

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE A. MIRA-BEJAIA
FACULTE DE TECHNOLOGIE



MEMOIRE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE

Master

Département : GENIE ELECTRIQUE

Filière : Télécommunications

Option : Réseaux et Télécommunications

Présentée par

HAMIDOUCHE KAMIR

DAHMANI LYDIA

SLIMANI NABIL

Thème

Allocation des ressources dans les réseaux radio cognitifs

Soutenu le 29/11/2020, devant le jury composé de :

Mr A. BELAHSEN,	MCA U.A.M. Béjaia	Président
Mr N. BENAMIROUCHE,	MAA U.A.M. Béjaia	Examinateur
Mr M. TOUNSI,	MCB U.A.M. Béjaia	Encadreur

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements

« Quand vous travaillez, vous êtes une flûte, où, à travers son cœur, les soupirs de vos heures se métamorphosent en mélodie.

Qui parmi vous souhaiterait rester tel un roseau vierge de son, alors qu'autour de vous tout chante à l'unisson ?

Le travail est l'amour rendu visible. »

Gibran Khalil Gibran (Philosophe Libanais)

Lorsqu'on commence à écrire nos remerciements, on sent que c'est le début d'une nouvelle période.

Je remercie grandement M. Tounsi qui nous a encadré durant ce semestre, sans qui notre travail et l'aboutissement de ce mémoire n'auraient pas vu le jour. Merci pour votre confiance, votre disponibilité, vos encouragements et surtout pour votre humour. On remercie également nos examinateurs, M. Bellahcene et M. Benamirouche qui prendront le temps d'examiner notre travail.

On exprime toute notre gratitude à Dieu, bien évidemment, de nous avoir donné la force d'aller au bout de cet acheminement, tout au long de notre parcours scolaire, et surtout pour accomplir ce mémoire qui aura été la dernière ligne droite.

Naturellement, on exprime notre reconnaissance à nos chers parents, que nous espérons rendre fier grâce à ce petit accomplissement. Merci également à tous nos collègues, amis et proches ainsi que tous ceux qui auraient contribué de près ou de loin à notre réussite.

Dédicace

Je dédie cet événement marquant de ma vie à la mémoire de mon père disparu trop tôt, lui pour qui les études ont toujours pris une place prépondérante dans sa vie, et qui tenait toujours un livre entre ses mains jusqu'à ses derniers jours. J'espère que, du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'une fille qui a toujours prié pour le salut de son âme. Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde.

Je dédie également ce travail à ma chère maman qui n'a pas eu la chance d'aller à l'école mais qui m'a toujours encouragé à aller de l'avant, à me surpasser et à ne jamais baisser les bras, j'espère la rendre très fière.

A ma sœur, Naziha, bientôt docteur en littérature anglaise, mon exemple que j'ai suivi aveuglément depuis ma tendre enfance, mon mentor, ma grande sœur adorée.

A mes copines, Lydia et khadidja, qui ont transformé mon parcours universitaire en des éclats de joie et qui ont toujours été là pour moi.

Et enfin, à Yacine, qui m'a soutenu du début jusqu'à la fin, m'a conseillé, réconforté et relevé dans les moments les plus sombres, tu as toute ma reconnaissance et mon amour.

« Kamir »

Dédicace

Je dedie ce modeste travail à :

Mes parents qui m'ont toujours soutenu et accompagné durant tout mon parcours scolaire et universitaire.

Mes grand parents Jedi vava (qui nous a quitté trop tôt et à laisser un grand vide dans nos vies), Yemma Baya, Jedi Hamid, Yemma Hnifa.

Mon frère Massinissa qui est toujours au petit soin avec moi, et qui veille toujours sur moi.

Mes sœurs Syrine et Dania que j'aime tant.

Mes meilleurs amis Biba la franche bosseuse, pour m'avoir toujours soutenu et su être là quand j'en avais besoin. *Nouna* la courageuse, avec qui j'ai vécu le meilleur et le pire et qui est toujours là pour moi. *Khadi* la boule de bonne humeur, j'aurai jamais cru qu'un jour on deviendrait amies et voilà qu'aujourd'hui tu fais partie des personnes les plus chères à mon cœur. *Kami* ma jumelle spirituelle, ma binôme, ma partenaire de galère, on en a vécu des choses mais toujours l'une auprès de l'autre. *Katia* la fofolle, malgré les distances nous sommes restées toujours aussi proches. Pour finir, *Tarik* la base, qui m'a soutenu et encouragé du début jusqu'à la fin, a su trouver les mots quand j'en avais besoin, et qui a pris une grande place dans mon cœur et dans ma vie.

Ainsi qu'à toute ma famille (Oncles, tantes, cousins et cousines).

JE VOUS AIME TOUS

Mon collègue Nabil

Mon compagnon Shadow ma boule de bonheur (parti trop tôt)

« *Lydia* »

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents qui ont toujours été à mes cotés durant toutes mes études et qui m'ont donné la meilleure éducation « que dieu les garde en bonne santé »

Mon cher frère : El Amine

Mes potes : Adel, Massi, Anis, Mamy, Lyes, sofiane et Nadir

Mes deux collègues Lydia et Kamir

Ainsi qu'à tous mes amis du groupe 2 et toute la promotion télécommunication.

« NABIL »

Table des matières

Remerciements.....	
Table des matières.....	
Liste des tableaux.....	
Liste des Acronymes.....	
Introduction Générale.....	1
Chapitre I Introduction à la radio cognitive	
I.1. Introduction.....	3
I.2. La radio cognitive.....	3
I.2.1. Historique.....	4
I.2.2. Les enjeux de la radio cognitive.....	4
I.2.3. Définition.....	5
I.2.4. Radio logicielle (Software Radio).....	6
I.2.5. Radio logicielle restreinte.....	7
I.3. Les fonctions de la radio cognitive.....	7
I.3.1. Détection sur le spectre (Spectrum sensing).....	8
I.3.2. Gestion du spectre (spectrum management).....	8
I.3.3. Mobilité du spectre (Spectrum mobility).....	8
I.3.4. Partage de spectre (Spectrum sharing).....	8
I.4. Types de détection de spectre.....	8
I.4.1. Décision dans un environnement non-coopératif.....	9
I.4.1.1. Détection d'énergie.....	9
I.4.1.2. Détection par filtre adapté.....	10
I.4.1.3. Détection des caractéristiques cyclostationnaires.....	10
I.4.2. Dans un environnement coopératif.....	10
I.4.3. Détection basée sur les interférences.....	10
I.5. Architecture de la radio cognitive.....	11
I.5.1. La partie matérielle/ Hardware.....	11
I.5.2. La partie logicielle/ Software.....	11
I.5.3. La partie cognition.....	12
I.6. Architecture simplifiée.....	12
I.7. Cycle de cognition.....	13
I.7.1. Phase d'observation (Observe).....	14
I.7.2. Phase d'orientation (Orient).....	14
I.7.3. Phase de planification (Plan).....	14
I.7.4. Phase de décision (Decide).....	14

I.7.5. Phase d'action (Act)	14
I.7.6. Phase d'apprentissage (Learn)	15
I.8. Propriétés fondamentales de la radio transmission.....	15
I.8.1. Les ondes radio.....	15
I.8.2. Notion du canal	15
I.8.3. Bruit.....	16
I.8.4. Propagation.....	16
I.8.5. Interférences.....	17
Conclusion.....	19
Chapitre II Allocation de ressources dans les réseaux radio cognitifs	
II.1. Introduction.....	20
II.2. Définition des problèmes d'allocation du spectre radio dans les RRC	20
II.3. Critères d'allocation de bande spectrale	21
II.3.1. Interférence/ puissance	21
II.3.2. Débit	21
II.3.3. Maximisation de l'occupation spectrale	22
II.3.4. Equité entre les utilisateurs cognitifs	23
II.4. Approches d'allocation du spectre	23
II.4.1. Modèle centralisé / distribué.....	23
II.4.2. Transmission multi-canaux	24
II.4.3. Prise en compte des utilisateurs primaires	25
II.5. La radio cognitive et l'intelligence artificielle.....	25
II.6. Les systèmes multi agents	26
II.6.1. Agent.....	27
II.6.1.1. Propriétés et types d'agent.....	27
II.6.1.2. Agent réactif.....	28
II.6.1.3. Agent cognitif.....	28
II.6.1.4. Architecture des agents (cognitif et réactif).....	28
II.7. Techniques d'accès dynamique au spectre	30
II.7.1. Méthodes heuristiques	30
II.7.2. La théorie des jeux	31
II.7.3. La théorie des graphes	32
II.7.3.1. Graphe non orienté	32
II.7.3.2. Les graphes de conflits	33
II.7.3.3. Problème de coloration des sommets.....	33
II.7.4. La théorie des enchères	34
II.7.4.1. Enchère ascendante (anglaise).....	35
II.7.4.2. Enchère descendante (hollandaise).....	35

II.7.4.3. Enchère à enveloppe scellée (au premier prix)	35
II.7.4.4. Enchère de Vickery (enveloppe scellée au second prix)	35
Conclusion.....	36
Chapitre III Simulations de détection de spectre par détecteur d'énergie	
III.1. Introduction	37
III.2. Formulation du problème de détection de spectre	37
III.3. Utilisation de la méthode de détection d'énergie.....	38
III.3.1. Détecteur d'énergie	39
III.3.2. Application dans un canal Gaussien	39
III.3.3. Effet du SNR sur la détection.....	41
III.3.4. Détermination du seuil de décision optimal	42
III.3.5. Application dans un canal de Rayleigh.....	42
III.4. Détection coopérative de spectre	44
III.4.1. Règles de combinaisons « hard ».....	46
III.4.2. Résultats de la simulation et commentaires	46
Conclusion.....	48
Conclusion et Perspective	49

Liste des figures

FIGURE I. 1 TECHNIQUES D'ACCES.....	3
FIGURE I. 2 BANDES FREQUENTIELLES EN FONCTION DU DOMAINE D'APPLICATION	4
FIGURE I. 3 ILLUSTRATION SUR LES ENJEUX DE LA RADIO COGNITIVE	5
FIGURE I. 4 ARCHITECTURE D'UNE RADIO MATERIELLE.....	6
FIGURE I. 5 ARCHITECTURE D'UNE RADIO LOGICIELLE	7
FIGURE I. 6 FONCTIONS DE LA RADIO COGNITIVE	7
FIGURE I. 7 TYPES DE DETECTION DE SPECTRE.....	9
FIGURE I. 8 DIAGRAMME DE DETECTION DE SPECTRE	9
FIGURE I. 9 ARCHITECTURE DE LA RADIO COGNITIVE SELON JOSEPH MITOLA III	11
FIGURE I. 10 LES COMPOSANTS FONCTIONNELS DE L'ARCHITECTURE DE LA RADIO COGNITIVE.....	12
FIGURE I. 11 CYCLE DE COGNITION DE MITOLA	14
FIGURE I. 13 SIGNAL+BRUIT	16
FIGURE I. 12 SIGNAL ORIGINAL	16
FIGURE I. 15 TRANSMISSION INTERFERENTE	17
FIGURE I. 14 EVANOUISSEMENTS MULTI-TRAJET	17
FIGURE I. 16 INTERFERENCES PRIMAIRES CAS 1.....	18
FIGURE I. 17 INTERFERENCES PRIMAIRES CAS 2.....	18
FIGURE I. 18 INTERFERENCES SECONDAIRES	19
FIGURE II. 1 ARCHITECTURE DE LA RADIO COGNITIVE AVEC L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE	26
FIGURE II. 2 ARCHITECTURE DE SUBSOMPTION.....	29
FIGURE II. 3 ARCHITECTURE BDI	30
FIGURE II. 4 EXEMPLE DE GRAPHE NON ORIENTE	32
FIGURE II. 5 EXEMPLE DE CONSTRUCTION DE GRAPHE DE CONFLITS	33
FIGURE II. 6 (A) UN COLORIAGE DE GRAPHE VALIDE ET (B) UN COLORIAGE DE GRAPHE INVALIDE	34
FIGURE III. 1 PRINCIPE DU PROCESSUS DE DETECTION D'ENERGIE	39
FIGURE III. 2 COURBE ROC DE LA PROBABILITE DE DETECTION P_D ET DE LA PROBABILITE DE THEORIQUE DETECTION P_{D_THE} EN FONCTION DE LA PROBABILITE DE FAUSSE ALARME P_f (RSB=-10 dB).....	40
FIGURE III. 3 INFLUENCE DU RAPPORT SNR SUR LA DETECTION.	41
FIGURE III. 4 EVOLUTION DU SEUIL DE DECISION EN FONCTION DE LA PROBABILITE DE FAUSSE ALARME.	42
FIGURE III. 5 COURBE ROC DES PROBABILITES DE DETECTION (SIMULEE, THEORIQUE) EN FONCTION DE LA PROBABILITE DE FAUSSE ALARME DANS UN CANAL RAYLEIGH (RSB=0 dB).....	43

FIGURE III. 6 COURBE ROC DES PROBABILITES DE DETECTION (SIMULEE, THEORIQUE) EN FONCTION DE LA PROBABILITE DE FAUSSE ALARME DANS UN CANAL RAYLEIGH (RSB=-10 DB).....	43
FIGURE III. 7 LE SCHEMA DE PRINCIPE DES DETECTEURS DE DETECTION DE SPECTRE COOPERATIFS.....	44
FIGURE III. 8 LA DENSITE DE PROBABILITE TOTALE EN FONCTION DU SEUIL AVEC UNE REGLE DE FUSION VARIEE QUAND $N = 1, 2, \dots, 10$, $K = 10$, ET SNR.....	47

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : DIFFERENCES ENTRE UN SYSTEME CENTRALISE ET UN SYSTEME DISTRIBUE	24
TABLEAU 2 : DIFFERENCES ENTRE UN AGENT COGNITIF ET UN AGENT REACTIF	28

Liste des Acronymes

ADC	Analog-to-Digital Converter
AG	Algorithme Génétique
AP	Access Point
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BDI	Belief Desire Intention
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
BS	Base Station
CDMA	Code Division Multiple Access
DOFDM	Differential Orthogonal Frequency Division Multiplexing
EN	Equilibre de Nash
FDMA	Frequency Division Multiple Access
IA	Intelligence Artificielle
IAD	Intelligence Artificielle Distribuée
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISO	International Organization for Standardization
ITL	Interference Temperature Limit
IUT	International Telecommunication Union
LAN	Local Area Network
MIMO	Multiple Input Multiple Output
NP	Non déterministe Polynomial
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PU	Utilisateur Principal
PU_s	Utilisateurs Principaux
QPSK	Quaternary Phase Shift Keying
RC	Radio Cognitive
RF	Radio Fréquence
ROC	Receiver Operating Characteristic
RRC	Réseau de Radio Cognitive

RRCs	Réseaux de Radio Cognitive
RXML	RoXen Marco Language
SDR	Software Defined Radio
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SMA	Système Multi-Agent
SP	Sensory Perception
SU	Utilisateur Secondaire
SUs	Utilisateurs Secondaires
TDMA	Time Division Multiple Access
UIT	Union Internationale des Télécommunications
UML	Unified Modeling Language
XML	eXtensible Markup Language

Introduction Générale

L'émergence de nouveaux outils de messagerie électronique, de transfert de fichiers et de connexion à distance des services Internet a engendré une explosion des abonnés aux réseaux sans fils, créant ainsi des exigences plus élevées en termes de performance, de débit, de rapidité et de fluidité.

Des exigences auxquelles les opérateurs des réseaux mobiles doivent répondre afin d'assurer une qualité de service optimale aux utilisateurs et surtout pour éviter une saturation et une paralysie des réseaux. Cette tâche est d'autant plus contraignante en raison de la rareté de la ressource radio qu'est le spectre hertzien.

De nombreuses solutions existent en théorie pour permettre de mieux exploiter le spectre et d'éviter qu'il arrive à saturation comme monter en fréquence pour les services de téléphonie mobile, c'est-à-dire aller au-delà de la limite des 5Ghz pour désengorger les zones de spectre entre 500Mhz et 3Ghz. Ou encore, multiplier les antennes en intégrant plus d'antennes à l'émission et à la réception grâce à la technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output) ce qui augmenterait la capacité du canal.

Toutes ces techniques restent difficiles à mettre en pratique et présentent certains inconvénients comme la difficulté à intégrer dans un terminal la puissance de calcul suffisante pour des fréquences trop élevées, ou intégrer plusieurs antennes dans un téléphone.

Une autre solution existe, c'est le concept de la radio cognitive qui fait l'objet de notre étude. Elle consiste à autoriser les services mobiles à se connecter de façon opportuniste sur des fréquences sous-utilisées par d'autres usagers.

Grâce à ses techniques pour l'apprentissage et la prise de décision se trouvant dans sa base de connaissances, elle assimile des informations sur son environnement ce qui en fait une technologie intelligente, dynamique et adaptative aux changements se produisant dans les réseaux radio cognitifs.

Cette étude est répartie en trois chapitres sur l'allocation de ressources dans les réseaux radio cognitifs, dont deux théoriques et une partie pratique avec une des simulations effectuées sur l'outil de simulation Matlab.

D'abord, le premier chapitre est introductif à la radio cognitive, il aborde la radio logicielle restreinte qui fait partie intégrante de la radio cognitive et qui est un concept intermédiaire entre la radio matérielle et la radio cognitive. Elle aide à résoudre les problèmes de la gestion dynamique du spectre. Il comprend aussi les fonctions de la radio cognitive, ses cycles de cognition, son architecture ainsi que les types de détection de spectre.

Ensuite, le second chapitre, intitulé allocation des ressources dans les réseaux radio cognitifs, parle des problèmes d'allocation du spectre dans les RRCs et ses approches ; un bref rappel sur les critères d'allocation de bande spectrale y est fait.

Qu'il s'agisse du débit, de l'équité entre les utilisateurs ou encore de la puissance, tous sont des paramètres essentiels dans l'allocation d'un réseau radio cognitif.

Ce chapitre met en lumière le lien entre la radio cognitive et l'intelligence artificielle qui est un cas particulier des systèmes multi-agents, expliqués plus en détail dans ce chapitre également. Ils permettent de mieux appréhender et modéliser les problèmes dans les RRCs. Les techniques d'accès au spectre, issues des systèmes SMA, aident grandement dans la gestion de ces problèmes, ce sont des protocoles dirigeant l'interaction entre différents agents. Parmi les techniques les plus connues, on recense les méthodes heuristiques, la théorie des enchères, la théorie des graphes, etc....

Enfin, la chapitre trois présente le détecteur d'énergie, qui est une méthode simple pour détecter la présence d'un PU dans un réseau cognitif. Il comporte un scénario de simulation où plusieurs utilisateurs essaient de détecter un PU dans la bande spectrale en utilisant les règles de combinaisons dites « hard » et une autre simulation dont le but est de prouver l'efficacité du détecteur d'énergie.

Chapitre I

Introduction à la radio cognitive

I.1. Introduction

Le monde des réseaux sans fils ne cesse d'évoluer au fil du temps, avec des abonnés de plus en plus nombreux et une ressource spectrale rare et chère, les opérateurs radio-mobiles font face à un véritable challenge afin de satisfaire ces exigences et d'offrir une meilleure qualité de service. Ces derniers doivent s'adapter pour supporter des débits élevés tout en évitant la surcharge des cellules.

La radio cognitive a vu le jour en réponse à ce besoin de mieux exploiter le spectre fréquentiel tout en garantissant l'augmentation du débit.

Au cours de ce chapitre, nous allons présenter la radio cognitive sous ses différents aspects, à savoir son fonctionnement, son architecture et ses enjeux.

I.2. La radio cognitive

Les réseaux sans fils ont subi des évolutions fulgurantes au cours des dernières décennies grâce aux nouvelles technologies, répondant ainsi aux besoins des utilisateurs. Les différentes générations de réseaux mobiles varient principalement par la technique d'accès utilisée. Cette dernière fut la technologie qui permit aux réseaux cellulaires de s'affranchir de la contrainte qu'une bande de fréquence ne peut être utilisée que par un nombre limité de stations mobiles.

Que ce soit la F/TDMA, la CDMA ou encore l'OFDMA, chacune de ces techniques d'accès ont pour but de mieux répartir le canal radio entre les utilisateurs, tout en optimisant le débit, en garantissant la sécurité de l'information et en minimisant les interférences.

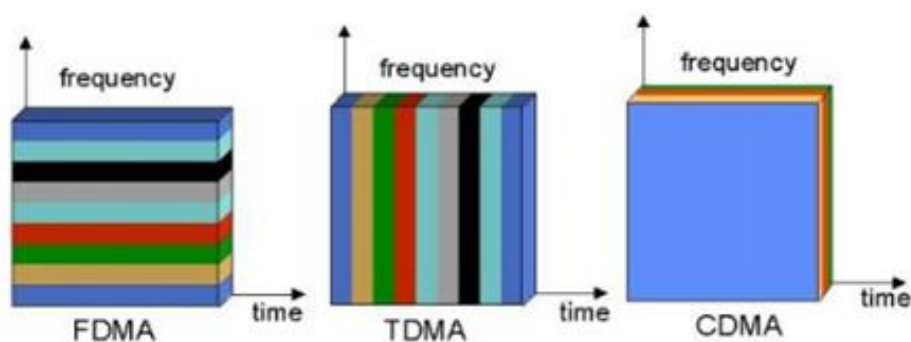


Figure I. 1 Techniques d'accès

Paradoxalement, de plus en plus d'études semblent démontrer que la rareté de la bande spectrale n'est pas due à son manque de disponibilité mais plutôt à l'inefficacité des techniques d'accès [1].

En effet, c'est un fait avéré dans le monde des réseaux sans fils que la bande fréquentielle n'est pas entièrement exploitée.

C'est ainsi que la radio cognitive est apparue, il s'agit d'une technologie qui alloue dynamiquement la ressource spectrale entre les abonnés. Intelligente et intuitive, cette radio détecte quand la bande est libre pour l'allouer à un utilisateur.

I.2.1. Historique

La radio cognitive a émergé dans le cadre de recherches universitaires pour le développement commercial concernant les futurs systèmes sans fil.

Ce terme a été présenté pour la première fois par Joseph Mitola III lors d'un séminaire à l'Institut royal de technologie, en 1998, publié plus tard dans un article de Mitola et Gerald Q. Maguire, Jr en 1999.

D'après lui : « Une radio cognitive peut connaître, percevoir et apprendre de son environnement puis agir pour simplifier la vie de l'utilisateur ».

D'où le mot « cognitive », la cognition étant l'ensemble des grandes fonctions de l'esprit liées à la connaissance, à savoir la perception, le langage, la mémoire, le raisonnement, la décision, le mouvement, etc....

I.2.2. Les enjeux de la radio cognitive

En télécommunications, tout est régi par des normes et des réglementations définies par les organismes de normalisation tels que l'ISO, l'IEEE ou encore l'IUT.

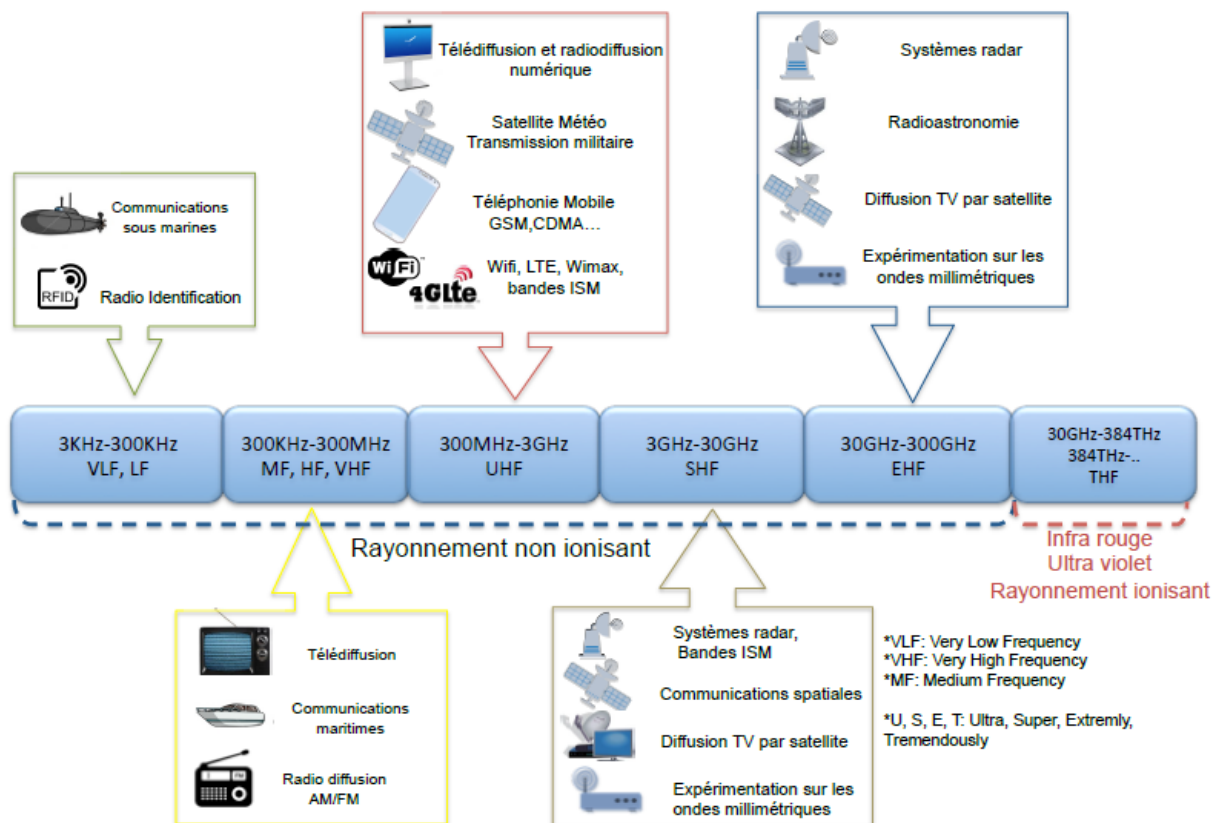


Figure I. 2 Bandes fréquentielles en fonction du domaine d'application

Les fréquences varient selon le domaine d'utilisation : téléphonie mobile, radio ou télévision, et selon que ce soit d'ordre civil ou militaire. Ces fréquences sont dites licenciées. Elles se situent dans l'axe allant de 3 KHz à 300 GHz

Selon François Rancy, directeur du bureau des radiocommunications à l'UIT " *le spectre est sur-utilisé et sur-attribué* "; cette organisation statique des fréquences montre des failles : certains spectres sont saturés dépendamment de la zone géographique (densité de la population) et de l'heure de la journée, tandis que d'autres restent inutilisés. C'est le cas notamment pour la télévision et en aéronautique ; le taux moyen d'utilisation du spectre est d'environ 50 %, et même inférieur à 10 % sur certaines bandes, selon les pays, tandis que pour la téléphonie mobile, la pénurie se fait déjà ressentir en termes de ressource spectrale. Ceci est dû au fait que la téléphonie n'utilise que la bande inférieure des 300 GHz, en effet, elle ne peut aller au-delà de 5GHz car plus la fréquence augmente, moins grande sera la portée.

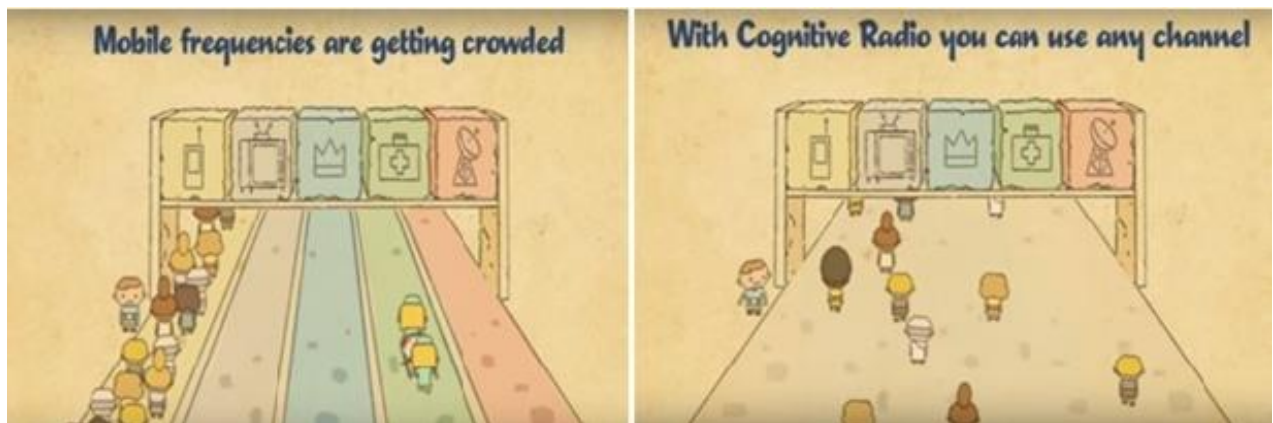


Figure I. 3 Illustration sur les enjeux de la radio cognitive

Le principal enjeu de la radio cognitive est d'utiliser opportunément les bandes sous-utilisées.

Son objectif c'est la dynamisation de l'exploitation du spectre en introduisant la notion d'utilisateur principal (*primary user PU*) et utilisateur secondaire (*secondary user SU*).

L'optimisation spectrale est réalisée en permettant à l'utilisateur secondaire l'émission et la réception de données via des portions de spectre quand l'utilisateur primaire est inactif. Ce partage de bandes est possible parce que les utilisateurs n'utilisent pas une même fréquence au même endroit.

I.2.3. Définition

La radio cognitive est une forme de communication sans fil dans laquelle un émetteur/récepteur peut détecter intelligemment les canaux de communication qui sont en cours d'utilisation et ceux qui ne le sont pas, et peut se déplacer dans les canaux inutilisés. Ceci permet d'optimiser l'utilisation des fréquences radio disponibles (RF) du spectre tout en minimisant les interférences avec d'autres utilisateurs.

C'est une radio intelligente programmée et configurée dynamiquement, elle permet d'adapter chaque appareil aux conditions spectrales du moment et offre donc aux utilisateurs un accès plus souple, efficace et complet à cette ressource.

Elle détecte les canaux environnants disponibles grâce à ses émetteurs/récepteurs et ajuste ses paramètres pour une transmission optimale tels que la fréquence de la porteuse, la modulation, la puissance d'émission, etc...

I.2.4. Radio logicielle (Software Radio)

Une classe de radio programmable et reconfigurable a été introduite par Joseph Mitola au début des années 90, qui définit la radio logicielle idéale, son objectif consiste en une dématérialisation complète de l'interface radio, constituée uniquement d'une antenne et d'un ADC (convertisseur analogique-numérique). Jusqu'à aujourd'hui, cet idéal n'a pas été atteint. On parle alors la radio logicielle restreinte qui elle, est composée de plusieurs équipements matériels. Cependant de nombreux éléments de la radio ont été dématérialisés, comme les fonctions caractéristiques de l'interface radio (la fréquence porteuse, la largeur de bande du signal et les techniques de modulation) qui sont maintenant définies sous forme logicielle.

Dans une radio logicielle, les propriétés de la fréquence porteuse, de la bande passante du signal, de la modulation et de l'accès au réseau sont définies par logiciel. Celles-ci sont donc destinées à être portables sur toute plate-forme. La radio logicielle moderne intègre également l'implantation logicielle des procédés de cryptographie, codage correcteur d'erreur, codage source de la voix, de la vidéo ou des données.

Les Figures I.4 et I.5 représentent le passage de radio matérielle à la radio logicielle, en montrant la partie dématérialisée.

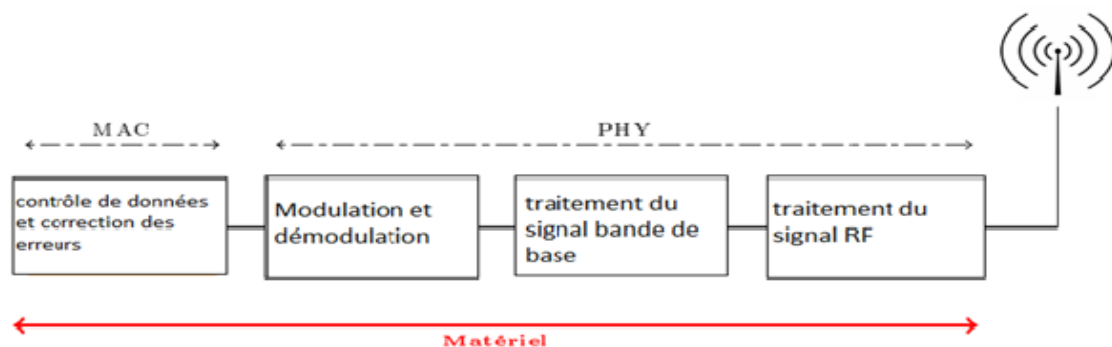


Figure I. 4 Architecture d'une radio matérielle

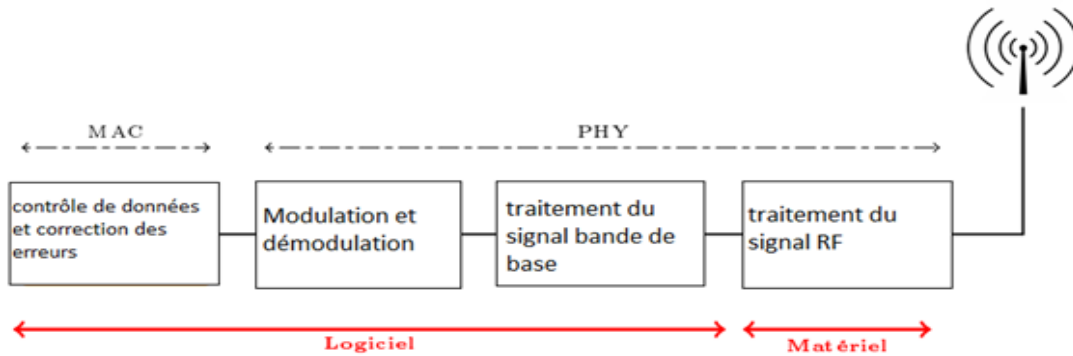


Figure I. 5 Architecture d'une radio logicielle

I.2.5. Radio logicielle restreinte

La radio logicielle restreinte est une phase intermédiaire qui combine les anciennes et les nouvelles techniques ; ce concept permet de résoudre des problèmes de la gestion dynamique du spectre et d'appliquer n'importe quelle modulation tout en utilisant le même support matériel. C'est-à-dire le SDR idéal peut s'adapter automatiquement aux nouvelles fréquences et aux nouvelles modulations.

I.3. Les fonctions de la radio cognitive

Une radio cognitive observe les bandes spectrales et capture leurs informations puis détecte les espaces non utilisés (espaces blancs). La bande de spectre appropriée est alors choisie en fonction des caractéristiques et des exigences des utilisateurs. Une fois la bande spectrale déterminée la communication peut être exécutée sur cette bande.

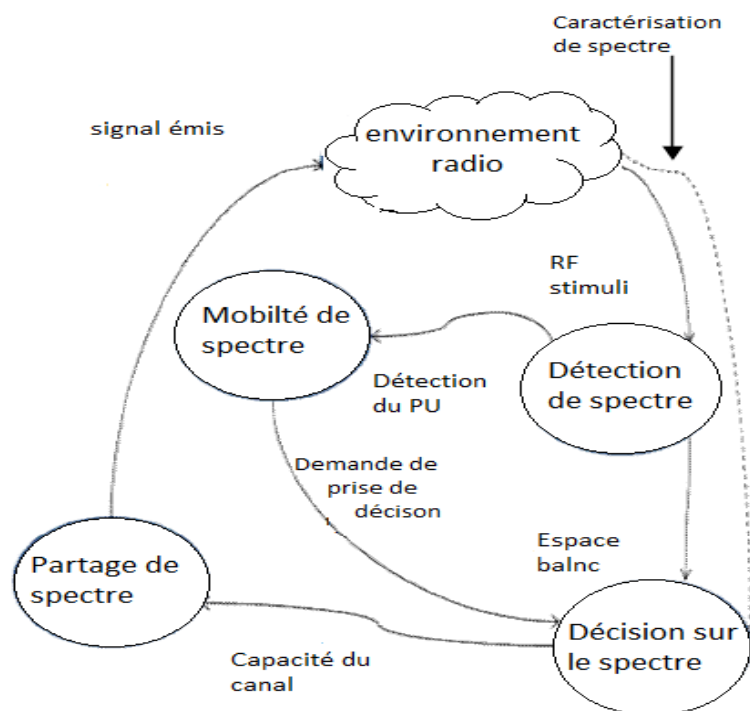


Figure I. 6 Fonctions de la radio cognitive

I.3.1. Détection sur le spectre (Spectrum sensing)

Détecter le spectre non utilisé et le partager sans interférence avec d'autres utilisateurs. La détection des utilisateurs primaires est la façon la plus efficace pour détecter les espaces blancs du spectre.

I.3.2. Gestion du spectre (spectrum management)

Capter les meilleures fréquences disponibles pour répondre aux besoins de communication des utilisateurs.

I.3.3. Mobilité du spectre (Spectrum mobility)

Aussi appelé processus de transfert, il est effectué lorsque le canal occupé par les utilisateurs secondaires est interrompu ou récupéré par les utilisateurs principaux. Aussitôt que l'utilisateur principal apparaît, l'utilisateur secondaire doit quitter le canal de fréquence pour éviter les interférences avec l'utilisateur principal et passer à une autre chaîne gratuite disponible pour reprendre et terminer sa transmission continue.

I.3.4. Partage de spectre (Spectrum sharing)

La radio cognitive doit avoir accès au spectre et le partager avec plusieurs autres utilisateurs (secondaires ou principaux), en fournissant une authentique méthode d'ordonnancement spectral (spectral scheduling) entre les utilisateurs. Le partage de spectre est le défi majeur de l'utilisation du spectre libre, il consiste à distribuer le spectre entre les utilisateurs principaux et secondaires de sorte qu'il n'y ait pas de collision entre eux.

I.4. Types de détection de spectre

La détection de spectre est l'élément clé de la communication dans les RCs, c'est la capacité de déterminer et de détecter si l'utilisateur principal est absent ou présent. Cela va permettre à l'utilisateur secondaire d'utiliser son canal ou bien de passer à une autre bande pour éviter les interférences.

La capacité de la RC à accéder dynamiquement aux canaux non utilisés dépend de sa capacité à détecter ces espaces blancs.

La technique de détection de spectre est divisée en deux catégories : technique directe et indirecte.

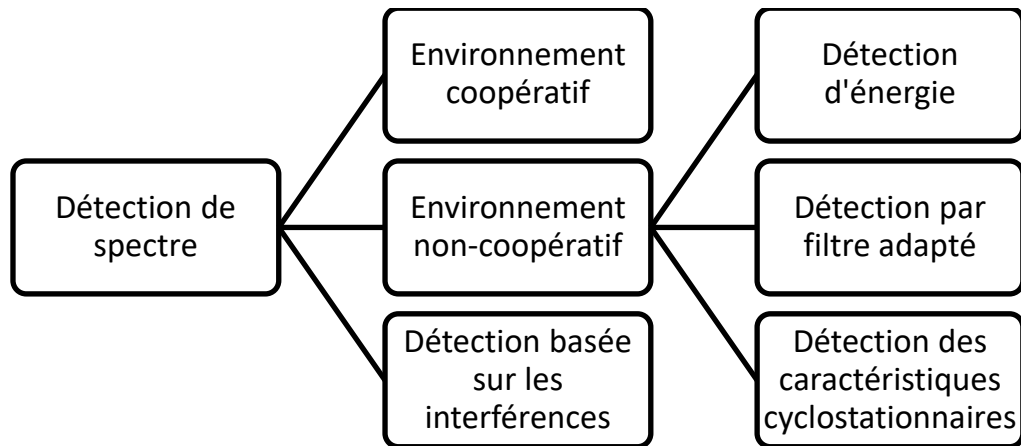


Figure I. 7 Types de détection de spectre

I.4.1. Décision dans un environnement non-coopératif

Dans un environnement non coopératif, l'utilisateur secondaire(SU) se base sur la détection du signal de l'utilisateur principal(PU), d'où l'appellation « détection de l'émetteur ».

On y trouve trois types :

I.4.1.1. Détection d'énergie

La détection d'énergie est une méthode non cohérente pour détecter le signal du PU. Cette méthode est utilisée lorsque le SU ne rassemble pas assez d'information sur le PU.

La détection d'énergie est l'une des méthodes les plus simples et les plus populaires dans la détection de spectre ; elle ne nécessite pas de connaissances sur le signal du PU si on connaît la puissance du bruit.

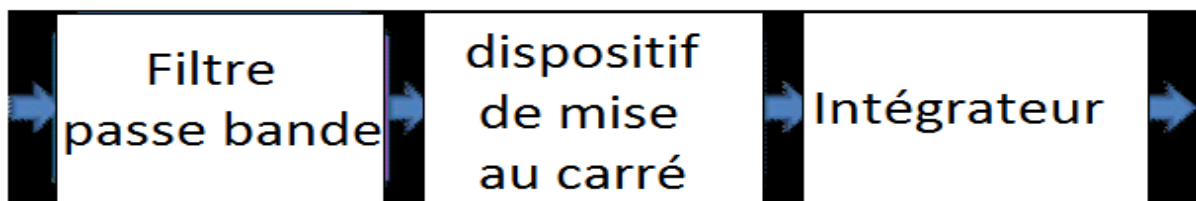


Figure I. 8 Diagramme de détection de spectre

Un détecteur d'énergie est aussi appelé Radiomètre.

La figure I-8 ci-dessus représente le diagramme de détection d'énergie, qui est constitué de trois blocs. On retrouve d'abord un filtre passe bande, qui sélectionne la bande de fréquence spécifique à l'utilisateur, suivi d'un dispositif de mise au carré, utilisé pour mesurer l'énergie de réception. Celle-ci passe ensuite par l'intégrateur qui va déterminer l'intervalle de temps; La valeur obtenue à la sortie est comparée au seuil, si c'est supérieur au seuil, on admet que le PU est présent, sinon il est considéré comme absent [2].

I.4.1.2. Détection par filtre adapté

Pour détecter si le signal est présent ou non, on passe le signal par un filtre. Celui-ci aura pour but d'augmenter l'amplitude du signal utile et de supprimer l'amplitude du bruit au même temps.

Utiliser ce type de filtre nous permettra d'avoir un fort contraste entre le signal et le bruit, ce qui nous permettra de savoir si le PU est présent ou absent ; si à la sortie on remarque un pic dans l'amplitude du signal cela voudra dire que le PU est présent à cet instant, et si on ne remarque rien c'est que le PU est absent. Ce filtre est appelé « filtre adapté ».

I.4.1.3. Détection des caractéristiques cyclostationnaires

En technique de détection cyclostationnaire, on utilise la fonctionnalité statique intégrée d'un signal; le bruit de fond et les interférences ne sont pas liés au domaine temporel ou fréquentiel. Ainsi, si le SU possède les statistiques des informations de la fonction de corrélation du signal du PU, il peut augmenter la précision de détection.

I.4.2. Dans un environnement coopératif

La détection coopérative permet aux SUs de coopérer et consolider leurs efforts de détection afin de parvenir à une conclusion plus précise sur la disponibilité du spectre. Cette approche possède un inconvénient majeur, qui est le problème de nœud caché dans le résultat de la détection [2].

- **L'approche centralisée :** équipée d'une entité centrale (aussi appelé centre de fusion), chaque nœud effectue sa propre détection de la présence du PU, et en informe l'entité centrale, qui à son tour va informer tous les autres utilisateurs de la radio cognitive par la méthode de diffusion (Broadcast), le centre de fusion se charge aussi d'englober toutes les détections de tous les utilisateurs secondaires.

- **Technique distribuée:** ce type d'approche nécessite la construction d'un réseau de radio cognitive, le centre de fusion n'est pas indispensable, de nombreux algorithmes ont été proposés dont l'algorithme de bavardage et des schémas de regroupement. Cette approche augmente la nécessité d'un canal dédié. Chaque nœud reçoit les détections des nœuds voisins et les combine avec la sienne pour enfin prendre la décision finale [3].

I.4.3. Détection basée sur les interférences

La détection basée sur les interférences dépend de la détection du récepteur primaire et de la gestion de la température des interférences.

I.5. Architecture de la radio cognitive

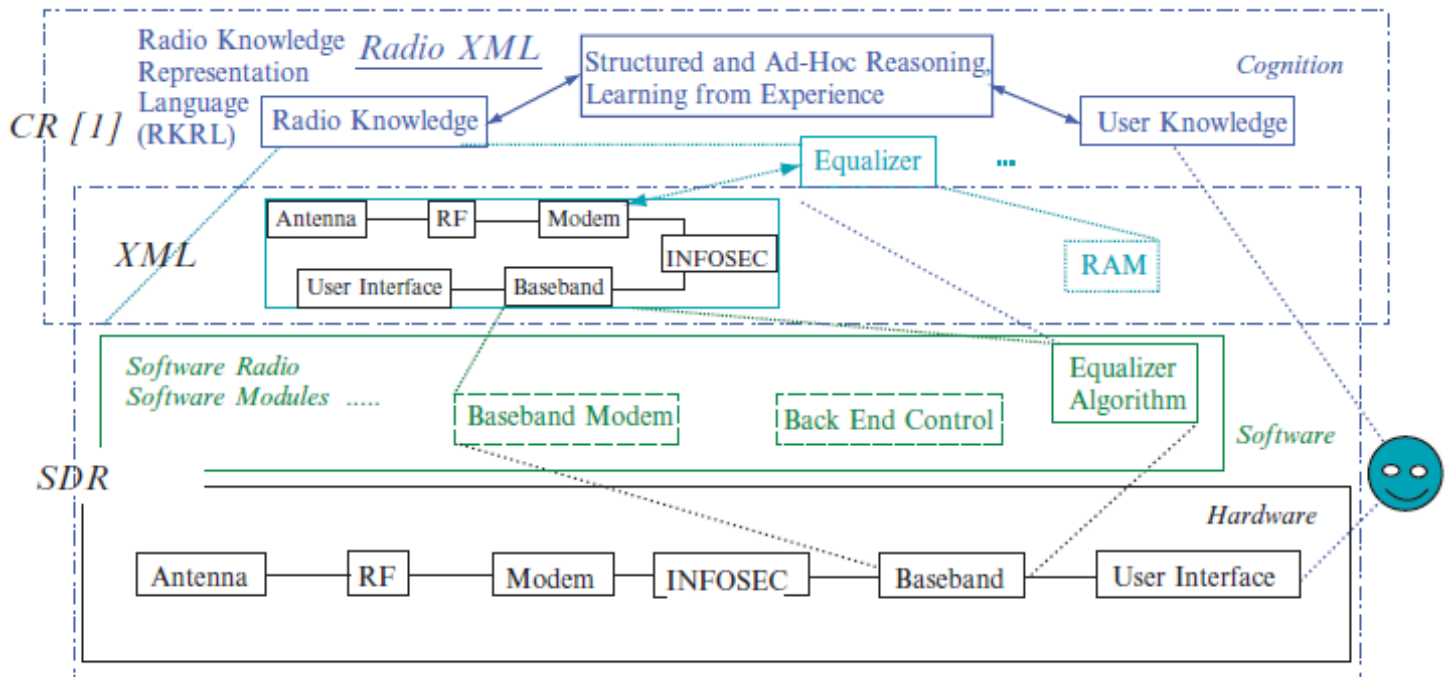


Figure I. 9 Architecture de la radio cognitive selon Joseph Mitola III

L'architecture de la radio cognitive englobe un ensemble de composants matériels ou logiciels, de fonctions ainsi que des règles de conception qu'on appelle des règles de design. Elle est axée principalement autour de la radio logicielle qui fait partie intégrante de la radio cognitive. Se sont ajoutées à ce concept, l'aptitude cognitive, la capacité de raisonnement, une intelligence ainsi qu'une modélisation de son environnement.

I.5.1. La partie matérielle/ Hardware

En premier lieu, la plateforme matérielle est constituée d'une antenne, d'un modulateur RF, et d'un modem. Elle comprend en outre la bande de base/baseband, sécurité des informations et l'interface utilisateur.

I.5.2. La partie logicielle/ Software

Ensuite, vient la partie logicielle qui comprend le modem en bande de base, un contrôle back end pour la partie serveur et un algorithme d'égalisation.

Cette architecture est définie par un langage de modélisation unifié UML qui est un langage de modélisation graphique à base de pictogrammes conçu pour fournir une méthode normalisée pour visualiser la conception d'un système. Les modèles UML sont décrits en l'occurrence par un langage de balisage XML.

I.5.3. La partie cognition

Enfin vient la cognition qui décrit la radio dans un langage appelé RXML pour *Radio eXtensible Markup Language* qui est un langage de balisage extensible. Elle contient le *radio knowledge* considéré comme le moteur d'intelligence, c'est un outil d'apprentissage qui construit des règles au fur et à mesure qu'il reçoit des paramètres de la radio logicielle et les enregistre.

Structured and ad hoc reasoning, learning from experience est un outil de raisonnement qui gère la prise de décision lorsque plusieurs actions sont possibles.

La radio cognitive utilise également son propre langage RKRL pour *Radio Knowledge Representation Language*.

I.6. Architecture simplifiée

- Il existe une multitude de représentations de la radio cognitive proposées par des chercheurs tels que le Dr. Joseph Mitola III mais aussi le Pr. Simon S. Haykin ainsi que l'institut IEEE.
- La version simplifiée et minimaliste de cette architecture est représentée dans la Figure I.10 ci-dessous :

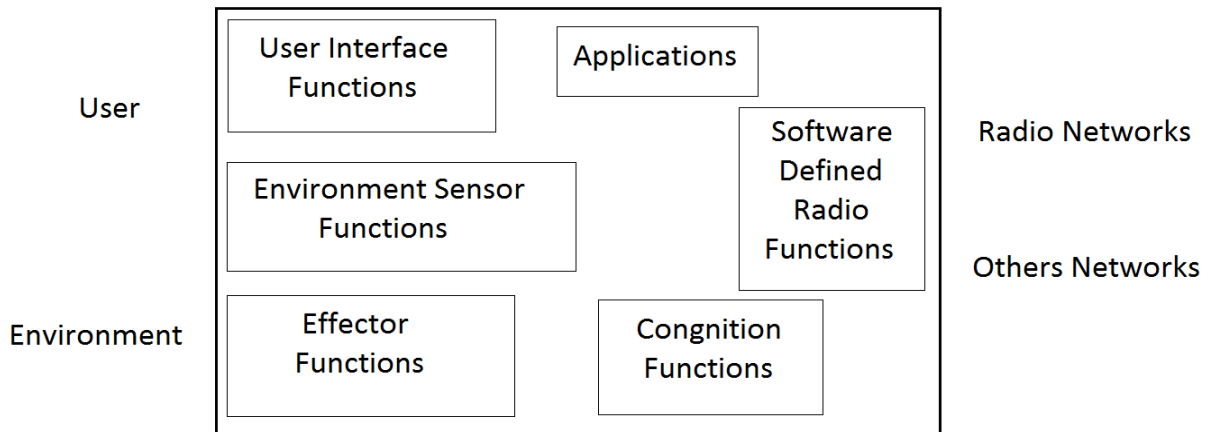


Figure I. 10 Les composants fonctionnels de l'architecture de la radio cognitive

Elle est composée de 6 boîtes noires auxquelles on a attribué des fonctions, ces boîtes noires sont ses composantes fonctionnelles :

- **User Interface Functions** : La perception sensorielle (*Sensory Perception* : *SP*) de l'utilisateur, comprend des boutons qui sont l'interface haptique (du toucher) et des microphones qui sont l'interface audio permettant une détection acoustique capable de gérer plusieurs hauts parleurs simultanément ; elle comprend aussi une perception visuelle de scène capable d'inclure une vidéo en plein mouvement. En plus de cela, le sous-système audio ne se contente pas de coder l'audio pour la transmission, il analyse et interprète également l'audio. Ce sont donc des fonctions de détection et de perception.

- **Effector Functions** : Les fonctions locales effectrices (synthèse de la parole, du texte, des graphiques et des affiches multimédias). Le sous-système de texte analyse et interprète la langue pour suivre les états d'information de l'utilisateur en détectant les plans et les besoins potentiels en matière de communication et d'information ; ainsi les effecteurs locaux synthétisent la parole avec les graphiques textuels traditionnels et les affichages multimédias.

- ✓ Ces deux interfaces forment l'interface utilisateur traditionnelle, elle va au-delà des boutons et des affichages.

- **Environment Sensor Functions** : les capteurs de l'environnement local (emplacement, température, accéléromètre, etc.).

- **Applications** : Les applications système (les services médias indépendants comme un jeu en réseau) sont les services d'information qui définissent la valeur pour l'utilisateur.

- **Software Defined Radio Functions** : Les fonctions SDR (qui incluent la détection RF et les applications radio de la SDR).

- **Cognition Functions** : Les fonctions de la cognition (pour les systèmes de contrôle, de planification, d'apprentissage) comprend les actions de planification et d'initiation qui apprennent les préférences de l'utilisateur.

I.7. Cycle de cognition

On a vu dans l'architecture de la radio cognitive que la CR contient une partie cognition. Celle-ci est constituée d'un ensemble de composants qui exécutent différentes tâches; la figure ci-dessus illustre un schéma simplifié du cycle de cognition proposé par Mitola pour la radio cognitive idéale

Le cycle se déroule en plusieurs étapes ; parmi elles, on retrouve l'observation, l'orientation, la planification, la décision et l'action, comme nous le montre la Figure I.11 ci-dessous :

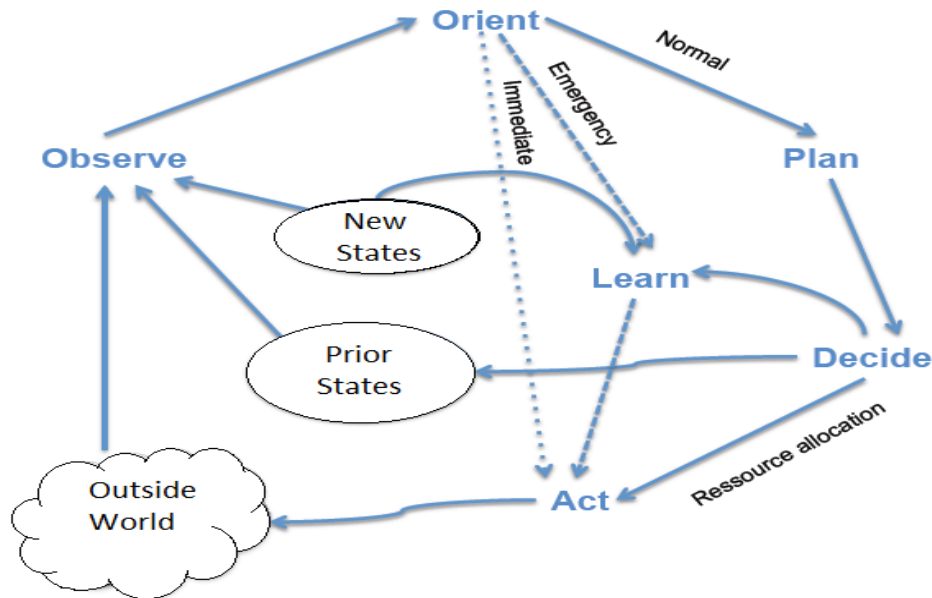


Figure I. 11 Cycle de cognition de Mitola

I.7.1. Phase d'observation (Observe)

La radio cognitive observe son environnement, détecte et perçoit le flux de stimuli entrant afin de le lier aux expériences antérieures pour pouvoir générer un plan d'action. Parmi les six composantes citées précédemment, la phase d'observation comprend la perception sensorielle (user SP) et les capteurs d'environnement local.

I.7.2. Phase d'orientation (Orient)

Dans le but d'identifier les différents modèles de communication, la phase d'orientation traite l'ensemble de stimuli recueillis dans la phase antérieure en affiliant ces résultats aux scénarios de transmission précédents similaires.

I.7.3. Phase de planification (Plan)

La plupart des stimuli sont traités de manière délibérée plutôt que réactive (les réponses réactive sont prédéfinies par un réseau), en cas de traitement d'état normal, un message entrant du réseau extérieur engendre la génération d'un plan, qui devrait inclure un raisonnement dans le temps.

I.7.4. Phase de décision (Decide)

La phase de décision sélectionne un schéma d'allocation parmi les différents plans possibles, l'interface radio pourrait avoir le choix d'avertir l'utilisateur d'un message entrant ou reporter la notification à plus tard.

I.7.5. Phase d'action (Act)

Cette phase exécute le schéma d'allocation sélectionné à la phase précédente, ce n'est pas un schéma fixe il peut être changé à tout moment

I.7.6. Phase d'apprentissage (Learn)

La phase d'apprentissage commence dès la création d'un nouveau modèle d'allocation ; l'apprentissage initial quant à lui, débute dès que la phase d'observation commence, où les expériences sont comparées aux stimuli précédents, comparer les stimuli antérieurs et courants aux attentes des utilisateurs permet à la RC d'en apprendre davantage sur un mode de communication.

I.8. Propriétés fondamentales de la radio transmission

Une transmission radio entre deux nœuds d'un réseau n'est possible que si l'émetteur envoie un signal assez fort pour être décodé par le récepteur avec un taux d'erreur acceptable, ces dernières sont causées par différentes perturbations comme les obstacles physiques ou bien des signaux d'interférences causés par des transmissions simultanées, ces perturbations sont définies comme des phénomènes résultants de la propagation du signal dans l'environnement.

Les réseaux radio cognitifs, comme tout autre réseau utilisant la transmission radio, sont donc exposés à un certain nombre de problèmes liés à l'environnement radio ce qui cause au niveau du récepteur des erreurs lors du décodage du signal.

I.8.1. Les ondes radio

Une Onde radio est une énergie qui se propage dans l'espace « à la vitesse de la lumière ». Certains de ces rayonnements peuvent être visibles, on parle alors de rayons lumineux, pouvant se décomposer du rouge au violet. Les ondes se propagent en ligne droite à une vitesse de 300 000 km/s dans l'air ou le vide, et peuvent être ralenties, renvoyées ou déviées par différents objets.

Dans les réseaux radio les ondes sont classées généralement selon leurs fréquences, l'ensemble de toutes ces fréquences forment le spectre des fréquences radio qui est divisé en bandes, ces bandes sont séparées par un espace non utilisable appelé bande de garde qui sert à la protection de la transmission des données contre les interférences.

I.8.2. Notion du canal

Le spectre de fréquences utilisé par un nœud est divisé en un certain nombre de blocs appelés canaux. Un ou plusieurs nœuds peuvent accéder à un ou plusieurs canaux afin de transmettre leurs données ; ce procédé permet de partager la ressource radio entre plusieurs utilisateurs au même moment [4]. Le canal radio est borné par une fréquence inférieure et une fréquence supérieure, la différence entre ces deux fréquences représente la largeur du canal de transmission, un canal est aussi représenté par sa fréquence centrale.

I.8.3. Bruit

Tout signal indésirable et non porteur d'information, qui se superpose au signal original, est défini comme Bruit.

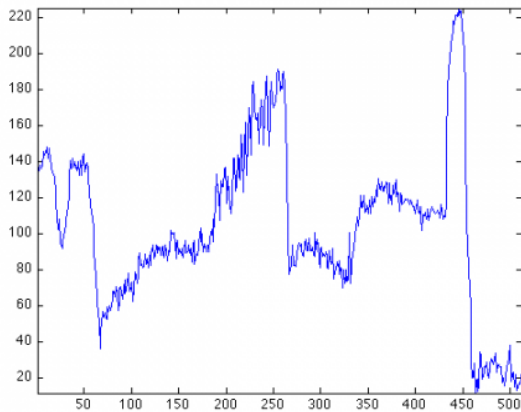


Figure I. 12 Signal original

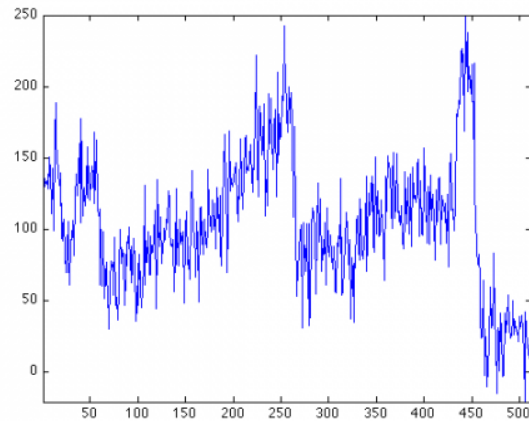


Figure I. 13 Signal+bruit

Le bruit peut être accidentel ou délibéré, il cause une dégradation du signal original et crée des signaux artificiels qui peuvent sembler réels, appelés artefacts.

I.8.4. Propagation

Une Onde radio se propage dans le vide à la vitesse de la lumière, tandis que dans l'atmosphère elle peut subir plusieurs perturbations, ce qui peut réduire sa vitesse de propagation ou dévier sa trajectoire.

L'atténuation ou l'affaiblissement d'un signal est un effet lié directement à la distance parcourue par le signal, c'est pour cela il a un effet non aléatoire, plus la distance entre deux nœuds est grande, plus le signal perçu par le récepteur est faible. En effet cet affaiblissement est donné par la loi suivante :

$$R(dB) = 10 \times \log \frac{P_2}{P_1} \quad (I.1)$$

(P2 : la puissance à la sortie du support de transmission, P1 : puissance à l'entrée)

Lorsque R est positif on parle d'amplification, lorsqu'il est négatif on parle d'atténuation.

L'évanouissement du signal est souvent résultant de trajets multiples, ce phénomène est causé par la collision et la réflexion du signal avec des obstacles physiques. Ces différents trajets généreront à la réception plusieurs versions du signal transmis, possédant chacune une atténuation différente.

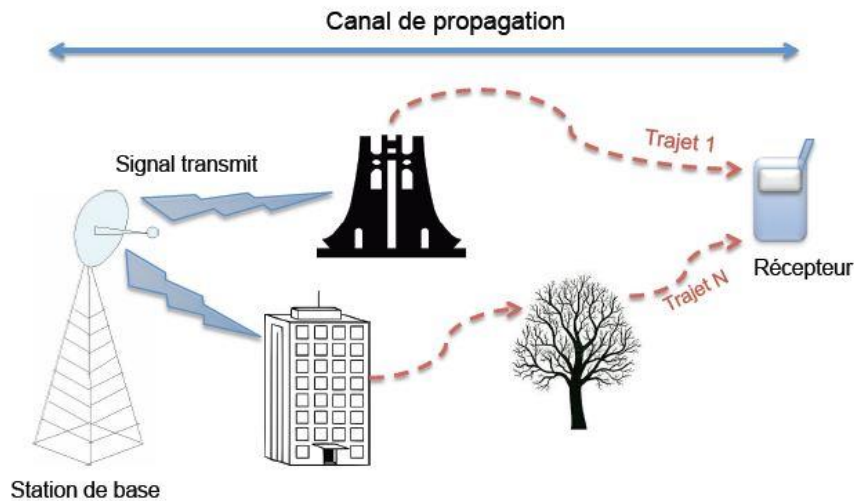


Figure I. 14 Evanouissements multi-trajet

I.8.5. Interférences

Une Interférence est la superposition de deux ou plusieurs ondes radio, lorsqu'une transmission est émise par un nœud A vers un nœud B dans un RRC, son signal est perçu par tous les autres nœuds se trouvant dans le champ de transmission du nœud A.

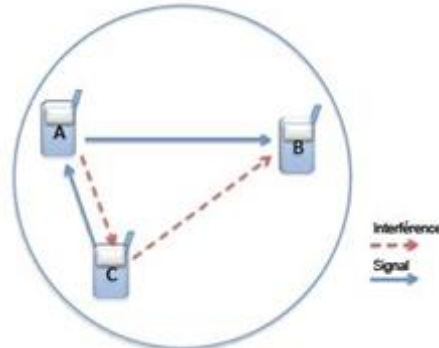


Figure I. 15 Transmission interférente

Sur la Figure I.15 ci-dessus, le récepteur B est entrain de recevoir le signal de la transmission qui lui est destinée et émis par A en même temps, il reçoit aussi le signal de la transmission émis par C, de la même manière, C perçoit tout signal émis par tout autre nœud assez proche, en même temps qu'il est en train de transmettre à A.

Les transmissions interférentes sont très fréquentes dans les RRCs, elles sont le résultat de transmissions concurrentes de plusieurs utilisateurs secondaires sur le même canal de transmission à un instant donné. De plus, les SU peuvent interférer aux transmissions primaires, mais cette interférence est considérée tolérable en dessous d'un certain seuil.

Les interférences peuvent être classifiées en deux catégories : interférences primaires et interférences secondaires [5].

- Interférences primaires

Ces interférences perçues par un nœud sont causées par des transmissions dont il est destinataire ou émetteur, deux scénarios sont donc possibles :

Le 1^{er} cas : Illustré par la Figure I.16, le nœud A émet un signal vers le nœud B, alors que ce dernier est également en train d'émettre sur le même canal, il y a interférence au niveau de B car il perçoit simultanément son signal et le signal de A. Donc il n'est pas possible pour un nœud d'émettre et de recevoir au même moment sur un même canal

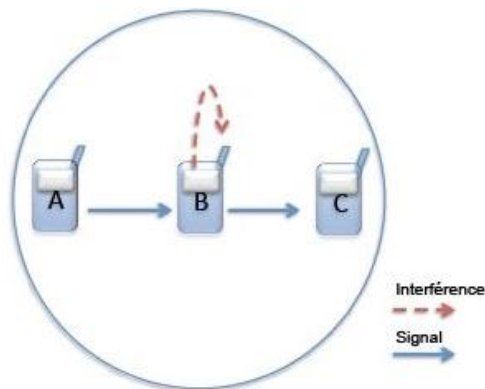


Figure I. 16 Interférences primaires cas 1

Le 2^{ème} cas : c'est presque le même scénario du 1^{er} cas, sauf qu'ici le nœud B est récepteur de plusieurs transmissions simultanées, comme montré dans la Figure I.17 ci-dessous.

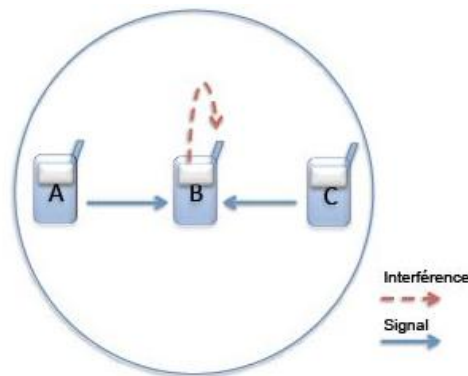


Figure I. 17 interférences primaires cas 2

- Interférences secondaires :

Ces interférences perçues par un nœud sont causées par des transmissions qui ne le concernent pas, c'est-à-dire le nœud n'est ni l'origine ni le destinataire de ces transmissions.

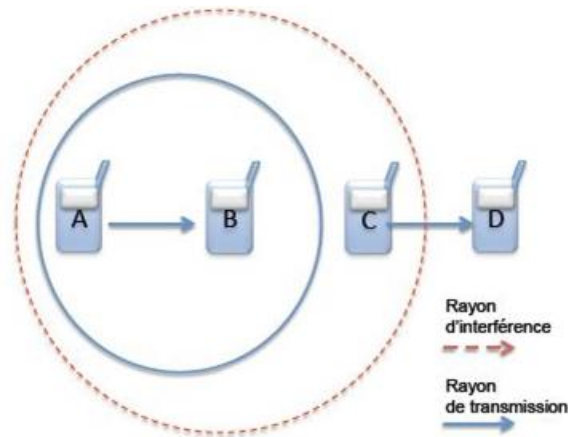


Figure I. 18 Interférences secondaires

Sur la Figure I.18 ci-dessus, le nœud A transmet un signal vers le nœud B, le nœud C transmet un signal vers le nœud D, C est dans le rayon d'interférence de A. Quand les deux transmissions se font au même moment, la transmission C vers D interfère avec la transmission de A vers B, au niveau de C, cette interférence est dite alors de type secondaire car le nœud C n'est ni émetteur, ni récepteur de la transmission de A vers B.

- Le rayon de transmission d'un nœud émetteur représente la distance maximale avec un nœud récepteur, afin que ce dernier puisse décoder le signal reçu.
- Le rayon d'interférence généré par une transmission est supérieur à son rayon de transmission.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la radio cognitive et ses enjeux dans le domaine des radios communications, ses fonctions ainsi que des notions importantes concernant son architecture et son principe de fonctionnement.

Ses fonctionnalités de base lui permettent la détection du spectre en évitant les interférences tout en captant les meilleures fréquences disponibles.

La radio cognitive, grâce à son intelligence artificielle, permet donc à l'utilisateur de s'adapter à n'importe quelles conditions spectrales. Elle exécute plusieurs tâches à l'aide de ses nombreux composants, format ainsi que le cycle de cognition qui l'aide dans la prise de décision relative à l'occupation spectrale.

Chapitre II

**Allocation de ressources dans les
réseaux radio cognitifs**

II.1. Introduction

La prépondérance des réseaux sans fils ces dernières années n'est plus à démontrer notamment grâce à la croissance explosive des abonnés à ces services.

Que ce soit pour la télévision ou encore pour la téléphonie mobile, les réseaux filaires semblent n'être plus qu'un spectre du passé laissant place aux ondes hertziennes. Mais ces dernières sont une ressource naturelle susceptible de s'épuiser. Les réseaux radio cognitifs sont donc idéals afin de mieux exploiter cette précieuse ressource.

L'allocation des ressources dans les réseaux radio cognitifs déterminent la manière la plus efficace de répartir le spectre tout en utilisant les bonnes méthodes.

Dans ce chapitre, nous allons présenter ces techniques qui permettent de réaliser une bonne allocation et définir les critères d'allocation et en quoi cela consiste.

II.2. Définition des problèmes d'allocation du spectre radio dans les RRC

L'allocation des ressources radio en RC est l'assignation des bandes de fréquences appropriées aux SUs suivant quelques critères, contrairement aux réseaux sans fils traditionnels où l'allocation des canaux, le nombre de canaux, la largeur de bande et leurs disponibilités sont connus et fixes dans le temps. Dans un RC il n'existe pas de spécifications strictes pour les canaux d'un point de vue largeur de canal, nombre de canaux et fréquence centrale ; cependant, il faut prendre en considération l'aspect variable de la disponibilité dans le temps, ce qui augmente considérablement la complexité du problème d'allocation spectrale dans les RRC par rapport au problèmes d'allocation des canaux dans les réseaux sans fil qui est déjà NP-Complet[6][7].

Dans les réseaux sans fil traditionnels, des algorithmes fixes, dynamiques et hybrides sont déjà mis à disposition. Dans les RRCs, un schéma fixe d'allocation ne peut avoir une application réelle en raison de la variabilité de ses caractéristiques du spectre dans le temps, seules les techniques d'accès dynamiques existent.

Le problème rencontré par la RC est celui des interférences causées aux PUs par les SUs; réduire celles-ci amélioreront les performances des RRC, les interférences entraînent un bruit au niveau du récepteur ce qui engendre une diminution de la valeur du SINR, entraînant ainsi :

- Un temps de transmission réduit au niveau des interfaces radio.
- Une utilisation réduite des ressources radio.
- Un taux de pertes de trame plus élevé.

- Un délai de retransmission de paquet supérieur et un débit de réception inférieur.

II.3. Critères d'allocation de bande spectrale

En radio cognitive, on rencontre diverses contraintes liées au problème d'accès des utilisateurs secondaires aux canaux des utilisateurs principaux, pour cela dans les RRC on retrouve plusieurs critères d'allocation ; nous abordons quelques-uns dans ce qui va suivre.

II.3.1. Interférence/puissance

Afin de maximiser la capacité globale du réseau RC, les interférences entre les SUs et les interférences créées par les SUs aux utilisateurs disposant d'une licence, doivent être maintenues en dessous d'un certain seuil. Pour cela, l'interférence est considérée comme le critère le plus important [9-12].

_ Les nœuds sont supposés être coopératifs et échanger des données concernant leurs puissances de transmission.

_ Si le SINR calculé au niveau de l'émetteur est supérieur à un certain seuil, les nœuds peuvent transmettre avec un maximum de puissance. La valeur du SINR d'un nœud est supposée être connue par tous les nœuds voisins.

_ Les nœuds cognitifs peuvent transmettre avec une puissance maximale tant que l'ITL des PUs voisins est en dessous d'un certain seuil, ce qui suppose l'échange de cette information entre les PUs et SUs.

L'ITL (Interference Temperature Limit) indique le montant des interférences détectées par un récepteur [13], elle est donnée par la formule suivante :

$$ITL = \frac{Pr}{W * K} \quad (II.1)$$

Où P_r est la puissance reçue par une antenne, W la bande passante associée et K la constante de Boltzman ($K = 1.3807$ Watt-sec / Kelvin).

D'autre part, la puissance de transmission doit être soigneusement sélectionnée afin de garder le SINR au-dessus du seuil autorisé pour garantir l'établissement des transmissions.

En fait, le calcul du SINR permet de déterminer la faisabilité d'une transmission secondaire et il est recalculé de manière continue afin de prendre en compte les interférences générées par les transmissions de nouveaux utilisateurs.

II.3.2. Débit

Comme dans les réseaux sans fils traditionnels, la maximisation du débit est aussi un critère très commun lors de l'affectation des canaux dans les réseaux RC. Il y a des travaux qui considèrent la somme des débits des SUs comme un critère

d'allocation principale afin de maximiser la capacité totale des nœuds cognitifs [14]. Le débit de données maximal de chaque utilisateur est calculé ainsi :

$$R = W \log\left(1 + \left(\frac{1}{Kb}\right) \left(\frac{Pt}{Id\alpha}\right)\right) \quad (\text{II.2})$$

Avec W la largeur de bande utilisée, Pt la puissance de transmission du nœud, I l'interférence soumise par l'utilisation de la bande et da la distance entre l'émetteur et le récepteur, avec $Kb = -\frac{2}{3} \ln \frac{Pbber}{2}$ ($Pbber$: la probabilité du taux d'erreur)

Tandis que d'autres travaux [15] s'appuient sur la question de maximisation du débit individuel des SUs, le premier SU servi sera capable de sélectionner n'importe quelle largeur de bande avec une puissance de transmission maximale sans prendre en compte les besoins des autres utilisateurs cognitifs du réseau. L'inconvénient ici c'est qu'il peut y avoir un accès concurrent aux bandes RF et une non-équité dans la distribution des fréquences.

Parmi les hypothèses communes qui visent à maximiser le débit des SUs :

- _ Des nœuds cognitifs fixes, ou bien mobiles mais d'une façon telle que la topologie du réseau reste stable.

- _ Les interférences de type co-canal émanant de canaux adjacents sont la seule source de bruit au niveau des récepteurs.

- _ La possibilité de plusieurs transmissions simultanées sur un même canal ou d'une seule transmission.

II.3.3. Maximisation de l'occupation spectrale

La maximisation de l'utilisation spectrale est un critère important de mise en œuvre d'algorithmes d'allocation efficaces. Une méthode d'allocation a été proposée et qui consiste à réutiliser des fragments issus d'assignation de fréquences contiguës [16]. Cette méthode repose sur l'agrégation des fragments afin qu'ils soient réutilisés, ce qui peut considérablement améliorer l'efficacité spectrale. Avec les techniques de multiplexages et de codage des données DOFDM (Discontiguous Orthogonal Frequency Division Multiplexing), l'accès aux fréquences non contiguës et leur agrégation au niveau d'une interface radio devient ainsi possible.

En effet, l'optimisation de l'utilisation spectrale est obtenue lors des suppositions suivantes :

- _ Minimisation d'interférences lors de l'allocation de canaux.

- _ Un nombre de canaux fixe : en général le nombre de canaux ainsi que la largeur de bande de ces derniers sont connus des SUs et fixes dans le temps.

- _ La plupart des travaux supposent que tous les utilisateurs travaillent en collaboration afin de maximiser l'utilisation globale du spectre c'est-à-dire ils

échantent des informations relatives à leurs puissances de transmission maximales autorisées.

II.3.4. Équité entre les utilisateurs cognitifs

Une non-uniformité de l'allocation des bandes peut être observée, particulièrement dans le cas où un SU est autorisé à utiliser plusieurs bandes de fréquences dans le but de maximiser la capacité totale du réseau ou le débit de chaque utilisateur cognitif.

Pour éviter cela, tous les canaux sont supposés avoir la même capacité, de sorte que l'équité peut être mesurée par le nombre de canaux alloués à chaque SU et que chaque SU doit disposer d'une seule interface radio [17].

II.4. Approches d'allocation du spectre

L'allocation de la ressource radio est une fonctionnalité de base dans les réseaux RCs, qui permet l'attribution des bandes de fréquence les plus appropriées aux utilisateurs ne disposant pas de licences afin de transmettre sur des bandes licenciées. Il existe une multitude de méthodes qui permettent une allocation et une gestion efficace du spectre, nous allons les présenter brièvement dans cette section.

II.4.1. Modèle centralisé / distribué

- **Modèle centralisé**

Dans ce type de schéma, un nœud central est utilisé pour les prises de décision concernant l'attribution des canaux aux différents nœuds cognitifs, le nœud central étant généralement une station de base secondaire.

La prise de décision devient plus complexe quand un SU a des objectifs multiples tels que maximiser le rendement tout en minimisant les perturbations.

Inversement, la prise de décision s'avère plus simple dans un milieu coopératif, c'est-à-dire où les RC communiquent les uns avec les autres, et dans ce cas-là, le contrôleur central s'occupe de la gestion du spectre.

Le modèle centralisé est appelé Spectrum Broker, il est capable de mesurer le niveau d'interférence et interagit dynamiquement pour les réduire au maximum et pour améliorer l'utilisation du spectre tout en maintenant une bonne qualité de service QOS. Il permet également de répartir équitablement les bandes allouées aux SUs en minimisant le nombre de SUs transmettant sur plusieurs bandes de fréquences.

- **Modèle distribué**

Utilisé dans les réseaux maillés sans fils principalement, ce modèle ne nécessite aucune entité centrale. Les décisions relatives à l'attribution des canaux ainsi que l'échange des informations sur les paramètres essentiels qui régissent les

transmissions radio tels que les bandes de fréquence et les largeurs de bandes se font par les utilisateurs eux-mêmes.

Un tel modèle présente plusieurs avantages comme la distribution des tâches et des données ce qui rend ce système flexible et tolérant aux pannes car si une entité ne fonctionne plus, le reste du réseau n'en serait pas paralysé et les utilisateurs s'adaptent aisément aux changements qui peuvent se produire tels que la puissance, la fréquence, ...etc.

- **Différences entre un système centralisé et un système distribué**

Systèmes centralisés	Systèmes distribués
Traitement des tâches et données centralisé.	Traitement des tâches et données distribué ;
Difficile à réaliser la tolérance aux pannes.	Tolérance aux pannes.
Si le système principal échoue, tout s'arrête.	La redondance des données et des applications est probable.
Ils ont des composantes non autonomes.	Ils ont des composantes autonomes malgré qu'elles puissent être multiples.
Ils sont souvent construits en utilisant une technologie homogène.	Ils peuvent être construits en utilisant une technologie hétérogène.
Les utilisateurs multiples partagent en permanence les ressources d'un système centralisé.	Les composants du système distribué peuvent être utilisés exclusivement.
Ils ont un seul point de contrôle.	Ils sont exécutés dans des processus simultanés.
Ils ont un seul point d'échec.	Ils ont plusieurs points d'échec.

Tableau 1 : Différences entre un système centralisé et un système distribué

II.4.2. Transmission multi-canaux

Technique permettant d'accéder à plusieurs portions distinctes du spectre grâce aux Multiplexage par Répartition Orthogonale de la Fréquence *DOFDM*.

Ce genre de problème ne se posait pas dans les réseaux traditionnels où les utilisateurs accèdent à des canaux ayant une fréquence centrale et une largeur de bande bien fixe. Or, dans les réseaux radio cognitifs, les SUs peuvent accéder à différents canaux selon leur disponibilité, il est donc difficile d'alterner entre plusieurs canaux éloignés.

Cette technique, bien que récente, s'avère efficace pour augmenter la capacité totale du réseau et permet une meilleure exploitation spectrale.

II.4.3. Prise en compte des utilisateurs primaires

Dans un réseau radio cognitif, les SUs ne doivent pas interférer avec les PUs ; la prise en compte de ces derniers est le souci majeur à considérer dans la modélisation d'un schéma d'allocation de ressources.

Afin de gérer les interférences éventuelles causées par les SUs, une valeur appelée SINR, qui est le rapport signal sur interférence plus bruit, est calculée au niveau des récepteurs primaires [18].

$$\frac{P_{i,c}G_{i,c}}{N_0 + \sum_{j=1, j \neq i} P_{j,c}G_{j,c+\epsilon}} \geq \sigma$$

Avec σ étant le seuil minimal du SINR, $P_{i,c}$ la puissance de transmission du nœud i sur le canal c , $G_{i,c}$ le gain de l'antenne sur le canal c , N_0 le bruit thermique et ϵ est une constante positive qui représente le taux d'interférence que les SUs causent sur un nœud primaire i .

Ainsi, lorsque cette contrainte est satisfaite, les utilisateurs cognitifs peuvent transmettre sur le canal utilisé par l'utilisateur primaire i .

II.5. La radio cognitive et l'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle est un ensemble de théories et de techniques développant des programmes informatiques complexes capables de simuler certains traits de l'intelligence humaine (raisonnement, apprentissage...).

Ce domaine est indissociable de la radio cognitive ; ses techniques pour l'apprentissage et la prise de décision s'appliquent à la conception et la mise en pratique de systèmes pour les réseaux radio cognitifs. Le concept de l'apprentissage automatique peut être appliqué à la radio cognitive pour la maximisation des capacités d'accès au spectre dynamique.

En effet, la radio cognitive comprend une base de connaissances, un moteur d'apprentissage et un moteur de raisonnement. (Système multi agents)

La base de connaissances utilise les informations sur le spectre pour assimiler des informations sur son environnement comme le comportement des utilisateurs sous Licence. Ses informations sont réparties en deux types : prédicat et action.

Un exemple de prédicat serait de définir le type de modulation « modulation==QPSK AND SNR == 5db » tandis que l'action peut être définie comme « mode de modulation en baisse » avec pré-condition « SNR ≤ 8dB » et post-condition « modulation ==BPSK ».

En prenant en considération les résultats obtenus à partir des mesures (détection d'énergie), le moteur de raisonnement détermine la véracité des informations « vrai ou faux », puis prend une décision appropriée, en l'occurrence ce serait de réduire le mode de modulation

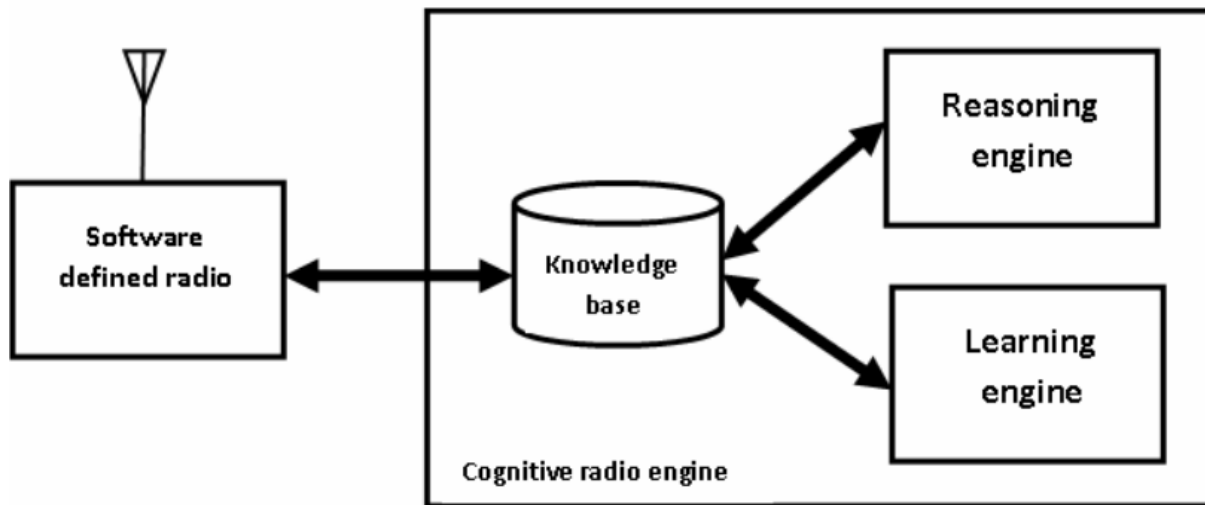


Figure II. 1 Architecture de la radio cognitive avec l'apprentissage automatique

L'algorithme d'apprentissage a pour rôle de mettre à jour l'état du système et les mesures disponibles en fonction de l'environnement radio. Pour ce faire, il utilise ce qu'on appelle en recherche opérationnelle une *fonction objectif*, elle sert de critère pour déterminer la meilleure solution à un problème d'optimisation. Par exemple, réduire le taux d'erreur binaire en tenant compte de l'entrée qui est la qualité du canal et les paramètres disponibles.

II.6. Les systèmes multi agents

Les systèmes IAD sont apparus dans le début des années 80 afin de remédier aux problèmes rencontrés dans les systèmes IA, ceci en distribuant les tâches sur de multiples agents ce qui leur permettra de travailler en parallèle et ainsi augmenter la vitesse de résolution.

A la différence de l'Intelligence Artificielle (IA) qui modélise le comportement intelligent d'un seul agent, l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) s'intéresse à des comportements intelligents qui résultent de l'activité coopérative de plusieurs agents [2].

La mise en place des SMA dans les RRC promet un partage de spectre sans interférences entre les différents utilisateurs, et ce grâce à l'aspect coopératif entre les utilisateurs afin de détecter et partager le spectre.

Les systèmes multi-agents (SMA) ne sont rien d'autre qu'une extension des systèmes IAD. La thématique SMA se focalise sur l'étude des comportements collectifs et sur la répartition de l'intelligence sur des agents plus ou moins autonomes, capables de s'organiser et d'interagir pour résoudre des problèmes [19].

Les SMA selon Ferber sont définis ainsi [20]

« Un système Multi-agents est un système composé des éléments suivants :

Un **environnement** est un espace disposant généralement d'une métrique.

Un ensemble d'**objets** situés dans l'espace, ils sont passifs, ils peuvent être perçus, détruits, créés et modifiés par les agents.

Un ensemble d'**agents** qui sont les entités actives du système.

Un ensemble de **relations** qui unissent les objets entre eux.

Un ensemble d'**opérations** permettant aux agents de percevoir, de détruire, de créer, de transformer et de manipuler les objets.

Un ensemble d'**opérateurs** chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification (les lois de l'univers)».

II.6.1. Agent

Pour mieux comprendre les systèmes multi-agent, on va définir qu'est-ce qu'un agent. Le mot agent est utilisé dans diverses disciplines ; cependant, en informatique, on retrouve une définition bien connue et répondue, à savoir « Un agent est une entité autonome, réelle ou abstraite, qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui, dans un univers multi-agents, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et des interactions avec les autres agents» [20].

II.6.1.1. Propriétés et types d'agent

Pour pouvoir qualifier un agent d'agent intelligent il devra admettre quelques propriétés, en nous aidant de [21] voici les caractéristiques d'un agent :

Autonome : Capacité d'agir sans l'intervention directe d'un tiers, il est indépendant de l'utilisateur et des autres agents.

Flexible : capacité de répondre à temps.

Proactif : Capacité de prendre l'initiative d'agir au bon moment, en outre le fait d'être proactif il devra aussi montrer un comportement opportuniste guidé par ses buts et sa fonction d'utilité.

Réactif : un agent devrait pouvoir percevoir son environnement, élaborer une réponse dans le temps requis et réagir à ses changements, que ce soit la modification des objectifs de l'utilisateur ou des ressources disponibles.

Social : capacité d'interaction avec les autres agents (artificiels ou humains).

Situé : capacité d'agir sur son environnement (susceptible de le changer) à partir des entrées sensorielles reçues de cet environnement.

II.6.1.2. Agent réactif

Des entités sans intelligence, qui ne possèdent pas une présentation de leur environnement, et qui montre un comportement « stimulus-réponse ».

Un agent réactif possède une structure dite simple, un SMA constitué d'un groupe d'agents réactifs peut avoir un comportement intelligent et résoudre des problèmes dits complexes, et aura un nombre important d'agents.

II.6.1.3. Agent cognitif

Des entités intelligentes, qui possèdent une représentation de leur environnement et des agents avec lesquels ils communiquent, à chacun son domaine de spécialité. Les agents sont généralement intentionnels c'est-à-dire qu'ils possèdent des buts et plans explicites leur permettant d'accomplir leurs buts [20].

Un système multi-agents constitué uniquement d'agents cognitifs, aura un nombre faible d'agents mais qui demandent des ressources assez importantes contrairement aux agents réactifs.

Ci-dessous un tableau comparatif entre un agent réactif et un agent cognitif :

Caractéristiques	Agent réactif	Agent cognitif
Capacité de raisonnement	Faible	Elevé
Représentation explicite de l'environnement	Non	Oui
Nombre d'agents	Grand	Petit
Structure	Stimulus-réponse	Complexe
Temps de réponse	Rapide	Lent

Tableau 2 : Différences entre un agent cognitif et un agent réactif

II.6.1.4. Architecture des agents (cognitif et réactif)

On va décrire la structure d'un agent, à savoir ; son organisation interne, ses données, ses connaissances, les différentes opérations réalisées et le flux de contrôle des opérations.

Nous verrons dans ce qui va suivre deux architectures, la première proposée par Rodney Brooks qui est l'**architecture de subsomption**, et la seconde l'**architecture BDI**.

- **Architecture d'un agent réactif**

L'architecture d'un agent réactif est représentée par l'architecture de subsomption, cette dernière est composée de plusieurs modules de compétence ; un module est responsable de la réalisation d'une tâche simple.

Comme nous le montre La Figure II.2 ci-dessous ; plusieurs modules peuvent entrer en action pour exécuter une tâche, pour choisir la tâche la plus importante. L'organisation des modules se fait en couches hiérarchique, chaque couche ayant une priorité différente.

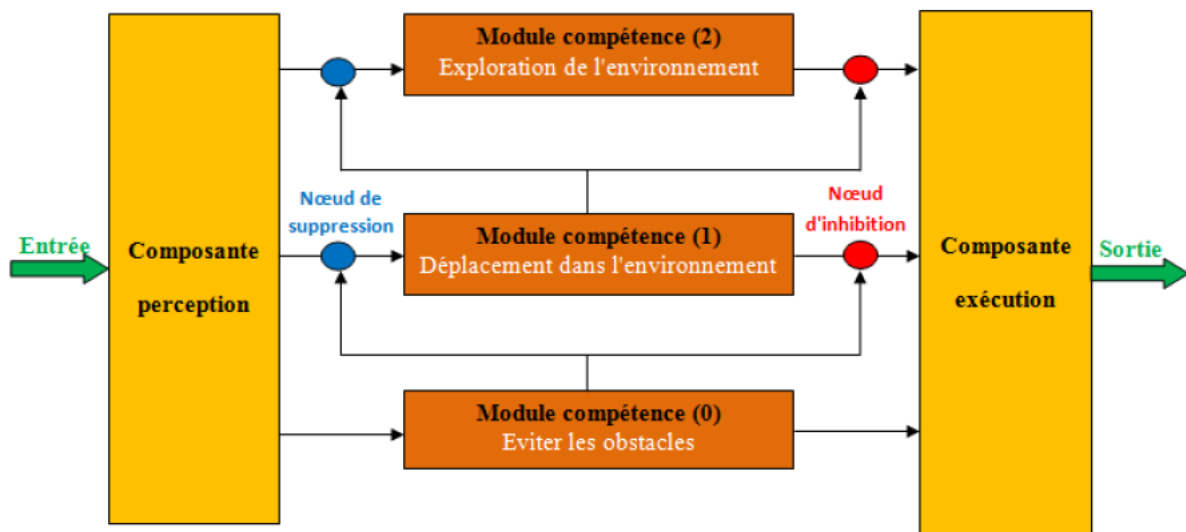


Figure II. 2 Architecture de subsomption

Les couches supérieures correspondent à des tâches plus abstraites qui sont détaillées à l'aide des tâches plus concrètes et plus simples, les couches supérieures ont une priorité plus petite que les couches inférieures. Les couches inférieures correspondent aux tâches simples et elles ont une priorité plus grande [19].

- **Architecture d'un agent cognitif**

L'architecture d'un agent cognitif est représentée par le modèle « Croyance-Désire-Intention », couramment appelée l'architecture BDI, où **B** signifie « **B**elief=Croyance » qui fait référence aux informations que détient l'agent de l'environnement et des agents avec qui il communique, **D** quant à lui il réfère au mot « **D**esir=Désire » qui désigne tout ce que l'agent aimerait réaliser sur l'environnement et sur lui-même, **I** signifie « **I**ntention=Intention » qui représente les désires que l'agent a décidé de réaliser (d'accomplir).

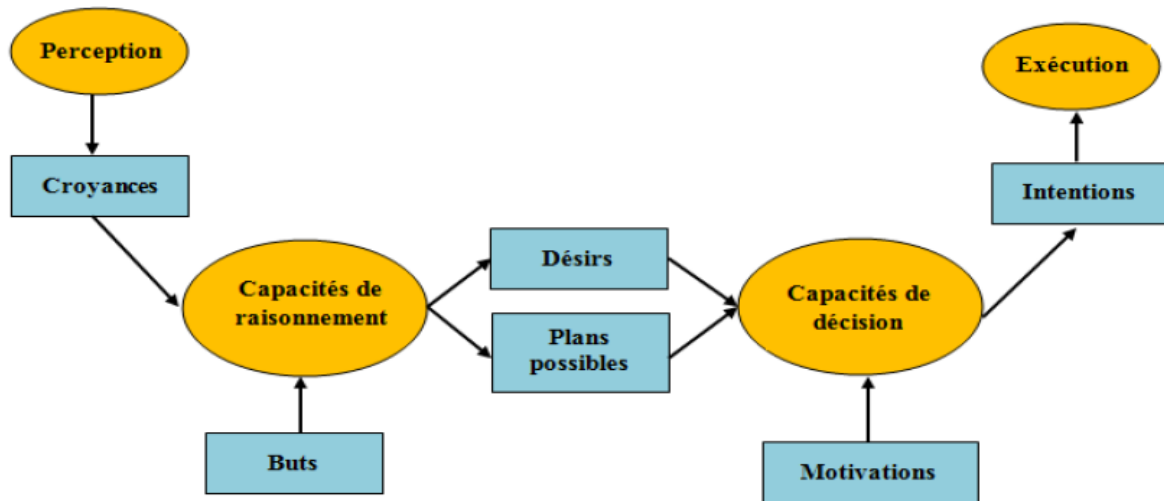


Figure II. 3 Architecture BDI

Comme le montre la Figure II.3 ci-dessus ; l'agent perçoit son environnement ce qui lui permet de définir ses croyances, grâce à sa capacité de raisonnement il définit ses désirs et les différents plans possibles en se basant sur ses buts et croyances, en se munissant de ses motivations et en utilisant sa capacité de décision, l'agent choisira le meilleur plan d'action, puis il exécutera ses intentions.

II.7. Techniques d'accès dynamique au spectre

L'allocation du spectre est un problème majeur dans les réseaux sans fils en général, cette tâche devient d'autant plus contraignante dans les réseaux cognitifs en raison des paramètres variables du spectre dans le temps. Pour résoudre ce problème, des techniques de négociation sont utilisées qui sont des protocoles dirigeant l'interaction entre différents agents. On recense divers protocoles de négociations, dans la partie qui suit nous citerons les plus importants.

II.7.1. Méthodes heuristiques

L'utilisation des négociations heuristiques a pour but de faciliter l'obtention d'un schéma d'allocation efficace qui est un problème difficile intrinsèquement du fait des contraintes d'allocations.

Les méthodes heuristiques sont basées sur des algorithmes génétiques AG qui imitent le processus de l'évolution naturelle. Ces derniers sont utilisés pour développer des modèles d'inspiration biologique pour un moteur cognitif.

Selon Rieser Christian James, les AG sont idéals pour la radio cognitive dont l'environnement est changeant et dynamique car ils sont puissants et flexibles.

Ces algorithmes sont itératifs et servent dans notre cas à l'affectation des SUs aux bandes de fréquences pour augmenter la capacité totale du réseau et présenter le taux d'interférence le plus bas aux PUs.

De nombreux exemples d'applications des méthodes heuristiques existent dans la littérature comme [21] et [22].

II.7.2. La théorie des jeux

Lors de l'emploi de la théorie des jeux pour l'accès dynamique au spectre, le comportement des SUs est comparé à celui des individus préoccupés par leur propre bénéfice. En effet, l'action d'un individu peut avoir un impact sur le reste des individus du système tout comme la décision d'un SU concernant le spectre affecte la performance des SUs voisins.

Il est d'ailleurs très facile de faire le lien entre la théorie des jeux et la radio cognitive par la simple observation des cycles de cognitions de cette dernière.

Pour rappel, la théorie des jeux est considérée comme un cadre mathématique qui se compose de modèles et de techniques utilisés pour analyser le comportement des individus susmentionnés. C'est une méthode reconnue pour être précise et efficace dans ce travail de modélisation comportementale.

Les auteurs de [23] ont expliqué la théorie des jeux de manière détaillée en établissant son lien avec la radio cognitive. Selon ces auteurs, l'élément fondamental de la théorie des jeux est la notion de jeu qui comprend trois composants principaux :

- Un ensemble fini d'acteurs, appelés décideurs, généralement noté : $N = \{0, 1, 2, \dots, N\}$;
- Un espace d'action, A , formé à partir du produit cartésien de l'ensemble d'action de chaque joueur : $A = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$;
- Un ensemble de fonctions utilitaires qui quantifient les préférences des joueurs sur les résultats possibles du jeu ;

Parallèlement, dans les cycles de la radio cognitive, chaque nœud du réseau qui met en œuvre l'étape de décision du cycle de cognition est un acteur (décideur) du jeu. Les différentes alternatives disponibles pour un nœud (analyser, établir les priorités, etc.) forment l'ensemble d'actions du nœud et l'espace d'action est formé à partir du produit cartésien des alternatives des radios.

Les étapes d'observation et d'orientation d'une radio cognitive se combinent pour former la fonction d'utilité d'un joueur.

Il y a cinq questions auxquelles la théorie des jeux devrait répondre lors de l'analyse d'un algorithme adaptatif : l'existence d'un état stable, identification de cet état stable, optimisation de l'état stable, la convergence et la stabilité.

L'emploi de la théorie des jeux dans le cadre des réseaux radio cognitifs à des objectifs variés, cela peut être de réduire la puissance de transmission des utilisateurs secondaires afin d'éviter de générer des interférences aux transmissions des utilisateurs primaires [24] [25].

Cette théorie peut également être utilisée dans le but de réduire les dépenses en déterminant le coût au préalable par l'utilisateur primaire, et ce, en se basant sur les caractéristiques physiques du canal ; l'utilisateur secondaire, quant à lui, décide de la quantité de spectre dont il doit disposer en observant les différents coûts [26].

La propriété la plus connue des approches de la théorie des jeux est appelée « Equilibre de Nash (EN) ». Dans l'EN, chaque joueur est supposé connaître les stratégies d'équilibre des autres joueurs, et aucun joueur n'a rien à gagner en changeant sa propre stratégie [28]. Ces joueurs peuvent être coopératifs ou compétitifs ;

- **Jeux coopératifs** : tous les joueurs sont préoccupés par tous les gains globaux et ils ne sont pas très inquiets de leur gain personnel
- **Jeux compétitifs** : chaque utilisateur est principalement préoccupé par son gain personnel et donc toutes ses décisions sont prises de manière compétitive et égoïste.

II.7.3. La théorie des graphes

La théorie des graphes est l'un des outils d'optimisations les plus sollicités dans la résolution des problèmes d'allocation de ressources dans les réseaux cognitifs. Ceux-ci sont modélisés sous forme de graphes où les sommets représentent les périphériques mobiles ou les nœuds cognitifs, les liens quant à eux correspondent aux connexions entre les nœuds cognitifs.

Elle permet donc de modéliser des problèmes mathématiques sous forme graphique pour ensuite les résoudre à l'aide de divers outils.

Plusieurs techniques peuvent être utilisées comme la technique du graphe non orienté, le problème de coloration des sommets ou encore le graphe de conflits [27].

II.7.3.1. Graphe non orienté

En théorie des graphes, un graphe non orienté $G = (V, E)$ est un couple formé de V un ensemble de sommets et E un ensemble d'arêtes, chaque arête étant une paire de sommets.

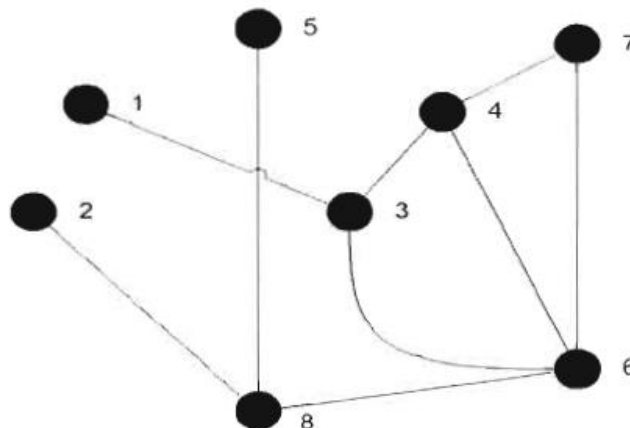


Figure II. 4 Exemple de graphe non orienté

Cette technique est utilisée pour schématiser la contrainte d'interférence sous forme de graphe appelé aussi graphe d'interférences dynamiques afin de calculer les interférences exercées entre une paire de liens.

Un ensemble de liens cognitifs sont pris en considération ainsi qu'un certain nombre de canaux avec lesquels un graphe non orienté est construit ; dans ces cas de figure, le nombre de sommets est égal au nombre de liens souhaitant transmettre sur le réseau.

Chaque sommet est connecté à un autre sommet si et seulement si les deux liens ne peuvent être en charge sur un même canal simultanément.

Dans la Figure II.4, un exemple de graphe non orienté est représenté d'ordre $|G|= 8$ et composé de neufs arrêtes $||G||= 9$.

II.7.3.2. Les graphes de conflits

- L'une des techniques les plus communes de la théorie des graphes pour schématiser les interférences entre les SUs voisins ; dans ce type de graphe, un sommet représente un élément impliqué, et une arête, une incompatibilité ou un conflit entre deux de ces éléments.

- Dans les schémas centralisés, les graphes de conflits sont aussi utilisés à l'aide du *Spectrum broker* qui construit le graphe en fonction des canaux alloués tandis que les SUs forment eux même le graphe dans les schémas distribués tout en négociant avec les nœuds voisins les interférences pouvant être utilisées afin d'éviter les interférences.

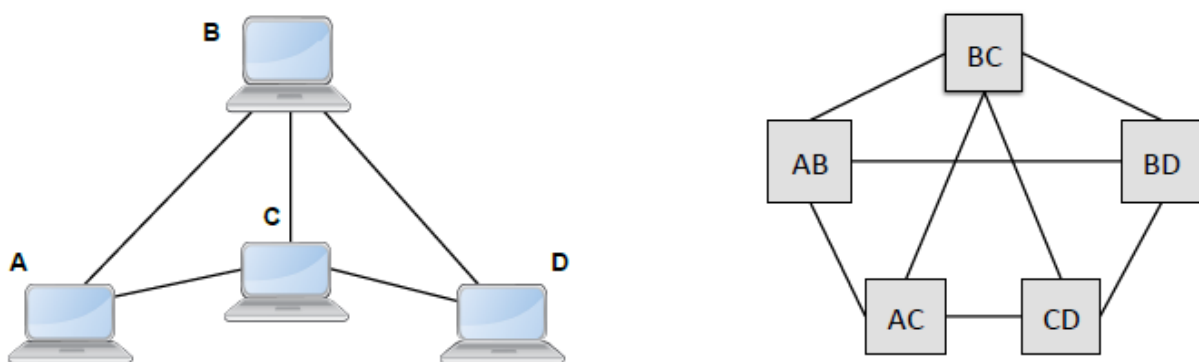


Figure II. 5 Exemple de construction de graphe de conflits

II.7.3.3. Problème de coloration des sommets

Le problème de coloration consiste à colorier le graphe G avec des couleurs disponibles dans C de telle sorte que deux sommets adjacents ne partagent pas la

même couleur. La coloration des sommets d'un graphe $G=(V,E)$ est une fonction injective $s : V \rightarrow C$ telle que $s(v) \neq s(u)$ pour tout v et u adjacents.

Les éléments de l'ensemble C représentent les couleurs disponibles.

Attribuer des fréquences revient à colorier chaque sommet en utilisant différentes couleurs d'une liste de couleurs bien spécifique correspondant aux fréquences du spectre disponibles dans le but de maximiser les performances du réseau.

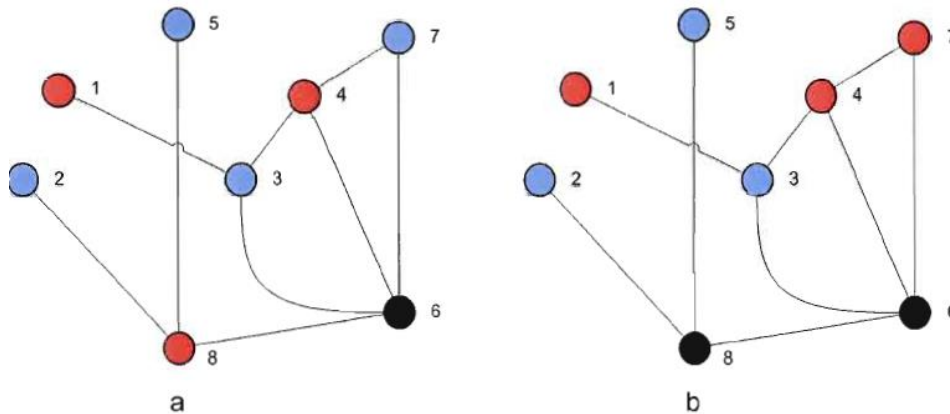


Figure II. 6 (a) Un coloriage de graphe valide et (b) un coloriage de graphe invalide

Dans la *Figure II.6* : (a) le coloriage de graphe est valide et dans (b) le coloriage de graphe est invalide car il ne respecte pas la condition :

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

II.7.4. La théorie des enchères

Cette branche de l'économie est basée sur un vendeur, plusieurs acheteurs potentiels et un protocole d'enchères.

Le vendeur représente le spectre, les acheteurs sont les SUs et les protocoles d'enchères sont nombreux comme l'enchère ascendante, l'enchère descendante, l'enchère à enveloppe scellée ou encore l'enchère de Vickery.

Le but principal de l'utilisation des enchères dans les réseaux cognitifs est de fournir une motivation aux utilisateurs secondaires pour maximiser leur utilisation du spectre.

Concrètement, un ensemble de nœuds concourent pour l'accès à une même bande spectrale, un régulateur effectue une enchère pour l'obtention des droits d'accès à cet ensemble de fréquences puis les SUs surenchérisent pour l'obtention des droits d'accès.

Le problème d'attribution du spectre est alors résolu par le régulateur qui décide soit de maximiser ses propres gains ou bien de satisfaire l'ensemble des utilisateurs.

II.7.4.1. Enchère ascendante (anglaise)

- Elle est certainement la plus populaire et la plus commune à tous. L'initiateur commence l'enchère, d'habitude par l'annonce d'un prix de réservation (le prix minimal pour lequel il est d'accord pour vendre l'objet). Chaque participant annonce publiquement son offre, en plusieurs tours successifs. Quand aucun participant ne veut plus augmenter son offre, l'enchère s'arrête et le participant ayant fait la plus grande offre gagne l'objet au prix de son offre.

- La stratégie dominante de l'agent acheteur est donc de proposer une somme la plus petite possible qui soit supérieur à celle enregistrée jusqu'à ce que la surenchère atteigne la valeur maximale qu'il peut offrir.

II.7.4.2. Enchère descendante (hollandaise)

- L'initiateur commence par proposer un prix et, par des tours successifs, diminue ce prix jusqu'au moment où un des participants achète l'objet au prix proposé.

II.7.4.3. Enchère à enveloppe scellée (au premier prix)

- L'initiateur commence l'enchère et chaque participant soumet une offre sous enveloppe ou électroniquement, dans un tour unique, sans savoir les offres des autres. Le participant qui a fait la plus grande offre gagne l'objet et paye le montant de son offre.

- C'est un processus « statique » puisqu'il ne comporte qu'un tour. De plus, une des caractéristiques de ce type d'enchère est que l'enchérisseur ne reçoit aucun signal (offre) de la part des autres enchérisseurs.

- Ici on ne peut donc parler de stratégie dominante, puisque l'acheteur n'a pas de vision des mises des autres agents.

II.7.4.4. Enchère de Vickery (enveloppe scellée au second prix)

- Ici, aucun agent n'a connaissance de la mise des autres agents. Lorsque l'agent remporte l'enchère (en ayant proposé la somme la plus élevée), il remporte le produit mais au prix de la seconde mise, c'est à dire celle se trouvant juste au-dessous de la mise gagnante.

- La stratégie dominante d'un participant dans ce cas est de soumettre une offre avec sa valeur privée de l'objet. À cause de cette stratégie, l'enchère Vickery est un protocole préféré pour les agents logiciels. Pourtant, elle est moins répandue dans les enchères entre humains à cause du fait que l'initiateur peut mentir sur le deuxième prix le plus élevé et faire payer le gagnant plus que ce prix.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu les différents critères et techniques pour réaliser une bonne allocation de ressources et une gestion efficace de partage de spectre entre les utilisateurs avec un taux d'interférences réduit.

La capacité de résonnement des radios cognitives est remarquable grâce aux systèmes multi agents qui rendent son intelligence plus flexible et lui permettent d'agir plus rapidement.

La théorie des graphes et la théorie des jeux sont les théories les plus utilisées dans les approches d'allocation des bandes spectrales dans les RRC, ce sont deux outils mathématiques qui servent à capturer certaines nuances d'une situation réelle et permettent grâce à des règles bien définies et structurées de résoudre des problèmes dans divers domaines.

Chapitre III

Simulations de détection de
spectre par détecteur d'énergie

III.1. Introduction

Les réseaux radio cognitifs s'imposent progressivement dans le monde de la téléphonie mobile. Ils apportent une solution optimale à un problème de taille qui est l'épuisement ou la rareté du spectre radio. Leur dynamisme ainsi que leurs capacités à s'adapter aux changements de leur environnement sont des atouts majeurs pour les nouvelles générations d'utilisateurs. On estime qu'à l'horizon 2023, le nombre d'appareils connectés aux réseaux IP sera plus de trois fois supérieure à la population mondiale, et que les connexions M2M (Machine-To-Machine) représenteront la moitié des appareils connectés (passant de 33% en 2018 à 50% en 2023, autour de 14,7 milliards de connexions) [30].

Les RRCs sont caractérisés par la détection de spectre, une fonctionnalité visant à déterminer les bandes de fréquences inoccupées (les trous de spectre, les espaces blancs) ce qui conduit à augmenter l'efficacité spectrale.

Cette fonctionnalité sera donc abordée et exploitée au cours de ce chapitre en premier lieu, à l'aide de l'outil de simulation mathématique Matlab, afin de prendre une décision concernant la présence d'un signal. En second lieu, nous allons aborder l'optimisation de la détection de spectre en utilisant des règles qui permettent la combinaison des décisions dites « hard » et nous verrons en quoi cela améliore les performances du détecteur d'énergie.

III.2. Formulation du problème de détection de spectre

La détection de spectre est le processus qui consiste à déterminer si une partie du spectre est occupée ou pas par un utilisateur primaire (PU). Ce processus doit permettre à des utilisateurs secondaires (SU) de détecter la présence ou l'absence du signal primaire dans une bande de fréquences W bien spécifiée sur un certain créneau horaire. Cela peut être facilement formulé comme un test d'hypothèse binaire comme suit :

$$r(t) = \begin{cases} n(t), & : H_0 \text{ (PU absent)} \\ h(t).s(t) + n(t), & : H_1 \text{ (PU présent)} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Où $r(t)$ est le signal reçu à SU, $s(t)$ est le signal transmis par PU vu par SU, $h(t)$ est un processus d'évanouissement (en absence d'évanouissement $h(t)=1$) et $n(t)$ représente le bruit.

Les décisions de détection sont réalisées avec un grand nombre d'échantillons du signal $r(t)$, qui servent à déterminer une statistique de décision $T(r)$. Le test d'hypothèses est réécrit alors comme suit :

$$\text{si } \begin{cases} T(r) < \lambda & : H_0 \text{ vraie} \\ T(r) > \lambda & : H_1 \text{ vraie} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Où λ ($0 < \lambda < \infty$) est un seuil de décision.

La règle de décision (III.2) sera caractérisée par les quantités suivantes :

- la probabilité de détection P_d qui décrit la probabilité de présence du signal primaire lorsqu'il est effectivement présent dans la bande de fréquences W .
- la probabilité de fausse alarme P_{fa} qui décrit la probabilité de décider à tort que la bande est occupée, alors que ce n'est pas le cas.

Une forte probabilité de détection est hautement souhaitable. Mathématiquement, c'est une probabilité conditionnelle donnée par :

$$P_d = \Pr (T(r) > \lambda | H_1) \quad (\text{III.3})$$

Notons que le complément de cette probabilité $P_{md} = 1 - P_d$ est également largement utilisé à des fins d'illustration et de conception. Il s'agit de la probabilité de détection manquée.

D'un autre côté, le test peut décider à tort que le signal est présent quand ce n'est pas le cas, et cette probabilité de fausse alarme peut s'écrire :

$$P_{fa} = \Pr (T(r) < \lambda | H_0) \quad (\text{III.4})$$

Les valeurs exactes de P_d et P_{fa} dépendent de la façon dont la statistique de test $T(r)$ est déterminée en fonction des échantillons reçus, de l'estimation de canal, des caractéristiques de propagation, de choix du seuil et d'autres informations. Les fausses alarmes réduiront clairement les opportunités d'accès au spectre pour les utilisateurs secondaires, et donc les améliorations attendues en efficacité spectrale ne seront pas matérialisées. Ce problème peut être atténué par un choix du seuil de décision pour un équilibre optimal entre P_d et P_{fa} . Cependant, cela nécessite une connaissance du bruit et de la puissance du signal détecté. L'estimation de la puissance de bruit et de la puissance du signal est difficile car elles dépendent des emplacements des nœuds primaires et secondaires et de l'évolution des normes de transmission. En pratique, avec la connaissance de la variance du bruit, le seuil est choisi pour obtenir un certain taux de fausses alarmes.

III.3. Utilisation de la méthode de détection d'énergie

La détection d'énergie (également appelée détection non cohérente) est le mécanisme de détection de signal utilisant un détecteur d'énergie (également appelé radiomètre) pour spécifier la présence ou l'absence du signal primaire dans la bande considérée. Il faut estimer l'énergie contenue dans cette bande pour la comparer au seuil de décision.

Malgré son efficacité et sa simplicité d'utilisation, cette méthode présente certains inconvénients. Par exemple, la performance du détecteur d'énergie est très sensible à

l'évolution des niveaux de bruit, et il ne peut pas distinguer lorsque l'énergie provient de la transmission des utilisateurs primaires, des interférences ou du bruit [8].

III.3.1. Détecteur d'énergie

Le processus de détection d'énergie est illustré sur la figure III.1 [29]. Il consiste en la mesure du niveau d'énergie contenue sur la bande d'intérêt et la comparaison de cette mesure avec un certain seuil de détection. A partir de cette comparaison, l'une des hypothèses énoncées en (III.1) est choisie vraie, et sur la base du résultat du test, l'utilisateur secondaire décide d'accéder ou non à la bande.

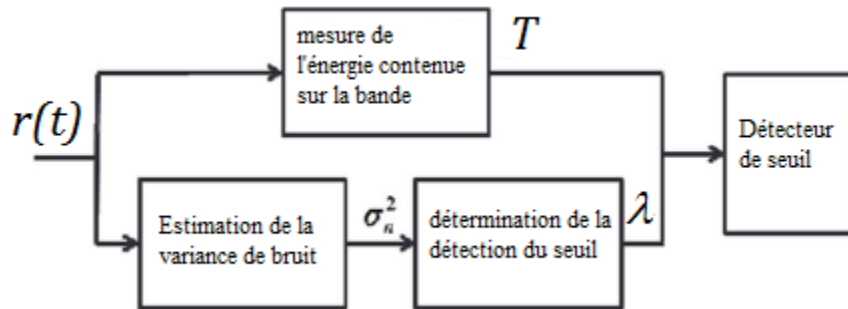


Figure III. 1 Principe du processus de détection d'énergie

Ainsi, le problème de détection peut être formulé comme un cas du test d'hypothèse (3.2) avec la statistique de décision donnée par :

$$T(r) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (r(i))^2 \quad (\text{III.5})$$

Où $r(i)$ est le $i^{\text{ème}}$ ($i = 1, 2, \dots, N$) échantillon de du signal $r(t)$ et N le nombre d'échantillons utilisés pour la détection.

On peut démontrer que les statistiques $T(r)$ conditionnées à H_0 et H_1 sont distribuées respectivement selon une loi khi-carré centrée χ_{2N}^2 et une loi chi-carré non-centrée $\chi_{2N}^2(2\gamma)$, toutes deux avec $2N$ degrés de liberté, γ étant le SNR (Signal to Noise Ratio) [30].

III.3.2. Application dans un canal Gaussien

Nous considérons dans un premier temps que le canal est un canal Gaussien AWGN. Pour un tel canal statique, les probabilités de fausse alarme et de détection sont données par [30]:

$$P_{fa} = \Gamma\left(N, \frac{\lambda}{2}\right) / \Gamma(N) \quad (\text{III.6.a})$$

$$P_d = Q_N(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}) \quad (\text{III.6.b})$$

Où $\Gamma(a, b)$ et $Q_N(a, b)$ sont respectivement la fonction Gamma incomplète et la fonction Q de Marcum :

$$\Gamma(a, b) = \int_b^{\infty} t^{a-1} \cdot e^{-t} \cdot dt \quad (\text{III.7.a})$$

$$Q_N(a, b) = \int_b^a x \left(\frac{x}{a}\right)^{N-1} \cdot \exp\left(-\frac{x^2+a^2}{2}\right) \cdot I_{N-1}(ax) \cdot dx \quad (\text{III.7.b})$$

Où I_{N-1} désigne la fonction Bessel modifiée d'ordre $(N-1)$.

Pour un nombre d'échantillons N , suffisamment élevé, les deux probabilités P_{fa} et P_d données par les équations (3.6.a) et (3.6.b), peuvent être approximées grâce au théorème de la limite centrale comme [30] :

$$P_{fa} \approx Q\left(\frac{\lambda-2N}{2\sqrt{N}}\right) \quad (\text{III.8.a})$$

$$P_d \approx Q\left(\frac{\lambda-2N(1+\gamma)}{2(1+\gamma)\sqrt{N}}\right) \quad (\text{III.8.b})$$

Où le signal primaire $s(t)$ est considéré complexe Gaussien centré et $Q(x)$ est la fonction Q . pour un scalaire x : $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$.

Pour rappel, le théorème de la limite centrale établit la convergence en loi de la somme de variables aléatoires identiques et indépendantes tend (le plus souvent) vers une variable aléatoire gaussienne.

Bien que la probabilité de détection (ou de détection manquée) et la probabilité de fausses alarmes soient des mesures essentielles, la capacité de détection est généralement illustrée par une courbe dite ROC - un graphique de la probabilité de détection par rapport à la probabilité de fausse alarme lorsque le seuil varie de 0 à 1. Ainsi, la courbe ROC est définie paramétriquement comme suit :

$$x = P_f(\lambda) \quad y = P_d(\lambda), 0 \leq \lambda < \infty \quad (\text{III.9})$$

Nos simulations ont donné les résultats suivants.

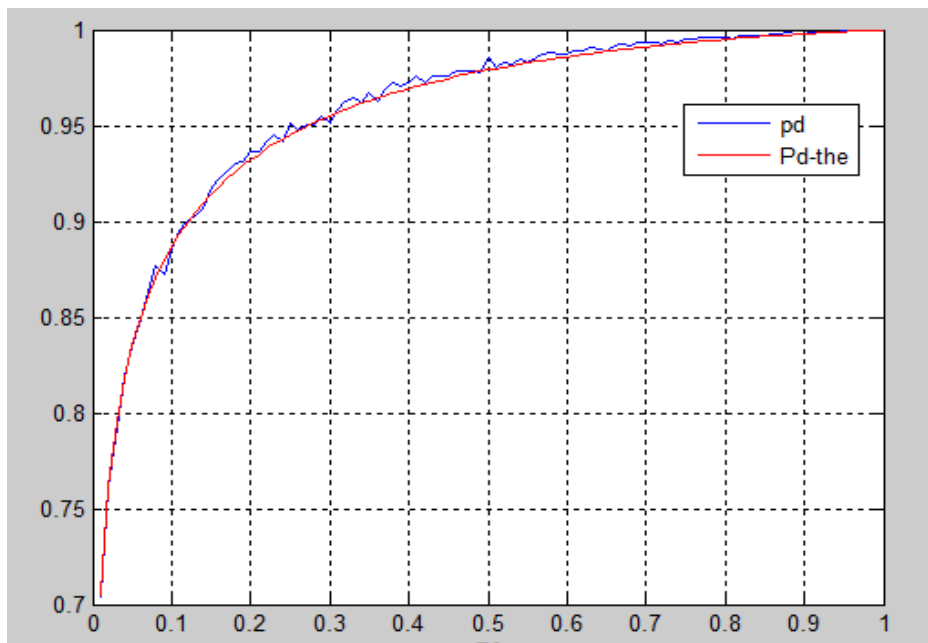


Figure III. 2 Courbe ROC de la probabilité de détection P_d et de la probabilité de détection théorique P_{d_the} en fonction de la probabilité de fausse alarme P_f (RSB=-10 dB)

Cette Figure III.2 montre deux courbes représentant les utilisateurs principaux dans des conditions théoriques et pratiques :

- La courbe de couleur rouge représente la probabilité de détection théorique, c.-à-d., avec des paramètres théoriques connus à l'avance ;
- La courbe de couleur bleue représente la probabilité de détection avec des valeurs proches de la réalité en utilisant la méthode de Monte Carlo qui permet de simuler des phénomènes variables et aléatoires ;

Le graphique de la courbe opérationnelle du récepteur (ROC) montre visuellement la dépendance entre ces deux paramètres. Notons que pour cette courbe, la valeur SNR est de -10 dB. On constate que les deux courbes se superposent en sachant que c'est dû au fait que l'énergie calculée est supérieure au seuil considéré.

Dans ce scénario, nous avons transmis deux signaux avec des valeurs théoriques et pratiques afin de comparer la similitude entre les deux signaux. Les valeurs théoriques sont connues par avance et les valeurs pratiques sont calculées à l'aide de la méthode de Monte Carlo. Les résultats montrent deux courbes se superposant et presque identiques ce qui prouve l'efficacité du détecteur.

III.3.3. Effet du SNR sur la détection

Dans ce qui suit, nous varions le rapport signal sur bruit pour évaluer l'influence du bruit sur l'efficacité de notre détecteur. Les résultats de nos simulations sont montrés ci-après

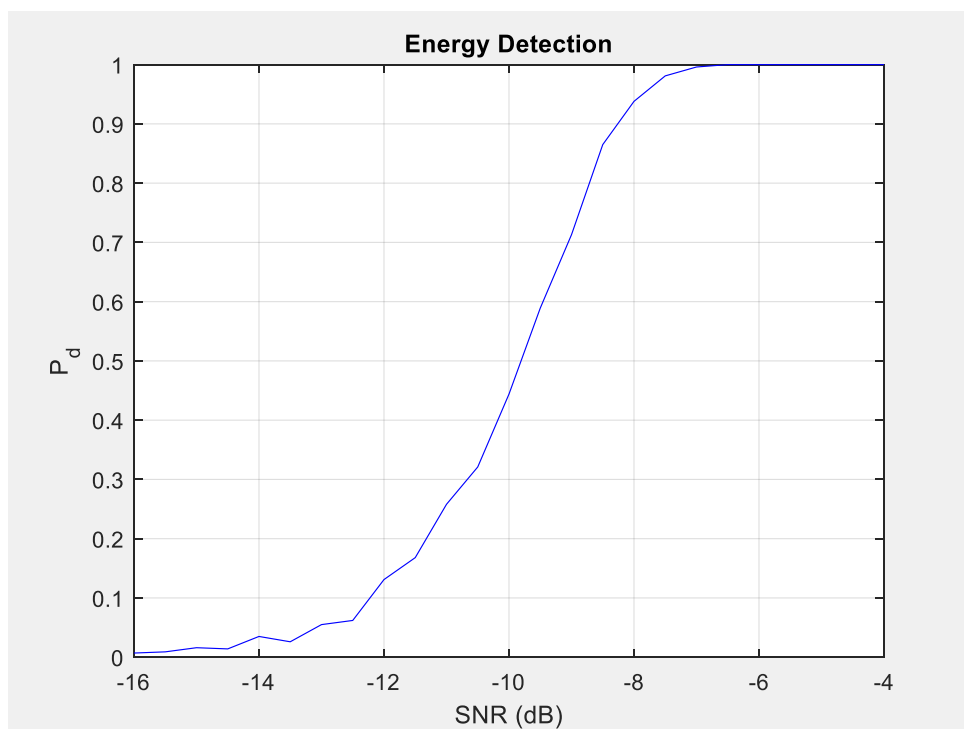


Figure III. 3 Influence du rapport SNR sur la détection.

Nous constatons logiquement que dès que le signal primaire est noyé dans un bruit important, la capacité de notre détecteur s'en trouve très réduite. Il importe alors que le niveau de bruit soit contrôlé sinon les utilisateurs secondaires interféreront lourdement sur les communications des utilisateurs primaires.

III.3.4. Détermination du seuil de décision optimal

A présent, nous allons tenter de chercher la valeur optimale du seuil de décision de notre détecteur. Ce seuil doit être optimisé pour chaque technique de détection afin d'améliorer ses performances. Le seuil peut être choisi en considérant P_d et P_{fa} . Une pratique courante consiste à définir un seuil basé sur une probabilité de fausse alarme constante. On utilise un seuil normalisé défini comme suit [30] :

$$\lambda^* \approx 2\sqrt{N}(Q^{-1}(P_{fa}) + \sqrt{N}) \quad (\text{III.10})$$

Et qui doit être ajusté en fonction de la variance du bruit additif. Il faut rappeler que P_d et P_{fa} sont des fonctions du seuil. En général, on choisit de rendre au mieux P_d grand et P_{fa} petit (par exemple, les réseaux WRAN (norme IEEE 802.22) nécessitent $P_{fa} = 0,1$ et $P_d = 0,9$).

En considérant ce cas, les résultats de nos simulations sont les suivants.

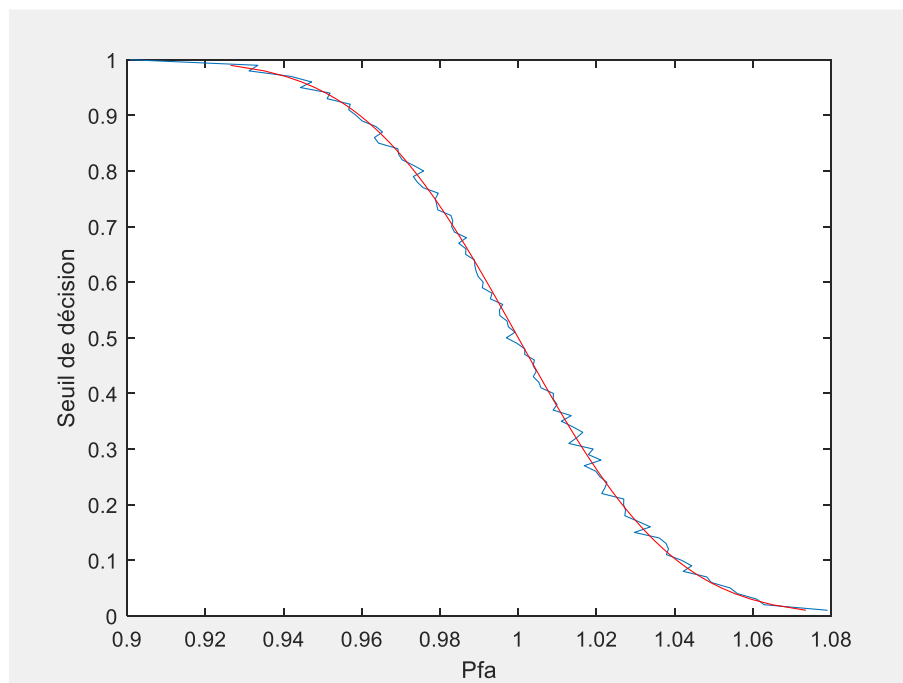


Figure III. 4 Evolution du seuil de décision en fonction de la probabilité de fausse alarme.

III.3.5. Application dans un canal de Rayleigh

Les dégradations dues aux canaux sans fil incluent les évanouissements à petite échelle, les ombres et les pertes de trajet. La modélisation de ces dégradations

est essentielle pour caractériser et analyser les méthodes de détection de spectre. La décoloration à petite échelle est caractérisée par divers modèles tels que celui de Rayleigh, de Nakagami-m et ou de Rice[30].

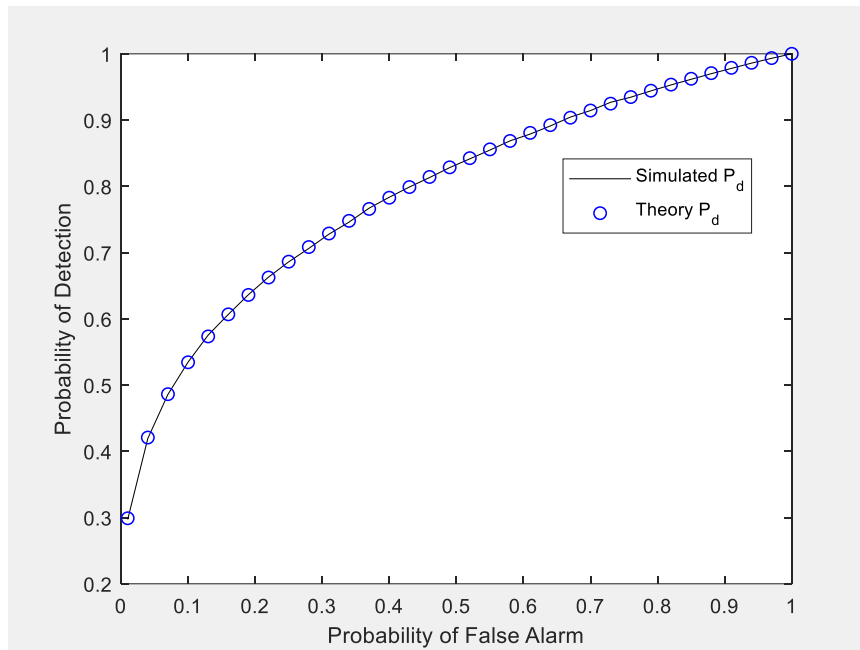


Figure III. 5 Courbe ROC des probabilités de détection (simulée, théorique) en fonction de la probabilité de fausse alarme dans un canal Rayleigh (RSB=0 dB)

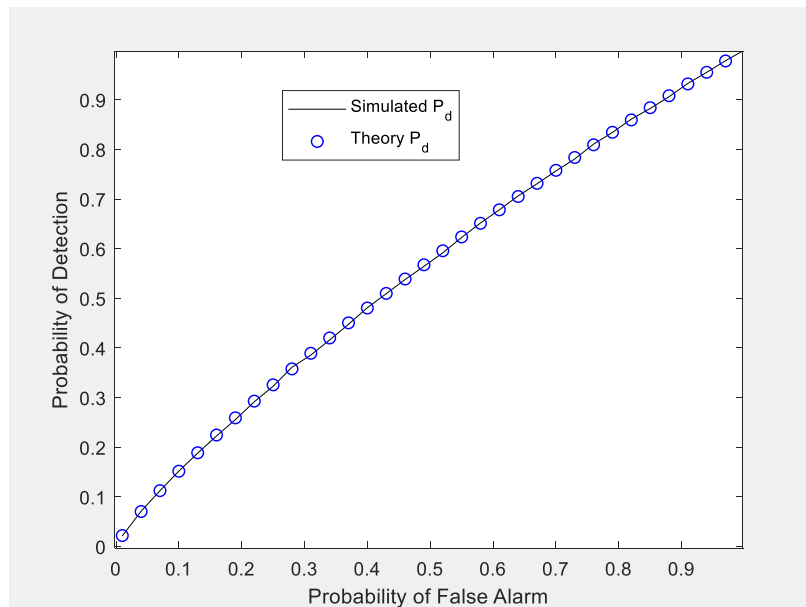


Figure III. 6 Courbe ROC des probabilités de détection (simulée, théorique) en fonction de la probabilité de fausse alarme dans un canal Rayleigh (RSB=-10 dB)

D'après nos résultats, le détecteur d'énergie devient presque aléatoire dans un canal de Rayleigh en présence de bruit. Cela démontre les faiblesses de cette technique pour la détection de spectre pour des utilisateurs des réseaux mobiles où les phénomènes de multi trajets sont prépondérants.

III.4. Détection coopérative de spectre

Dans cette deuxième partie du chapitre, nous utilisons une méthode de détection coopérative. Dans le scénario d'une telle Il y a M Su qui détectent un PU. Chacun des SUs fabrique ses propres décisions concernant la présence ou l'absence d'un PU et transmet la décision binaire « 1 » ou « 0 » au centre de fusion pour un traitement ultérieur. On considère que le bruit, les statistiques d'évanouissement et la moyenne SNR sont les mêmes pour chaque SU. On considère ainsi que le canal est idéal et gaussien (pas de perte d'informations). Une décision finale sur la présence du PU est prise par le centre de fusion FC et peut être décrite par la distribution binomiale de Bernoulli.

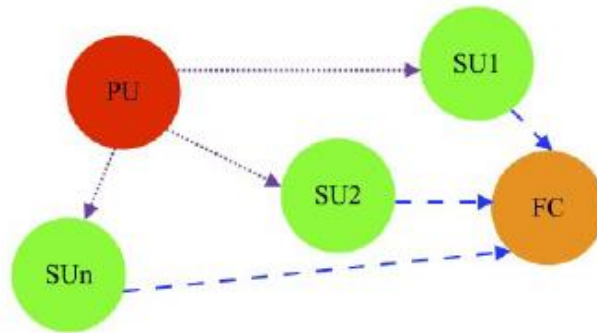


Figure III. 7 Le schéma de principe des détecteurs de détection de spectre coopératifs

Pour rappel, une loi binomiale, de paramètres n et p , est la loi de probabilité d'une variable aléatoire X égale au nombre de succès rencontrés au cours d'une répétition de n épreuves de Bernoulli, p étant la probabilité de succès dans chacune d'entre elles. Cette variable est caractérisée par sa fonction de masse donnée par la probabilité d'avoir k succès dans une répétition de n expériences :

$$P(X = k) = \binom{n}{k} \cdot p^k \cdot (1 - p)^{n-k} \quad \text{pour } k = 0, 1, \dots, n. \quad (\text{III.11})$$

Cette formule fait intervenir le coefficient binomial $\binom{n}{k}$ duquel provient le nom de la loi et donné à l'aide de la fonction factorielle :

$$\binom{n}{k} = C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}. \quad (\text{III.12})$$

Dans notre cas, la probabilité de fausse alarme et la probabilité de détection s'expriment alors comme suit :

$$P_{fa} = \sum_{l=k}^M \binom{M}{l} \cdot P_{fa,i}^l \cdot (1 - P_{fa,i})^{M-l} \quad (\text{III.13a})$$

$$P_d = \sum_{l=k}^M \binom{M}{l} \cdot P_{d,i}^l \cdot (1 - P_{d,i})^{M-l} \quad (\text{III.13b})$$

Où le l est nombre de succès et M le nombre d'expériences.

Nous allons analyser l'impact des règles de fusion qui permettent de combiner des décisions dites « hard » sur les performances du détecteur d'énergie. En effet, lorsque plusieurs Sus tentent de détecter la présence d'un PU, chacun des SUs émet sa propre

décision concernant ce dernier et l'envoi au centre de fusion qui va trancher, c'est ce qu'on appelle une détection dans un milieu coopératif.

La détection de spectre coopérative résout les problèmes que peuvent rencontrer les réseaux radios cognitifs comme les terminaux cachés qui se produit lorsque la radio cognitive est ombragée.

Plusieurs travaux récents ont montré que la détection coopérative du spectre peut augmenter considérablement la probabilité de détection dans les canaux d'évanouissement.

En général, la détection de spectre coopérative est effectuée comme suit :

- Étape 1 : chaque radio cognitive i exécute des mesures de spectre local indépendamment puis prend une décision binaire $D_i \in \{0, 1\}$ pour tout $i = 1, \dots, K$;
- Étape 2 : Toutes les radios cognitives transfèrent leurs décisions binaires à un récepteur commun qui est un AP dans un LAN sans fil ou BS dans un réseau cellulaire;
- Étape 3 : Le récepteur commun combine ces décisions binaires et prend une décision finale H_0 ou H_1 pour déduire l'absence ou présence d'un PU dans la bande de fréquence observée.

Dans l'algorithme de détection de spectre coopératif ci-dessus, chaque le partenaire coopératif prend une décision binaire en fonction de son observation, puis transmet une partie de la décision au récepteur commun. Au niveau du récepteur commun, toutes les décisions 1 bit sont fusionnées selon la règle logique suivante :

$$Z = \sum_{i=1}^K D_i \begin{cases} \geq n, H_1 \\ < n, H_0 \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Où H_0 et H_1 représentent les interférences tirées par le BS signifiant que le Pu est transmis ou non.

La probabilité de fausse alarme est donnée par :

$$\begin{aligned} Q_f &= \text{Prob}\{H_1|H_0\} \\ &= 1 - \sum_{l=n}^K \binom{K}{l} [\text{Prob}\{H_1|H_0\}]^l [\text{Prob}\{H_0|H_0\}]^{K-l} \\ &= 1 - \sum_{l=n}^K \binom{K}{l} P_f^l (1 - P_f)^{K-l}. \end{aligned} \quad (\text{III.15a})$$

La probabilité de détection manquée est donnée par :

$$\begin{aligned}
 Q_m &= Prob\{H_0|H_1\} = 1 - Prob\{H_0|H_1\} \\
 &= 1 - \sum_{l=n}^K \binom{K}{l} [Prob\{H_1|H_1\}]^l [Prob\{H_0|H_1\}]^{K-l} \\
 &= 1 - \sum_{l=n}^K \binom{K}{l} P_d^l (1 - P_d)^{K-l}.
 \end{aligned} \tag{III.15b}$$

III.4.1. Règles de combinaisons « hard »

La règle ET

La règle ET décide que le signal est détecté si tous les capteurs ont détecté un signal. Autrement dit, le test de coopération, selon la règle ET décide (H_1) si :

$$\sum_{l=0}^{K-1} \Lambda^{(l)} = K. \tag{III.16a}$$

La règle OU

La règle OU décide la présence du signal si l'un des capteurs détecte un signal. Ainsi, le test de coopération pour la règle OU décide (H_1) si :

$$\sum_{l=0}^{K-1} \Lambda^{(l)} \geq 1. \tag{III.16b}$$

La règle VOTE

La règle de VOTE décide qu'un signal est présent si au moins V des K capteurs ont détecté la présence d'un signal, avec $1 \leq V \leq K$. Le test décide donc (H_1) si :

$$\sum_{l=0}^{K-1} \Lambda^{(l)} \leq V. \tag{III.16c}$$

Prendre une décision basée sur la majorité est un cas particulier de la règle de vote, pour $V = K/2$. Le ET logique et le OU logique sont clairement des cas particuliers de la règle de vote pour $V = K$ et $V=1$ respectivement.

III.4.2. Résultats de la simulation et commentaires

Dans notre simulation, on a pris dans ce cas 10 utilisateurs $n=10$ tentant de détecter la présence d'un utilisateur principal puis émettant chacun leur propre décision quant à la présence de ce dernier. Puis, on a utilisé à tour de rôle les trois règles de fusions : ET, OU et VOTE. Dans le cas de la règle ET, tous les utilisateurs doivent détecter la présence du PU afin que le centre de fusion valide la présence du Pu.

Dans le cas de la règle OU, si un seul ou plusieurs utilisateurs détectent la présence du PU, alors ce dernier sera considéré comme présent.

Puis, enfin, dans le cas de la règle VOTE, un chiffre V est donné puis est utilisé de telle sorte que si V utilisateurs détectent la présence du PU, il sera considéré comme étant présent [17].

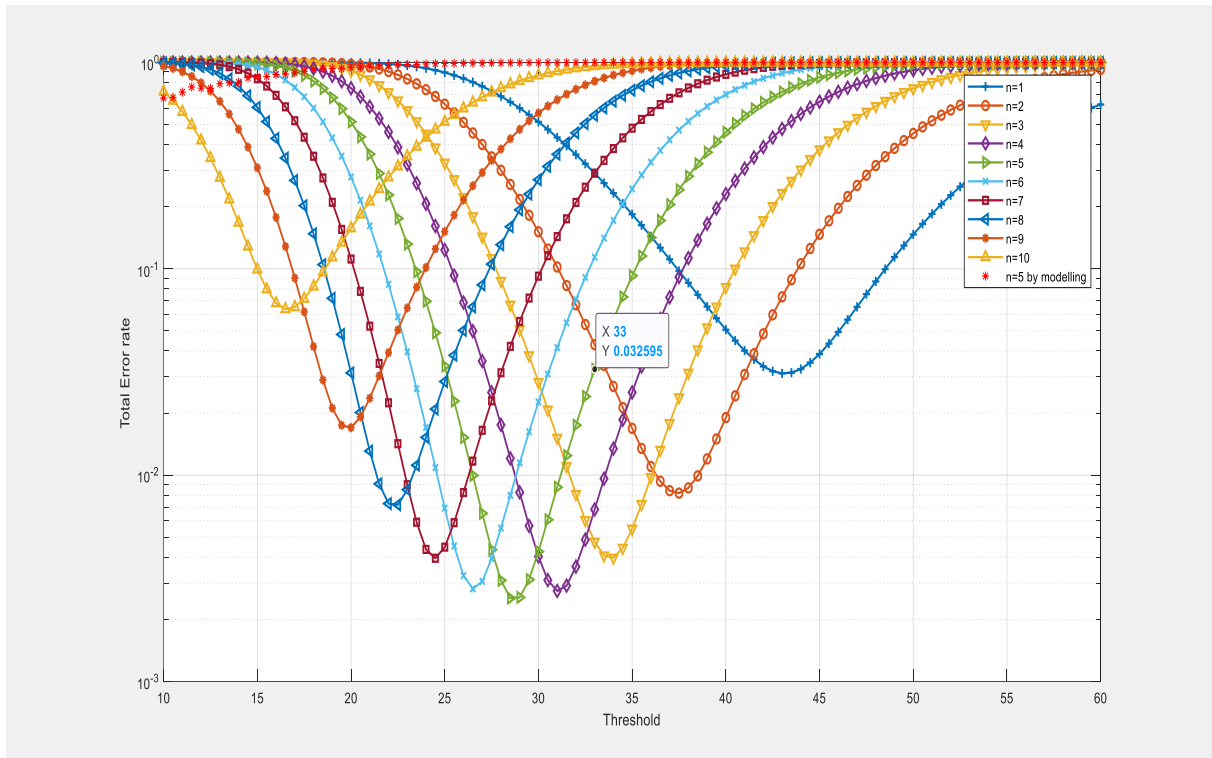


Figure III. 8 La densité de probabilité totale en fonction du seuil avec une règle de fusion variée quand $n = 1, 2, \dots, 10$, $K = 10$, et SNR

La règle VOTE entraîne une performance de détection légèrement plus élevée que les règles AND et OR ;

La règle VOTE correspond au cas où $n=5$;

Lorsque le seuil est peu élevé, la règle optimale est la règle ET, c'est-à-dire $n = 10$ car c'est là que la courbe est la plus élevée.

Parallèlement, quand le seuil est à son summum, la règle OU, c'est-à-dire $n = 1$, a tendance à être optimale.

Un simulateur basé sur Matlab de détection de spectre coopérative dans des conditions de canal parfait, c'est-à-dire non proche de la réalité, a été créé et présenté, avec n utilisateurs secondaire qui tentent de détecter la présence d'un utilisateur primaire. Les résultats de cette étude montrent que la règle VOTE entraîne une meilleure performance de détection en comparaison avec les autres règles.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu la détection d'énergie qui est l'une des méthodes les plus simples pour détecter la présence d'un signal dans les réseaux radio cognitifs.

Grâce à l'outil de simulation Matlab, on a pu effectuer deux simulations successives. La première simulation consistait à transmettre deux signaux et analyser leur courbe en s'aidant de paramètres comme la courbe ROC qui nous informe rapidement de l'efficacité d'un détecteur et cette courbe se lit en fonction des probabilités de détection et de fausse alarme.

Le constat était que les courbes se superposent, ce qui prouve que le détecteur a effectivement détecté le bon signal et qu'il est donc efficace.

Dans la deuxième simulation, l'enjeu était de pouvoir optimiser la détection de spectre à l'aide des règles de combinaison dites « hard ». Les résultats indiquaient que les règles améliorent la prise de décision concernant la présence du PU de manière générale, avec des performances légèrement plus élevées lors de l'emploi de la règle VOTE.

Conclusion et Perspective

Les services des réseaux sans fils connaissent une saturation progressive au fur et à mesure que les abonnés augmentent et surexploitent la même bande utilisable de tout le spectre électromagnétique.

Les réseaux radio cognitifs sont idéals pour résoudre ce genre de problème car ils permettent l'exploitation d'une portion de spectre par un utilisateur primaire et un utilisateur secondaire.

De plus, ils présentent plusieurs atouts tels que leur mobilité et leur capacité à modifier au cours d'une communication leurs caractéristiques comme la fréquence, les puissances du signal, ce qui contribue à améliorer les performances globales du système en assurant en permanence des performances optimales en fonction de l'entourage et de la position.

En outre, les réseaux radio cognitifs sont caractérisés par leur intelligence ; en effet, ils sont aptes à observer leur environnement, détecter la présence d'un spectre puis prendre une décision en conséquence ; ils possèdent également un cycle de cognition se déroulant sur plusieurs étapes qui sont l'observation, l'orientation, la planification, la décision, l'action et l'apprentissage. Ces étapes renforcent le travail de détection de spectre et en font une radio performante et intelligente.

Dans notre étude, nous avons vu que la détection de spectre se fait de plusieurs manières, selon que l'environnement soit coopératif ou non, et avons focalisé notre travail sur la technique de la détection d'énergie, qui constitue le thème du chapitre consacré à la simulation.

Ce mémoire se voulait introductif à la radio cognitive dans un premier lieu ; on y a présenté les fonctions, les cycles et l'architecture de la radio cognitive, mais aussi les techniques permettant l'accès dynamique au spectre. Ces dernières permettent de résoudre les problèmes usuels en allocation des réseaux radio cognitifs. En effet, on a vu que les méthodes heuristiques permettent de faciliter l'obtention d'un schéma d'allocation efficace, mais aussi que la théorie des jeux peut être employée afin d'économiser des dépenses inutiles lors du déploiement d'un réseau radio cognitif, ou encore que la théorie des graphes, qui est l'une des méthodes les plus courantes en allocation de ressources, permet de modéliser des problèmes réels sous forme de graphe.

Ce travail a permis donc, en second lieu, de proposer des solutions théoriques aux problèmes d'allocations en utilisant des théorèmes mathématiques.

En dernier lieu, il permet de vérifier l'efficacité d'un détecteur d'énergie et présente une méthode d'optimisation d'un détecteur qu'est l'utilisation des règles de décision. Pour cela, nous avons utilisé un scénario dans lequel un ou plusieurs utilisateurs secondaires tentent de détecter la présence d'un utilisateur principal. Une première simulation a permis de comparer deux signaux transmis, le premier avec des paramètres théoriques, le second avec des paramètres simulant la réalité, calculés à l'aide de la méthode de Monte-Carlo. Ces signaux étaient représentés sur des courbes ROC, qui a permis d'évaluer les performances d'un détecteur. Une deuxième simulation, dans laquelle plusieurs décisions émises par des utilisateurs secondaires et envoyées au centre de fusion, sont combinées afin de prendre une décision optimale concernant la présence d'un utilisateur principal.

Ce mémoire a abordé une des solutions possibles à un problème majeur dans les réseaux traditionnels, et permet d'entrevoir plusieurs perspectives comme d'optimiser l'efficacité d'un détecteur en réduisant la probabilité de fausse alarme. D'autres perspectives peuvent être exploitées en utilisant les autres techniques de détection telles que la détection par filtre adapté ou encore la détection des caractéristiques cyclostationnaire.

Bibliographies

- [1] S. Haykin, Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications. IEEE Journal on selected areas in communications, VOL. 23, No. 2, février 2005.
- [2] S. Kokare and R.D.Kamble, Spectrum Sensing Techniques in Cognitive Radio Cycle, international Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) - Volume 9 Number 1 - Mar 2014.
- [3] K. Sithamparanathan, G.Baldini and Radoslaw Piesiewicz « UWB Cognitive Radios ».
- [4] J. D. Parsons. The Mobile Radio Propagation Channel, chapter 6. Pentech Press London, 1992.
- [5] V.Gabale, B.Raman, P. Dutta, and S. Kalyanraman. A classification framework for scheduling algorithms in wireless mesh networks. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 15(1): 199-222, 2013.
- [6] W. Yue. Analogical methods to calculate the performance of a cellular mobile radio communication with hybrid channel assignment. IEEE Trans. Veh. Technol, 40(2), 1991
- [7] D. Cox and D.Reudnik. Dynamic channel assignment in high-capacity mobile communications systems. Bell system technical J, 50(6), 1971.
- [8] N. Benghabrit, thèse: Allocation des ressources dans les réseaux radio cognitifs, Université d'Oran Ahmed Ben Bella, 2019.
- [9] N. Nie, C. Comaniciu, and P. Agrawal. A game theoretic approach to interference management in cognitive networks. Wireless Communications, 07030 : 199-219, 2007
- [10] N. Nie and C. Comaniciu. Adaptive channel allocation spectrum etiquette for cognitive radio networks. Mobile Networks and Applications, 11 : 779-797, 2006.
- [11] G. Alnwaimi, K. Arshad, and K. Moessner. Dynamic spectrum allocation algorithm with interference management in co-existing networks. IEEE Commun. Lett, 15(9):932-934, September 2011.
- [12] D. Lee, W. Jeon, and D. Jeong. Joint channel assignment and routing in cognitive radio-based wireless mesh networks. In in Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring). IEEE 71st, pages 1-5, 2010.
- [13] Federal Communications Commission. Report of the interference protection working group. Technical report, Spectrum Policy Task Force, 2002.
- [14] X. Li, T. Drive, and S. A. R. Zekavat. Distributed channel assignment in cognitive radio networks. In International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing: Connecting the World Wireless, page 989-993, 2009.
- [15] X. Mao, G. Yu, and P. Qiu. On achievable rates and spectrum allocation in cognitive wireless networks. In Communications, Circuits and Systems, ICCCAS 2008. International Conference, 2010.
- [16] D. Chen, Q. Zhang, and W. Jia. Aggregation aware spectrum assignment in cognitive and ad-hoc networks. In Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2008.

Bibliographies

- [17] N. Benghabrit, thèse: Allocation des ressources dans les réseaux radio cognitifs, Université d'Oran Ahmed Ben Bella, 2019.
- [18] A. Hoang, Y. Liang, and M. Islam. Power control and channel allocation in cognitive radio networks with primary users cooperation. *IEEE Trans. Mobile Computing*, 9(3) pages 348-360, 2010.
- [19] Asma Amraoui, thèse : vers une architecture multi-agent pour la radio cognitive opportuniste. Université Abou Bakr Belkaid6Telemcen, 2015.
- [20] Ferber, Jacques, and Jean-François Perrot. *Les systèmes multi-agents: vers une intelligence collective*. InterEditions, 1995.
- [21] Wooldridge, Michael, and Nicholas R. Jennings. *Intelligent agents: Theory and practice*. The knowledge engineering review. Pages 115-152, 10.02 (1995).
- [22] M.Bkassing and S.K.Jayaweera. Optimal channel and power allocation for secondary users in cooperative cognitive radio networks. In 2nd international conference on Mobile Lightweight Wireless Systems (MOBILOGHT), 2010.
- [23] H. Salameh, M. Krunz, and O. Younis. Distance and traffic aware channel assignment in cognitive radio networks. In *Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, SECON'08 5th Annual IEEE Communications Society Conference*, page 10-18, 2008.
- [24] C. Yang, J. Liand and Z. Tian. Optimal power control for cognitive radio networks under coupled interference constraints : A cooperative game-theoretic perspective. *IEEE Transactions on Vehicular Tachnology*, 59 pages 1696-1706, 2010.
- [25] D. Niyato and E. Hossain. Competitive pricing for spectrum sharing in cognitive radio networks: dynamic game, inefficiency of nash equilibrium and collusion ;*IEEE Transactions on Selected Areas in Communications*, 308:192-_202, 2008;
- [26] Li Yun, X.Wang, and M. Guizani. Resource pricing with primary service guarantees in cognitive radio networks : A stachelberg game approach. In *Proceedings of IEEE Globecom*, pages 1-5, 2009.
- [27] Ahmed Ben Dhaou, Mémoire : Allocation dynamiques des bandes spectrales dans les réseaux sans-fil à radio cognitive, Université du Québec à Montréal, Septembre 2011.
- [28] P. Y. Bocquet. Fréquence radio : le spectre ne répond plus. *SCIENCE&VIE*, 25.07.2012 mis à jour 30.04.2019.
- [29] Cisco visual networking index, Global mobile data traffic forecast update, 2018-2023, 2017, URL:<http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.pdf>.
- [30] Atapattu S, Tellambura C, Jiang H, "Energy detection for spectrum sensing in cognitive Radio », Springer, New York, 2014.