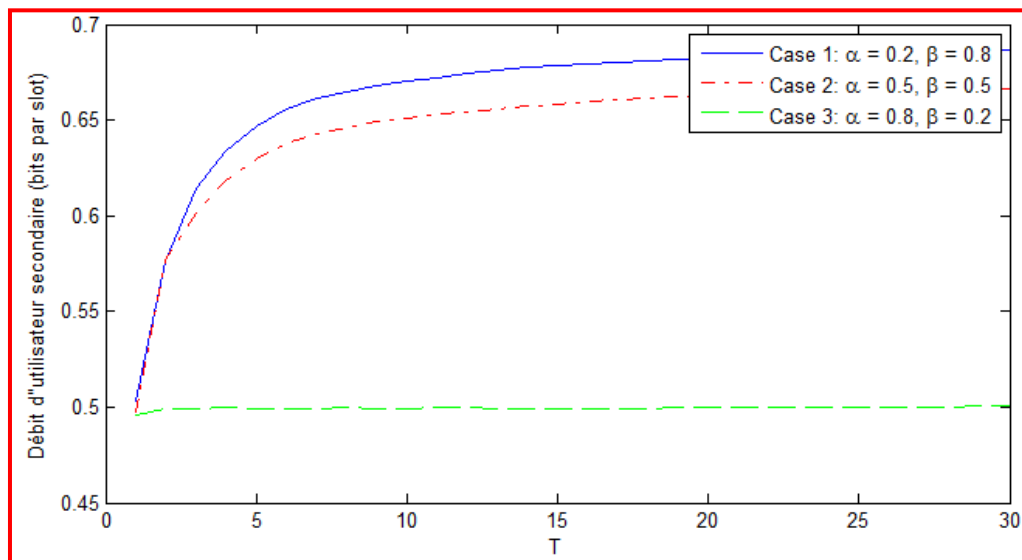


Figure 15: Exécution du protocole optimal d'occupation de spectre

Au cas 1, l'état de canal resterait inchangeable avec une grande probabilité 0.8. Ceci correspond aux arrivées du trafic dans le réseau primaire: c.-à-d. la longueur de message et le temps d'arrivées sont grands

Le cas 3 est l'opposé du cas 1: le temps d'arrivée et la longueur du message d'US sont relativement petits, ce qui implique des changements plus fréquents de l'état de canal.

Au cas 2, le canal pourrait également changer l'état ou rester à l'état actuel. Noter que dans chacun des trois cas, les canaux ont la même distribution stationnaire: avec la probabilité 0.5 un canal est disponible (occupé).

En outre, le débit d'US augmente au fil du temps dans le cas 1 et 3, qui viennent de l'amélioration de l'information sur l'état du réseau établi à partir de l'accumulation des observations. Cela démontre la nature cognitive de méthode proposée(POMDP).

Notez que dans le cas 2, l'évolution d'état canal markovien dégénère à une i.i.d (independent and identically distributed). Aucune information ne peut être acquise à partir des observations passées et la stratégie optimale se réduit à une sélection aléatoire de canaux.

Si on augmente la largeur de bande en 2 ( $B=2$ ) et on diminue le nombre de canal en 2 ( $N=2$ ), on remarque que l'évolution de débit des US augmente et l'évolution de cas 2 est presque égale à l'évolution dans le cas2 (figure 16).

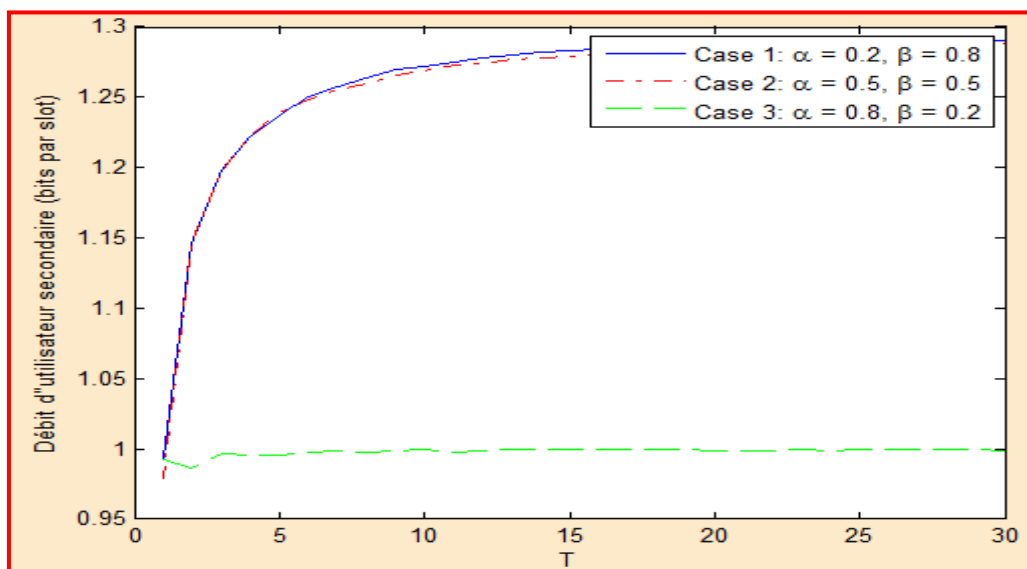
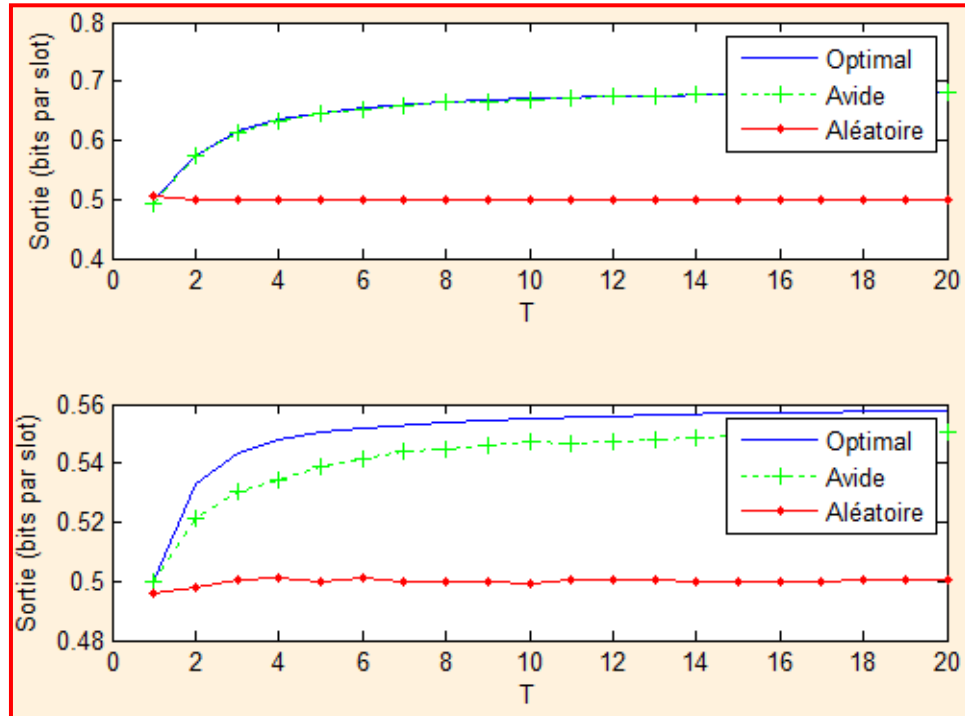


Figure 16 : Exécution du protocole optimal ( $N=2$ ) et ( $B=2$ ) d'occupation de spectre



Les performances de l'approche sous-optimale par rapport à l'approche avide avec le protocole optimal serrant illustrés sur la figure 17.



**Figure 17: performances de l'approche gloutonne avec la stratégie optimale**

Pour les canaux utilisés dans le graphique du haut (figure17), la performance de l'approche gloutonne correspond à celle du protocole optimal.

Dans la partie supérieure (figure 17), nous avons  $N = 3$  canaux indépendants avec la même bande passante  $B = 1$  et probabilités de transition  $\{a = 0.2, \beta = 0.8\}$

Pour les canaux de la courbe inférieure, la perte de performance de l'approche gloutonne est à moins de 3%. Dans les deux cas, un gain significatif sur une sélection aléatoire de canaux est obtenu par les la méthode proposée.

Ces résultats obtenu son presque les mêmes trouver par [31]



## *Conclusion et Perspectives*

Les réseaux radio cognitifs est un thème qui présente un élément de recherche très promettant. Pour cela nous avons choisi d'entamer cette étude.

Dans ce mémoire, nous avons mené une étude bibliographique sur les réseaux radio cognitifs englobant les définitions, son architecture et son mode de fonctionnement. Après, on s'est focalisé sur l'étude de la distribution des ressources sélectionnées suivie d'une simulation de l'une des méthodes de distribution.

Cette simulation à été réalisée par l'approche basée sur POMDP décentralisée qui utilise les mécanismes de négociation et de coopération pour assurer un accès dynamique, efficace au spectre. .

Les résultats de ce présent travail montrent que si le nombre de canaux est très petit, la diffusion de spectre sera délicate pour un nombre important des US.

Dans nos travaux futurs, nous choisirons des algorithmes qui nous permettrons de diffuser le spectre d'une manière efficace.

Nous essayerons également de définir les paramètres de choix des canaux de façon précise et concise afin d'optimiser le partage de spectre disponible. Nous évaluerons par la suite les performances de notre système par des simulations.



## References

- [1] J. Mitola, *Cognitive Radio Architecture: The Engineering Foundations of Radio XML*, Wiley 2006, Hardcover, 473 pages
- [2] H.-H. Chen, M. Guizani, *Next Generation Wireless Systems and Networks*, Wiley 2006, Hardcover, 512 pages
- [3] Federal Communications Commission, *Cognitive Radio Technologies Proceeding (CRTP)*, <http://www.fcc.gov/oet/cognitiveradio/>.
- [4] C. Partridge R. Krishnan M. Condell C. Santivanez, R. Ramanathan and S. Polit, "Opportunistic Spectrum Access: Challenges, Architecture, Protocols", *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Annual International Wireless Internet Conference (WICON)*, August 2006.
- [5] Y. Chen, Q. Zhao, and A. Swami. Joint design and separation principle for opportunistic spectrum access in the presence of sensing errors. *IEEE Transactions on Information Theory*, 54(5) :2053–2071, 2008.
- [6] Z. Jrad, F. Krief and B. Benmammar. "An Intelligent User Interface for the Dynamic Negotiation of QoS". *Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Telecommunications. ICT'2003*. Papeete, Tahiti. February 2003, Print ISBN: 0-7803-7661-7
- [7] K. Liu and Q. Zhao. A restless bandit formulation of opportunistic access: Indexability and index Policy. *Annual Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks Workshops*, pages 1–5, 2008.
- [8] AKYILDIZ, I. F., LEE, W. -Y, VURAN, M. C. e t MOHANTY, S. (2006). Next generation/Dynamic spectrum access / cognitive radio Wireless networks : a Survey. *Comput. Netw*, 50(13):2127-2159.
- [9] Asma Amraoui, Fatima Zohra Benidris, Badr Benmammar, Francine Krief and Fethi Tarik Bendimerad. "Toward cognitive radio resource management based on multi-agent systems for improvement of real-time application performance". *Proceedings of the Fifth IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS'2012)*. Istanbul, Turkey. 7-10 May 2012.



- [10] B. Benmammour, A. Amraoui and W. Baghli. "Performance improvement of Wireless Link reliability in the context of cognitive radio". IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security. VOL.12 No.01, January, 2012, pp. 15-22. ISSN : 1738-7906.
- [11] D. Grandblaise, D. Bourse, K. Moessner, P. Leaves, Dynamic spectrum allocation (DSA) and reconfigurability, in: Proc. Software-Defined Radio (SDR) Forum, November 2002.
- [12] IEEE 802.11, Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications, 1999.
- [13] AKYILDIZ F., LEE W-Y., VURAN M. C., MOHANTY S., « Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey », International Journal of Computer and Telecommunication Networking, vol. 50, n° 13, Sept 2006, p. 2127-2159
- [14] A. V. Dandwaté et G.B. Giannakis, Statistical tests for presence of cyclostationarity, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 42, Issue 9, Sept. 1994, pp 2355-2369.
- [15] W. A. Gardner et G. Zivanovic, Degrees of cyclostationary and their application to signal detection and estimation, Signal Processing, Vol. 22, No. 3, March 1991.
- [16] H. L. Hurd et N. L. Gerr, Graphical methods for determining the presence of periodic correlation, Journal of Time Series Analysis, Vol. 12, No. 4, p. 337 – 350, 1991.
- [17] J. Wang, T. Chen et B. Huang, Cyclo-period estimation for discrete-time cyclostationary signals, IEEE Transaction on Signal Processing, Vol. 54, No. 1, p. 83 – 94, Jan. 2006.
- [18] V. I. Kostylev, Energy detection of a Signal with Random Amplitude, IEEE International Conference on Communications, Vol. 3, pp. 1606 – 1610, April 2002.
- [19] A. V. Dandawaté et G. B. Giannakis, Asymptotic theory of mixed time averages and kth-order cyclic-moment and cumulant statistics, IEEE Transactions on Informations Theory, Vol. 41, No. 1, p. 216 –232, Jan. 1995.
- [20] R. Besson, Cours de Télévision Moderne, SECF Edition Radio, Paris, 1980.



- [21] T. Costlow, "Cognitive radios will adapt to users," *Intelligent Systems, IEEE* [see also *IEEE Intelligent Systems and Their Applications*], vol. 18, pp. 7, 2003.
- [22] BBN Technologies, "The XG Architectural Framework," X. W. Group, Ed., 1.0 ed: DARPA, 2003.
- [23] Multiple authors, "Software Radios," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, pp. 509-747, 1999.
- [24] J. Mitola, III and G. Q. Maguire, Jr., "Cognitive radio: making software radios more personal," *Personal Communications, IEEE* [see also *IEEE Wireless Communications*], vol. 6, pp. 13, 1999.
- [25] A. Sahai and N. Hoven and R. Tandra, "Some fundamental limits on cognitive radio," in *Proc. Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, October 2004.
- [26] Q. Zhao and B. Sadler, "Dynamic Spectrum Access: Signal Processing, Networking, and Regulatory Policy," to appear in *IEEE Signal Processing Mag.*, May 2007; available at [http://arxiv.org/PS\\_cache/cs/pdf/0609/0609149.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/cs/pdf/0609/0609149.pdf).
- [27] D. Cabric, S. M. Mishra, and R. W. Brodersen, "Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios," in *Proc. the 38th. Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, pp. 772 – 776, 2004.
- [28] K. Challapali, S. Mangold, and Z. Zhong, "Spectrum Agile Radio: Detecting Spectrum Opportunities," in *International Symposium on Advanced Radio Technologies*, 2004.
- [29] B. Wild and K. Ramchandran, "Detecting primary receivers for cognitive radio applications," in *Proc. IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Nov. 2005.
- [30] F. F. Digham, M. –S. Alouini et M. K. Simon, "On the Energy Detection of Unknown signals over Fading Channels," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Commun. (ICC'03)*, May 2003.
- [31] Q. Zhao, L. Tong, A. Swami, and Y. Chen. "Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: A POMDP framework." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 25(3):589–600, 2007b.