



Apport des réseaux intelligents aux usages et pratiques en e-santé : Une architecture flexible basée sur la technologie radio cognitive pour un suivi efficace et temps réel des patients

Dramane Ouattara

► To cite this version:

Dramane Ouattara. Apport des réseaux intelligents aux usages et pratiques en e-santé : Une architecture flexible basée sur la technologie radio cognitive pour un suivi efficace et temps réel des patients. Informatique. Université de Bordeaux, 2014. Français. <NNT : 2014BORD0407>. <tel-01148270>

HAL Id: tel-01148270

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01148270>

Submitted on 4 May 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Présentée devant

L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX
École Doctorale de Mathématiques et Informatique

pour obtenir le grade de :

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX
Mention INFORMATIQUE

par

Dramane OUATTARA

Laboratoire d'accueil : LABRI
Équipe de recherche : PROGRESS

Titre de la thèse :

Apport des réseaux intelligents aux usages et pratiques en e-santé :
*Une architecture flexible basée sur la technologie radio cognitive
pour un suivi efficace et temps réel des patients*

Directrice de thèse: **Pr. Francine KRIEF**
Co-encadrant de thèse: **M. Mohamed Aymen CHALOUF**

Soutenue le 28 novembre 2014 devant la commission d'examen:

M. : Guy	PUJOLLE	Professeur, Université Paris 6, France	Président
MM. : Pascal	LORENZ	Professeur, Université de Haute-Alsace, France	Rapporteurs
Mammeri	ZOUBIR	Professeur, Université Toulouse III, France	
MM. : Daniel	NÉGRU	MCF-HDR, Université de Bordeaux, France	Examineurs
Francine	KRIEF	Professeur, Université de Bordeaux, France	
Mohamed A.	CHALOUF	MCF, Université de Rennes 1, France	
Omessaad	HAMDI	Maître-assistant, SupCom, Tunisie	
M. : Philippe	LAGOUARDE	Directeur Prog., Maincare Solutions, France	Invité

*"La vie m'a réservé les escaliers dès le bas âge.
Chaque pas, chaque étape de l'ascension a été une épreuve difficile, pleine d'incertitudes ;
Des challenges à relever, des craintes à surmonter, des doutes à dissiper, etc.
Alors j'ai fini par comprendre que c'était cela ma vie, je ne pouvais donc y échapper.
Aujourd'hui, j'ai franchi un palier important et c'est loin d'être terminé ;
Mais désormais, je retiens que dans cette vie, toute difficulté reste surmontable."
Dramane OUATTARA*

Remerciements

Ces années d'étude et de recherche n'auraient pas été possibles sans le soutien, l'encadrement et les encouragements d'un certain nombre de personnes. Parmi elles, je tiens particulièrement à adresser mes premiers et plus chaleureux remerciements à ma directrice de thèse, Francine Krief. Elle n'a pas simplement accepté de diriger cette thèse ; Elle a surtout dépensé une grande énergie pour faire accepter ma candidature en thèse auprès de l'Université ; Elle n'a eu de cesse de m'encourager et de me soutenir à tous les niveaux durant ces années. J'ai pu apprécier non seulement sa dimension scientifique, mais aussi sa non moins importante dimension humaine. Elle a été d'un soutien inestimable dans l'aboutissement de ce travail. J'en profite pour lui exprimer ici ma plus profonde reconnaissance.

Je remercie très sincèrement Mohamed Aymen Chalouf, co-encadrant de ma thèse, dont la disponibilité, les idées contributives m'ont été d'un apport précieux. J'ai été profondément marqué par son humilité et sa patience à prodiguer des conseils pertinents.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à l'ensemble des membres de mon jury : Madame Omessaad Hamdi et Messieurs Guy Pujolle, Zoubir Mammeri, Pascal Lorenz et Daniel Négro. Merci également à Monsieur Philippe Lagouarde, pour l'intérêt accordé à mon travail de thèse et pour avoir accepté d'être invité.

Durant ces trois années de thèse, j'ai eu la chance de côtoyer à Bordeaux de nombreuses personnes attachantes. Que toutes soient remerciées pour les bons moments partagés. Je pense notamment (je demande pardon à ceux que je ne citerai pas) d'abord à mon cousin Ouattara M. Zanga et ensuite à Martin Peres, Minh Thao Quash, Bernard Adouko, Daouda Ahmat, Tegawendé F. Bissyandé, en un mot, tous mes amis de l'Université de Bordeaux.

Je souhaite remercier à présent ma famille pour son soutien constant. Je voudrais principalement remercier mon aîné, Téné Birahima Ouattara qui avec promptitude m'a permis de réaliser ce grand rêve. Je n'oublierai jamais son soutien très déterminant tout au long de ma thèse. Merci infiniment très cher aîné pour cet accompagnement, tes encouragements et surtout d'avoir répondu présent à chaque fois que j'ai eu besoin de ton aide.

Cette thèse, aboutissement de longues années d'études, je la dois beaucoup à ma mère Ouattara Moussogbê, à mes exceptionnels frères et sœurs avec qui j'ai vécu, à l'abri de tous soucis affectifs. Il m'est impossible de trouver des mots pour dire à quel point je les aime. Je voudrais à présent rendre un hommage tout particulier à mon défunt père Ouattara Soungalo qui m'a quitté depuis l'âge de sept ans. De là où tu es, je sais que tu as suivi mon parcours et je reste convaincu d'avoir été une fierté pour toi, je te le devais et cette thèse t'est dédiée Papa.

Enfin, j'exprime toute mon affection à mon adorable épouse Andreea Ouattara née Bujor qui m'épaula maintenant depuis quatre années et sans qui la tâche aurait été infernale.

Résumé

Titre : *Apport des réseaux intelligents aux usages et pratiques en e-santé : Une architecture flexible basée sur la technologie radio cognitive pour un suivi efficace et temps réel des patients.*

Le vieillissement de la population sans doute catalysera l'augmentation des maladies chroniques et intensifiera le besoin de solutions d'assistance à la personne. Pendant que les chercheurs s'activent à apporter des réponses aux problèmes de santé publique qui s'accroissent, en s'appuyant sur les technologies de l'information et de la communication, le nombre des objets connectés connaît une expansion fulgurante. Ainsi, le désir de révolution des technologies pour la santé, afin de faire face à la menace pathologique, coïncide avec le développement de l'Internet des objets¹. En effet, grâce aux innovations technologiques et au progrès médical, nombre de pathologies, souvent chroniques pourraient être suivies en temps réel et en tout lieu. Dans ce contexte, la gestion ou le partage des ressources de communication, la compatibilité des technologies et les performances à atteindre constituent des défis importants. Cet accroissement significatif du volume des communications, les contraintes de mobilité imposées par le contexte du suivi de patient ainsi que les besoins de qualité dans les transmissions de données médicales, révèlent une aspiration à des infrastructures de communication plus flexibles. Dans cette thèse, nous présentons une architecture de communication basée sur les réseaux Radio Cognitive pour répondre à cette exigence. Le caractère adaptable, flexible et autonome de la solution proposée permet d'aspirer à de meilleures performances. Ainsi, pour l'évaluation de son efficacité, nous avons choisi d'analyser et de tester trois critères importants pour les transmissions de données médicales urgentes.

La connectivité en tout lieu : Ce premier critère est essentiel dans la mesure des performances et l'estimation de la fiabilité d'une infrastructure réseau dédiée à la santé. Plus précisément, toute solution de communication envisagée, doit être en mesure d'accompagner le patient suivi dans son environnement. En effet, la haute disponibilité des services réseaux et la qualité offerte sont déterminantes pour le suivi de patient à distance. Nous proposons dans cette première contribution, un mécanisme de prédiction spectrale capable d'examiner l'état d'occupation des bandes de fréquence. Cet algorithme associé au module de prise de décision Radio Cognitive, permet de parer aux éventuelles discontinuités de connexion réseaux.

La gestion des interférences : Il s'agit du second critère qui évalue le degré de coexistence des ondes garanti par l'architecture, dans un contexte de prolifération des réseaux et des objets connectés. Le matériel communicant doit être capable de percevoir, d'analyser son environnement et d'agir en fonction des différentes contraintes. L'intérêt étant de protéger le matériel surtout médical, souvent très sensible aux bruits. Le suivi du patient devient alors possible à domicile ou à l'hôpital par exemple, avec un niveau d'interférence acceptable. Ainsi, tout en proposant un modèle de déploiement du réseau Radio Cognitive dans un centre hospitalier, nous définissons des exemples de fonctions permettant une adaptation dynamique des paramètres de communication en fonction de la sensibilité des équipements médicaux de proximité.

L'efficacité dans la transmission de contenu multimédia : Ce dernier critère symbolise la capacité de l'architecture à fournir du contenu de qualité pour une assistance en temps réel. En effet, un

1. L'internet des objets désigne la connexion ou l'établissement de liaisons de communication entre les objets du quotidien.

VIII

réseau de soin à domicile ou une situation d'urgence peut nécessiter la transmission d'images ou de contenu multimédia vers les centres hospitaliers. Une solution de suivi de patient à distance doit être capable de fournir ces facilités qui imposent l'accès au haut débit. Dans une contribution répondant à cette préoccupation, nous suggérons un algorithme de réservation de ressources permettant de mieux gérer la qualité de service pour le contenu multimédia médical. Nous associons à cet algorithme, une méthode de contrôle des paramètres de transmission pour le maintien de la qualité de service à un niveau acceptable.

L'ensemble de ces fonctionnalités développées dans le cadre de cette thèse permettent ainsi de renforcer cette idée exprimée par l'architecture, d'une transition incontournable vers les réseaux médicaux Radio Cognitive.

Mots clés

E-santé, Réseaux médicaux Radio Cognitive, Connectivité, Gestion des interférences, Qualité de service, Grey Model, Model Predictive Control.

Abstract

Thesis title : *E-health services improvement through smart networking : A flexible architecture based on Cognitive Radio technology for efficient and real-time patient monitoring.*

The aging of the population will probably catalyze the rise of chronic diseases and could intensify the need for personal assistance solutions. While researchers are focusing on information and communication technologies to provide responses to these public health problems, the number of connected objects is experiencing a rapid expansion. Indeed, desired revolution of technologies for health, for prevention and disease treatment coincides with the development of the Internet of Things². Thus, technological innovations and medical progress, for making it possible to monitor pathologies, often chronic, anywhere need appropriate equipments. Also, remote and real-time patient monitoring applications would require more network resources. In this context, communication resources management/sharing, technologies and equipments compatibilities and application's desired performances become significant challenges. In this thesis, we propose an architecture based on Cognitive Radio, for meeting the medical applications constraints. We also analyze and test three important criteria for emergency transmissions, using this architecture.

Connectivity : Any solution for patients monitoring must have anywhere and anytime capabilities for care continuity needs. High availability of network services and quality offered are critical for patient telemonitoring. We propose in this context, a spectral prediction mechanism able to examine the occupation conditions of the frequency bands. The algorithm we propose, associated learning and Grey Model technique in order to deal with any network connection discontinuities.

Interference management : Network equipments must be able to perceive or to analyze their environment and act according to the underlying constraints. The interest is to protect in our case, medical equipment which are very sensitive to noise. Patient monitoring becomes possible at home or in the hospital, for example, with an acceptable level of interference. We propose for this criterion evaluation, a Cognitive Radio Networks deployment model in a hospital area. We define examples of functions for dynamic adaptation of the communication parameters, depending on the nearby medical devices sensitivity.

Transmission efficiency under multimedia content delivery : This criterion analyzes the ability of the architecture to provide desired quality in multimedia content delivery for real-time assistance or diagnosis. Patient monitoring at home or an emergency event may require the transmission of image or audio content to the hospital center. The remote monitoring solution must be able to provide these facilities which require a broadband network. We suggest an algorithm for resource reservation that performs a better management of the quality of service for medical multimedia content. We combine this algorithm with a transmission parameters control method for maintaining the QoS at an acceptable level.

Key words

E-health, Medical Cognitive Radio Networks, Connectivity, Interference management, QoS, Model Predictive Control, Grey Model.

2. The Internet Of Things refers to the connection or the communication links establishment between daily objects.

Table des matières

1	Introduction générale	1
1.1	Contexte	1
1.2	Les technologies pour la santé	2
1.2.1	L'informatique médicale ou la e-santé	2
1.2.2	Exemple d'applications de l'informatique médicale	2
1.3	Cadre de la thèse et problématiques	3
1.3.1	Problématique abordée	3
1.3.2	Importance du sujet	3
1.3.3	Synthèse des parties	3
1.3.4	Partie 1 : État de l'art	3
1.3.5	Partie 2 : Contributions	4
I	Définition des concepts et état de l'art	7
2	Informatique médicale (e-santé) : Principes, intérêts et perspectives	9
2.1	Introduction	10
2.2	Les principaux domaines d'application	10
2.2.1	Représentation conceptuelle de la e-santé	10
2.2.2	Exemple d'applications	11
2.3	Analyse de quelques projets de recherche	12
2.3.1	Les plate-formes autour de la personne	12
2.3.2	Les plateformes d'assistance à distance	13
2.4	Architecture générale pour le suivi de patient	16
2.4.1	Les caractéristiques des technologies exploitées	16
2.4.2	Analyse des problèmes et limites	18
2.4.3	Solution envisagée	18
2.5	Conclusion	19
3	Les réseaux Radio Cognitive : Fondements et opportunités	21
3.1	Introduction	22
3.2	Principe et modules Radio Cognitive	22
3.2.1	La norme IEEE 802.22 [GT_{norme}]	22
3.2.2	Principe de la Radio Cognitive	22
3.2.3	Le Cycle de la cognition	23
3.2.4	Architecture de la Radio Cognitive	24

3.2.5	Description des modules	24
3.2.6	Niveau d'intégration des modules aux modèles en couche	26
3.2.7	Les outils de l'intelligence Radio Cognitive	26
3.3	Les domaines d'application de la Radio Cognitive	28
3.3.1	Réseaux d'urgence	29
3.3.2	Réseaux pour les systèmes de santé	29
3.3.3	Réseaux militaires	30
3.4	Synthèse : Radio Cognitive et problématiques réseaux pour la santé	30
3.5	Conclusion	32
4	Application de la technologie Radio Cognitive au domaine de la e-santé	33
4.1	Introduction	34
4.2	Évolution des réseaux et intérêt de la Radio Cognitive en e-santé	34
4.3	La Radio Cognitive dans les infrastructures réseaux de e-santé	35
4.4	Présentation des contextes de suivi du patient et travaux inhérents	37
4.4.1	Les réseaux de capteurs e-santé Radio Cognitive	39
4.4.2	Les travaux évoquant les aspects de suivi du patient à l'hôpital	42
4.4.3	Les travaux testant l'hypothèse de mobilité du patient	44
4.4.4	Cas des réseaux Ad Hoc Radio Cognitive pour la e-santé	45
4.5	Quelques cas particuliers	45
4.5.1	Le sondage de bandes libres et identification de signes vitaux	46
4.5.2	Le sondage de bandes libres et déduction d'informations utiles	46
4.6	La Radio Cognitive dans les projets de télé-médecine	47
4.7	Conclusion	49
II	Présentation du cadre des communications et contributions	51
5	Architecture de communication Radio Cognitive dédiée aux systèmes de santé	53
5.1	Introduction	54
5.2	Présentation de l'architecture	54
5.3	Description des parties	55
5.3.1	Partie intra-WBAN Radio Cognitive	55
5.3.2	Partie inter-WBAN Radio Cognitive	55
5.3.3	Partie Communication extérieure Radio Cognitive	56
5.4	Présentation du cadre d'expérimentation	57
5.4.1	La plateforme Radio Cognitive	57
5.4.2	Le projet ANR-LICoRNe	62
5.5	Publication relative à cette partie	63
5.6	Conclusion	63
6	Connectivité dans les réseaux médicaux Radio Cognitive	65
6.1	Introduction	66
6.2	Analyse du problème	66
6.2.1	Contexte	66
6.2.2	Verrous techniques	67
6.3	Approche proposée pour le maintien de la connectivité	69

6.3.1	Description du mécanisme de prédiction	70
6.3.2	Les données d'entrée du modèle	71
6.3.3	Distribution de l'énergie sur chaque canal pour une période donnée	72
6.3.4	Description des outils : Apprentissage et Grey Model	73
6.3.5	Résultats	76
6.4	Publications relatives à cette partie	83
6.5	Discussion	83
6.6	Conclusion	84
7	Gestion des interférences dans les réseaux médicaux Radio Cognitive	85
7.1	Introduction	86
7.2	Analyse de la zone de couverture et des interférences	86
7.2.1	Spécification de différentes hypothèses	86
7.2.2	Caractère de la zone de couverture et interférences	90
7.3	Stratégie de déploiement et approche de gestion des interférences	92
7.3.1	Présentation du cadre de déploiement hospitalier proposé	93
7.3.2	Techniques de gestion des interférences	94
7.3.3	Exemples de stratégies	95
7.3.4	Expérimentation et résultats	97
7.4	Publications relatives à cette partie	103
7.5	Discussion	103
7.6	Conclusion	105
8	Amélioration des performances des réseaux médicaux Radio Cognitive	107
8.1	Introduction	108
8.2	Analyse de la problématique de performances	108
8.2.1	Présentation du contexte	109
8.2.2	Analyse des délais et défis à relever	110
8.3	Approche et solution proposée	112
8.3.1	Description du mécanisme d'anticipation	112
8.3.2	Modélisation du mécanisme avec le modèle de contrôle prédictif (MPC)	114
8.3.3	Implémentation, tests et résultats	116
8.4	Cadre d'application : Transmission de données multimédia	120
8.4.1	Présentation du cadre des transmissions	121
8.4.2	Modélisation du contrôle de la QoS et résultats	122
8.5	Publications relatives à cette partie	128
8.6	Discussion	129
8.7	Conclusion	130
9	Conclusion générale et perspectives	131
9.1	Contributions	132
9.1.1	Renforcement du module « Sondage » et connectivité	132
9.1.2	Renforcement du module « prise de Décision » et gestion des interférences	132
9.1.3	Renforcement du module « Partage » et allocation des ressources	133
9.2	Travaux en cours et perspectives	133
9.2.1	Les travaux en cours	133
9.2.2	Les perspectives et discussion	134

A	Liste des abréviations et acronymes	137
B	Liste récapitulative des publications	139
B.1	Publications dans des revues à comité de lecture	139
B.2	Communications avec actes en conférences	139
B.3	Communications sans actes	140
	Bibliographie	141

Table des figures

2.1	Schéma descriptif de la e-santé	10
2.2	Schéma illustrant le processus d'assistance au patient	11
2.3	Services offerts par le projet SAAPHO [SAAP 14]	13
2.4	Architecture du projet STROKEBACK [STRO 14]	14
2.5	Architecture du projet REACTION [REAC 14]	15
2.6	Architecture du projet CHRONIOUS [CHRO 12]	16
2.7	Architecture et contextes du suivi de patient	17
3.1	Cycle de la cognition [Mito 06]	23
3.2	Schéma de la Radio Cognitive	24
3.3	Principaux modules de la Radio Cognitive [Aky1 09]	25
3.4	Modules Radio Cognitive et leur adjonction aux couches du modèle OSI [Aky1 06]	27
4.1	Exemple d'infrastructure Radio Cognitive en e-santé [Ziqi 11]	36
4.2	Exemple plus illustratif du principe Radio Cognitive en e-santé [Dimi 10]	37
4.3	Contextes de suivi selon la classification arrêtée dans [Algh 13]	38
4.4	Exemples de plateformes applicatives pour chaque contexte [Algh 13]	39
4.5	Modèle de gestion des interférences proposé dans [Qian 13]	41
4.6	Modèle de déploiement de la Radio Cognitive en milieu hospitalier [Phun 10]	43
4.7	Coexistence radio avec la technologie SDR [Chav 13]	44
4.8	Sondage concurrent de bandes libres et des signes vitaux [FuWa 10]	46
5.1	Architecture de communication Radio Cognitive en e-santé	54
5.2	Les outils Radio Cognitive utilisés	57
5.3	Résultats du sondage du spectre sur différents canaux	60
5.4	Sondage de la bande WiFi dans deux contextes différents	61
5.5	Sondage de la bande GSM dans deux contextes différents	61
5.6	Distribution de la puissance de transmission sur les canaux	61
6.1	Fonctionnement du nœud Radio Cognitive	68
6.2	Principe de prédiction proposé	69
6.3	Illustration de l'interprétation du signal reçu	72
6.4	Illustration du mécanisme état-transition	74
6.5	Prédiction avec GM(1,1) selon Dounis et al. [Doun 06]	77
6.6	Tableau comparatif des résultats obtenus par Dounis et al. [Doun 06]	78
6.7	Résultats des prédictions avec GM(1,1)	79
6.8	Aperçu des écarts de prédictions avec GM(1,1)	79

6.9	Prédiction du module (AA-Module) sur 44 valeurs	81
6.10	Prédiction du module (AA-Module) sur 25 et 10 valeurs	81
7.1	Pas de chevauchement entre les zones SU et PU	88
7.2	Zone du SU à l'intérieur de celle du PU	88
7.3	Zone du PU à l'intérieur de celle du SU	89
7.4	Zone de chevauchement entre PU et SU	90
7.5	Impact des ondes en fonction de la dimension de la zone de chevauchement	91
7.6	Stratégie de déploiement dans un contexte hospitalier	92
7.7	Plan de gestion des interférences	95
7.8	Prédiction de la distance	100
7.9	Résultat d'expérimentation du saut de fréquence	102
7.10	Complexité dans la détermination de la position du nœud mobile	104
8.1	Processus conduisant à la réalisation des communications	108
8.2	Scénario des transmissions de données	110
8.3	Fonctionnement du partage des canaux et délais	111
8.4	Expression de la probabilité d'attente	112
8.5	Partage des canaux libres et mécanisme de réservation	113
8.6	Fonctionnement du modèle MPC	115
8.7	Formulation des contraintes pour les simulations avec Matlab	117
8.8	Variation des paramètres d'entrée	118
8.9	Variation des paramètres de sortie, le cas sans équilibre	119
8.10	Variation des paramètres de sortie, le cas avec équilibre	119
8.11	Présentation du cadre des transmissions multimédia	121
8.12	Fixation des contraintes de QoS	125
8.13	Variation des paramètres d'entrée	126
8.14	Variation des paramètres de sortie, le cas sans équilibre	126
8.15	Variation des paramètres de sortie, le cas avec équilibre ($p = 5$)	127
8.16	Variation des paramètres de sortie, le cas avec équilibre ($p = 2$)	128
9.1	Aperçu des modules Radio Cognitive analysés	134

Liste des tableaux

2.1	Les standards réseaux sans fil	18
4.1	Limites des plateformes existantes [Algh 13]	48
5.1	Présentation de quelques exemples de cartes filles [USRP]	58
5.2	Présentation de quelques versions de cartes mères [USRP]	59
6.1	Tableau comparatif des techniques de détection du spectre	67
6.2	Valeurs d'entrée du module (AA-Module)	80
7.1	Annotation des symboles utilisés	87
8.1	Annotation des symboles utilisés	116
8.2	Durée des transmissions entre le centre hospitalier et un serveur fixe [DATA 13] . . .	123
8.3	Durée des transmissions entre le serveur et un poste de radiologie nomade [DATA 13]	123
8.4	Exemple de classification des contenus	124

Chapitre 1

Introduction générale

*“La santé est le trésor le plus précieux et le plus facile à perdre ;
c’est cependant le plus mal gardé.”*

Chauvot de Beauchêne

Sommaire

1.1	Contexte	1
1.2	Les technologies pour la santé	2
1.2.1	L’informatique médicale ou la e-santé	2
1.2.2	Exemple d’applications de l’informatique médicale	2
1.3	Cadre de la thèse et problématiques	3
1.3.1	Problématique abordée	3
1.3.2	Importance du sujet	3
1.3.3	Synthèse des parties	3
1.3.4	Partie 1 : État de l’art	3
1.3.5	Partie 2 : Contributions	4

1.1 Contexte

Selon les projections de l’Organisation Mondiale de la Santé (OMS), en 2050, la proportion de la population mondiale âgée de plus de 60 ans atteindra environ 22%, soit deux milliards [OMS 12] de personnes. Cette forte croissance démographique accentuera certainement les risques sanitaires et amplifiera les difficultés actuelles liées au parcours de soins. Plus précisément, l’organisation de la prise en charge globale et continue des patients, déjà confrontée à l’inefficacité des traitements et l’explosion du coût des soins devra se préparer à l’imminence du vieillissement de la population et ses corollaires. Outre cette augmentation attendue du nombre de personnes âgées, une prolifération des objets du quotidien connectés s’annonce. Cette multiplication des données et des échanges soulève alors des interrogations relatives au stockage et surtout à la gestion efficace des ressources de communication. Dans un tel contexte, la proposition de toute solution technologique d’assistance à la personne, devra tenir compte des contraintes de cet environnement de plus en plus connecté. La recherche médicale, domaine aux perspectives pluridisciplinaires reliant notamment la biologie, l’électronique, l’informatique à la médecine, se retrouve ainsi face à ces nombreux défis. La démarche actuelle recommande également la conception et l’adoption d’innovations devant accompagner l’avancée en âge et pouvant

atténuer les effets de la perte d'autonomie dans ce contexte de partage accru des ressources. Cela devra se traduire par la création de services personnalisés, indispensables au bien être et au suivi des personnes atteintes de pathologies chroniques, en utilisant efficacement les outils ou les technologies dédiés à cet effet. Les techniques de la e-santé, en plein essor, devraient s'adapter à cet accroissement des besoins et à la multiplication des contraintes pour une meilleure prise en charge des pathologies et une efficacité des traitements. Les technologies pour la santé constituant un vaste domaine de recherche, il convient de situer quelques-unes de ses disciplines et de circonscrire le champ particulier abordé dans ce travail de thèse.

1.2 Les technologies pour la santé

L'International Network of Health Technologies Assessment (INAHTA) [HTA 06] définit le terme technologies pour la santé comme étant « toute intervention susceptible d'être utilisée pour promouvoir la santé, pour prévenir, diagnostiquer ou traiter une maladie ou encore, suivre une rééducation de court ou long terme. Les technologies pour la santé englobent les médicaments, les dispositifs, équipements ou infrastructures, les procédures et l'organisation dans les systèmes de santé ». Le champ des technologies pour la santé couvre par conséquent les domaines de l'informatique, de l'imagerie médicale, de la pharmacie, des nanotechnologies, de la biologie entre autres. Parmi ces domaines, **les technologies numériques**, représentent en particulier de véritables potentiels pour améliorer la qualité des systèmes de santé. L'informatique appliquée à la santé encore appelée e-santé est ainsi au cœur des priorités dans le développement des systèmes de santé actuels. Une tentative de définition de l'informatique médicale ou de la e-santé permettra de mieux cerner ce concept.

1.2.1 L'informatique médicale ou la e-santé

L'informatique médicale, encore appelée e-santé, correspond à « l'application des technologies de l'information et de la communication (TIC) à l'ensemble des activités en rapport avec la santé » selon la Commission Européenne [EC 11]. Ces applications concernent en partie, les concepts de la télé-médecine, de prévention des risques, du maintien à domicile, de suivi à distance de maladies chroniques ainsi que la mise en place des dossiers médicaux numérisés. L'analyse de cette définition révèle d'un côté les besoins à satisfaire et de l'autre, les outils, le matériel et les systèmes à proposer. Le chapitre 2 fournit des détails importants sur cette association entre les outils et les techniques de gestion de l'information sanitaire caractérisant l'informatique médicale. Toutefois, il est important de relever quelques activités qui se développent avec la e-santé.

1.2.2 Exemple d'applications de l'informatique médicale

L'informatique médicale développe des techniques axées principalement sur le traitement, la transmission et le stockage des données de santé. Formellement, l'implantation des systèmes d'information hospitaliers améliore les performances des systèmes de santé. Ainsi, la collecte, le traitement des signaux et l'imagerie médicale renforcent l'analyse et la prise de décision médicale. Tout comme les équipements, les infrastructures et les réseaux de communication hospitaliers renforcent le partage des dossiers médicaux numériques entre les professionnels de la santé. Aussi, les plate-formes de stockage et les techniques de sécurisation des données de santé assurent la fiabilité des solutions proposées. On note alors que les perspectives de l'usage des technologies de l'information et de la communication au service de la santé sont remarquables malgré l'ampleur des défis restant à relever.

1.3 Cadre de la thèse et problématiques

Les recherches menées dans le cadre de ce travail de thèse, visent à réfléchir avant tout sur les problématiques essentielles de l'informatique médicale et plus particulièrement celles du suivi de patient. Une fois les verrous situés, notre contribution consistera à esquisser des solutions appuyées par des propositions susceptibles d'améliorer les services offerts.

1.3.1 Problématique abordée

Le déploiement d'une infrastructure réseaux dédiée aux structures sanitaires, mise au service des patients, doit répondre nécessairement aux besoins de fiabilité, de performances et surtout à la question d'une gestion efficace des interférences. Ces exigences sont grandement confrontées à la raréfaction des ressources réseaux, à l'explosion des communications et des objets connectés. Face à ces problématiques, la technologie Radio Cognitive se présente comme une alternative. Rappelons que cette technologie fait partie de la famille des réseaux intelligents, dont le principe est basé sur l'implémentation des techniques de l'Intelligence Artificielle (IA), afin de renforcer leur capacités cognitives. L'évaluation des paramètres de performance dans le réseau Radio Cognitive, nous permettra alors d'apprécier sa capacité à supporter les communications d'urgence. La méthodologie adoptée consiste d'une part à dégager la singularité de la Radio Cognitive, et d'autre part, à tester ou expérimenter quelques caractéristiques qui rendent cette technologie prometteuse pour le domaine de la santé.

1.3.2 Importance du sujet

La proposition d'une architecture de communication autonome, s'appuyant sur les réseaux Radio Cognitive, capable de lever les verrous de performances et de garantir l'efficacité des transmissions des données de santé constitue le principal objectif de cette thèse. L'axe de recherche ainsi choisi se justifie par le besoin exprimé, d'apporter une couverture réseaux de qualité en tous lieux. Devant les limites affichées par les technologies réseaux traditionnelles (3G, 4G), qui se résument en une utilisation inefficace de la ressource spectrale, la Radio Cognitive est envisagée pour offrir plus de flexibilité et de performances. La Radio Cognitive selon J. Mitola III [Mito 99], est une technologie radio intelligente capable de détecter les bandes de fréquences libres et d'adapter ses paramètres de transmission en fonction des besoins et des contraintes de la communication. L'exploration du potentiel de cette technologie pourrait offrir des opportunités et déboucher sur de nouvelles perspectives intéressantes pour les transmissions d'informations vitales.

1.3.3 Synthèse des parties

Deux grandes parties composent ce travail de thèse. La première partie, essentiellement consacrée à l'état de l'art, donne les détails des principaux concepts abordés et les avancées inhérentes. La seconde partie concentre les questions auxquelles nous avons apporté un début de réponse à savoir, le besoin d'une connectivité, la gestion des interférences et l'adaptation des paramètres de transmission afin de satisfaire aux besoins de qualité de service.

1.3.4 Partie 1 : État de l'art

Nous développons la notion d'informatique médicale au **second chapitre** qui est à proprement parler, le premier de la partie « état de l'art ». Les avancées technologiques et les perspectives de recherche offertes par cette science sont étudiées. L'analyse de divers projets de recherche achevés ou

en cours du domaine, nous permet de relever les limites dans le choix des technologies de communication. Les insuffisances ainsi constatées viennent renforcer la thèse du choix de la Radio Cognitive comme technologie alternative. Le **troisième chapitre** présente les caractéristiques des réseaux Radio Cognitive. Les principaux modules des réseaux Radio Cognitive et les techniques de sondage ou de partage efficace du spectre sont présentés. Le **quatrième chapitre** donne un large aperçu des travaux de recherche s'intéressant à l'exploitation des réseaux Radio Cognitive pour le besoin des services de santé. Ce chapitre aborde différents aspects de la littérature dont certains ne sont pas largement évoqués ou traités dans le cadre de cette thèse. Nous nous intéressons essentiellement à la Radio Cognitive au service des infrastructures réseaux à moyenne ou longue portée pour la santé. Une référence aux travaux sur les réseaux de capteurs Radio Cognitive est réalisée et cette perspective de recherche non explorée dans ce travail de thèse prendra une place importante dans nos futures activités de recherche. La sécurisation des échanges et des données de santé, bien que constituant un axe d'étude important, ne fait également pas l'objet d'une analyse approfondie. Toutefois, nous mentionnons quelques liens détaillant les aspects de sécurisation des données dans les réseaux Radio Cognitive.

1.3.5 Partie 2 : Contributions

Les chapitres qui suivent, permettent de détailler nos différentes contributions dans le contexte d'une architecture de suivi de patient basée sur la Radio Cognitive. Ainsi, au **chapitre cinq**, le premier de cette partie (contributions), nous présentons le cadre sur lequel repose nos différentes contributions. Il s'agit de l'architecture de communication Radio Cognitive dédiée aux systèmes de santé. Nous procédons également à la présentation de la plateforme Radio Cognitive qui a servi en grande partie au travail d'expérimentation. L'originalité du cadre que nous proposons, repose sur la généralisation de l'utilisation de la technologie Radio Cognitive avec la possibilité d'accès au réseau s'étendant à l'ensemble des contextes de suivi du patient (à domicile, à l'hôpital, en mobilité). Le **chapitre six** correspond à notre proposition traitant des performances réseaux en terme de connectivité. Ainsi, dans un contexte médical exigeant plus de fiabilité, nous proposons une approche de prédiction spectrale basée sur l'apprentissage artificiel et la technique du « Grey Model ¹ » pour assurer la connectivité en tout lieu. L'aspect novateur de notre approche repose sur le fait que nous renforçons les attributs du module Sondage afin de le rendre plus efficace pour fournir les ressources (canaux) nécessaires à la communication. Ceci dans l'objectif de réduire la perte de temps liée à la recherche des canaux libres. Le **septième chapitre** se penche sur l'analyse des interférences et les mécanismes pouvant être adoptés par la Radio Cognitive pour leur évitement. Les stratégies de gestion des interférences suggérées dans cette partie, prennent toute leur importance avec le matériel hospitalier qui devient de plus en plus communicant et des appareils médicaux très sensibles au bruit. Un cadre d'expérimentation appuyé par des résultats de simulation en milieu hospitalier a été proposé. Le mécanisme de gestion des interférences que nous proposons se distingue des travaux de recherche menés à ce jour essentiellement par la faculté d'auto-adaptation des paramètres de transmission du nœud Radio Cognitive dans un contexte hospitalier. Nous intégrons en effet dans la base de connaissance Radio Cognitive, l'analyse de métriques (position, seuil d'interférence) qui favorise une prise de décision locale dont le but demeure la réduction des effets des ondes électromagnétiques sur le matériel médical sensible. Le **huitième chapitre** répond à l'exigence de suivi ou d'examen à distance, devant être facilité par la transmission de contenu médical multimédia. Nous proposons à cet effet, un système de réservation à la volée de ressources réseaux qui optimise le partage des bandes de fréquence. La méthode proposée garantit une allocation de bandes satisfaisant les exigences de l'application médicale. L'extension de

1. Modèle défini au chapitre 6

la technique de prédiction utilisée pour la réservation de ressources a permis également de suggérer une méthode de contrôle et d'adaptation dynamique des paramètres de transmission afin de garantir au mieux la qualité de service requise. Soulignons que la contribution majeure dans ce chapitre est d'avoir introduit dans le fonctionnement de la Radio Cognitive, un mécanisme de contrôle en temps réel de paramètres de transmission. En effet, en plus de l'état du canal (libre ou occupé), nous suggérons d'utiliser le MPC (Model Predictive Control) pour la surveillance en temps réel de paramètres liés à la QoS afin de répondre aux besoins des applications.

Première partie

Définition des concepts et état de l'art

Chapitre 2

Informatique médicale (e-santé) : Principes, intérêts et perspectives

*“L’homme et sa sécurité doivent constituer la première préoccupation
de toute aventure technologique.”*

Albert Einstein

Sommaire

2.1	Introduction	10
2.2	Les principaux domaines d’application	10
2.2.1	Représentation conceptuelle de la e-santé	10
2.2.2	Exemple d’applications	11
2.3	Analyse de quelques projets de recherche	12
2.3.1	Les plate-formes autour de la personne	12
2.3.2	Les plateformes d’assistance à distance	13
2.4	Architecture générale pour le suivi de patient	16
2.4.1	Les caractéristiques des technologies exploitées	16
2.4.2	Analyse des problèmes et limites	18
2.4.3	Solution envisagée	18
2.5	Conclusion	19

Résumé

Dans ce chapitre, nous décrivons les principaux axes de l’informatique médicale encore appelée e-santé. Le développement du volet suivi technologique et prévention est mis en exergue à travers l’analyse de divers projets de télé-médecine. De l’analyse de ces projets, nous construisons une architecture plus représentative du domaine. L’étude des technologies utilisées dans la télé-santé, permet de mettre un accent sur les limites et les verrous existants. Les principaux verrous demeurant ainsi, la connectivité, la gestion des interférences et surtout le problème d’interopérabilité entre les technologies déployées.

2.1 Introduction

L'informatique médicale, domaine de recherche multidisciplinaire, connaît un essor significatif et se positionne à présent comme incontournable pour les systèmes de santé. Les facteurs déterminants de cette percée des technologies de l'information et de la communication dans le domaine de la santé, restent le vieillissement de la population conjugué à l'insuffisance du personnel de santé, sans ignorer la hausse des coûts des soins. Cela se traduit par le nombre de personnes en situation de dépendance qui continue d'augmenter, les maladies chroniques qui s'accroissent, occasionnant ainsi un énorme besoin en technologies appropriées. Le contexte est par conséquent, favorable à une réflexion conduisant à la modélisation de solutions plus innovantes pour une efficacité des soins aux patients. Les solutions d'assistance ou de suivi et les mécanismes de prévention des risques sanitaires paraissent de plus en plus pertinents face à ces nouveaux défis. Dans ce chapitre, la première section apporte quelques détails sur les sous-domaines de la e-santé et les applications inhérentes. La seconde section dresse l'état des progrès actuels en terme de projets de recherche innovants en e-santé et les tendances qui émergent. Enfin, la troisième section analyse les choix technologiques pour l'assistance ou le suivi de patients, tout en déclinant les limites et l'étendue des challenges à relever.

2.2 Les principaux domaines d'application

L'informatique médicale repose sur l'utilisation de la technologie informatique pour l'acquisition, la visualisation, l'organisation, l'analyse, la gestion et le partage de l'information médicale pour une meilleure amélioration des soins de santé. On distingue alors deux volets intrinsèques à la e-santé. Il existe d'une part, les services offerts grâce à la gestion des données médicales, et d'autre part, les outils utilisés et qui rendent possible l'effectivité de ces services. Un schéma semble bien indiqué pour une meilleure illustration des aspects de cette discipline.

2.2.1 Représentation conceptuelle de la e-santé

La figure 2.1 inspirée des activités de l'Association Américaine de gestion de l'Information de Santé *AHIMA* (American Health Information Management Association) [[AHIMA](#)], apparait comme étant le reflet le mieux approprié au concept de l'informatique médicale.

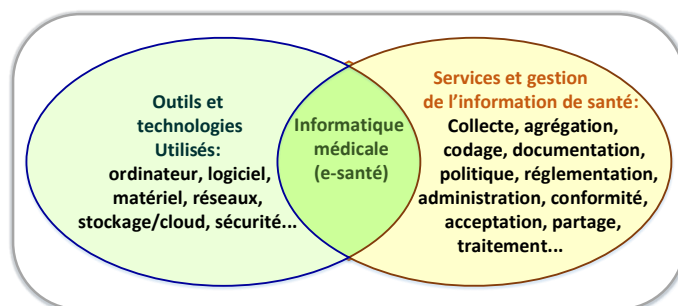


FIGURE 2.1 – Schéma descriptif de la e-santé

Les termes les plus associés à la gestion de l'information sanitaire élucident pleinement les outils utilisés, tel que décrit par la figure 2.1. Cette spécification des outils donne une large vision sur les services ou les applications inhérentes.

2.2.2 Exemple d'applications

Les applications les plus répandues de la e-santé sont regroupées et surtout connues sous le vocable de **Télé-médecine**. Le décret [DECR] relatif à la télé-médecine en France, décrit cette discipline comme représentant « les actes médicaux, réalisés à distance, au moyen d'un dispositif utilisant les technologies de l'information et de la communication ». Partant des indications de ce décret, les actes caractérisant la télé-médecine sont les suivants :

1. « **La télé-consultation**, dont l'objet est de permettre à un professionnel médical de réaliser une consultation à distance pour le compte d'un patient ».
2. « **La télé-expertise**, qui a pour objet de permettre à un professionnel médical de solliciter à distance l'avis d'un ou de plusieurs professionnels médicaux en raison de leurs formations ou de leurs compétences particulières, sur la base des informations médicales liées à la prise en charge d'un patient ».
3. « **La télé-surveillance médicale**, consiste à offrir à un professionnel médical, les outils techniques lui permettant d'interpréter à distance les données nécessaires au suivi médical d'un patient et le cas échéant, de prendre des décisions relatives à la prise en charge de ce patient ».
4. « **La télé-assistance médicale** a pour objet quant à elle, de permettre à un professionnel médical d'assister à distance un autre professionnel de santé au cours de la réalisation d'un acte ».

La figure 2.2 apporte une meilleure description des outils et des technologies de communication facilitant ces activités.

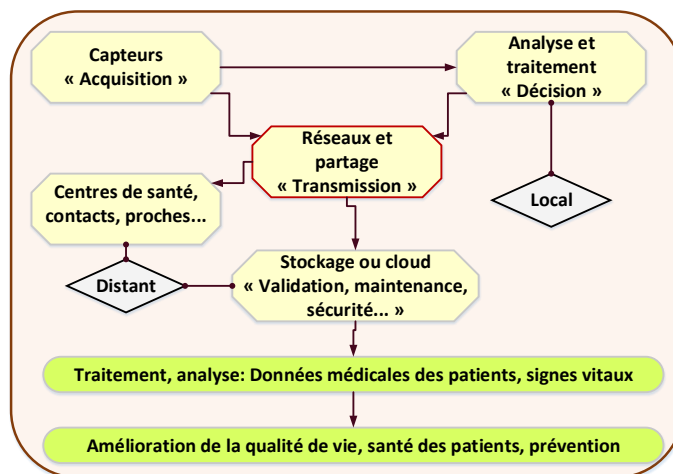


FIGURE 2.2 – Schéma illustrant le processus d'assistance au patient

L'acquisition des données par des capteurs, le traitement et la prise de décision, le partage au moyen des réseaux constituent des exemples d'actions susceptibles d'améliorer le bien être des personnes. Pour une meilleure compréhension, nous faisons une classification de ces actions en deux catégories. Il s'agit d'abord de l'assistance de proximité, qui fait référence à toutes les activités liées au maintien à domicile ou au suivi dans un centre hospitalier avec pour particularité, le traitement

local des données. Ensuite, on note le suivi à distance qui se traduit par un traitement de l'information à une extrémité lointaine. Formellement, le suivi à distance se rapporte entre autres, aux termes de **télé-radiologie** qui consacre l'interprétation des examens radiologiques à distance, de **télé-chirurgie** qui est la chirurgie assistée par ordinateur à distance, de **télé-diagnostic**. Le développement des services est assez notable et les échanges des données électroniques entre les professionnels de santé sont porteurs d'efficacité dans la pratique des soins médicaux offerts aux patients. Toutes ces activités deviennent possibles grâce aux infrastructures ou aux équipements matériels et logiciels prévus à cet effet. Les outils utilisés doivent respecter un ensemble de critères allant des performances au caractère non invasif en passant par une commodité d'usage. Ainsi, l'idée de conception de solutions d'assistance technologique devra respecter les tendances de personnalisation, de disponibilité et de mobilité pour être efficace. La personnalisation apporte une réponse aux attentes du patient, à son adhésion au traitement et mieux, au dispositif médical. La disponibilité et la mobilité tendent vers une assurance de fonctionnement de la solution en tout lieux. L'accroissement actuel des travaux de recherche dans le domaine du suivi/prévention et de l'assistance à la personne, vise à apporter des réponses à ces nombreuses contraintes. Pour un meilleur aperçu de cette tendance, nous faisons une énumération sommaire de quelques projets de recherche intéressants dans le domaine de la e-santé.

2.3 Analyse de quelques projets de recherche

Nous distinguons deux catégories de projets. Les projets offrant des services d'aide à l'autonomie des personnes et les projets de suivi à distance. Nous analysons par la suite, le choix de l'infrastructure et nous faisons un focus sur les technologies utilisées tout en relevant les difficultés techniques associées.

2.3.1 Les plate-formes autour de la personne

Ils composent les supports de l'aide à l'autonomie et au maintien à domicile. L'objectif étant d'apporter une assistance à la personne dans son activité au quotidien. Plusieurs projets ont été initiés à cet effet parmi lesquels, *VITAL*, *NETCARITY* et *SAAPHO*.

Le projet VITAL [VITAL 10] : Il a pour objectif d'offrir du confort et de la sécurité aux personnes âgées. C'est un projet européen co-financé par la commission européenne (DG Information Society) et Media. Ce projet a débuté en Janvier 2007 et a pris fin en Septembre 2010. La mission qui lui était assignée devait avoir pour effet, la responsabilisation des personnes âgées afin qu'elles prennent soin d'elles-mêmes, en leur fournissant l'assistance nécessaire, et en facilitant l'accès à l'information. D'un point de vue technique, VITAL est un système impliquant différents outils communicants. Les technologies de communication 3G (mobile) sont associées dans ce projet, aux médias audio-visuels (TV) pour une diversité de contenu et de services offerts. Notons enfin que l'un des défis du projet, a été la question de la coordination adéquate et de l'intégration de ces différentes technologies.

Le projet NETCARITY [NETC 11] : C'est un projet soutenu par la communauté européenne, initié en Février 2007 et qui a pris fin en Octobre 2011. Tout comme le projet précédent, il vise à assurer la sécurité, le bien-être et l'indépendance des personnes vivant seules à la maison. Les capteurs et les caméras utilisés aident à la localisation et à la détection de situations d'urgence. Ce projet met en évidence une association de capteurs hétérogènes indispensables à l'atteinte des objectifs. Cette com-

binasion de capteurs de types différents pose le problème d'interopérabilité et aussi d'interférences émanant de ces diverses sources de communication.

Le projet SAAPHO [SAAP 14] : C'est un projet scientifique de 3 ans lancé en Juillet 2011 et en partie financé par la Commission Européenne. SAAPHO s'est également intéressé aux personnes âgées et ce projet vise à améliorer leur qualité de vie en assurant leur autonomie ainsi que leur indépendance. Il offre des services liés à la prise de médicaments, à la pratique de saines habitudes et des services garantissant la sécurité à savoir, la surveillance de gaz, d'incendie, de CO_2 et de la température. En plus, ce projet met à contribution les outils de communication pour assurer le partage d'images, de vidéos et des jeux de société en réseaux. Techniquement, SAAPHO offre des services en s'appuyant sur une architecture composée de smart-phones, de capteurs et surtout des technologies NFC (Near Field Communication) pour le besoin de liaisons à courte portée tel qu'illustré à la figure 2.3.



FIGURE 2.3 – Services offerts par le projet SAAPHO [SAAP 14]

Les partenaires dans ce projet misent sur les outils et les technologies de communication existants pour le besoin de son implémentation. Cela confirme le fait que SAAPHO confine inévitablement les mêmes défis que NETCARITY et VITAL.

A ces mécanismes d'aide de proximité, sont arrimés des dispositifs externes à l'environnement de la personne suivie. Il s'agit des mécanismes traitant les questions de gestion de banques d'information ou de dossiers médicaux et expérimentant les réseaux de soins. Plus précisément, ce sont les initiatives de recherche concernant les systèmes d'information de santé qui exigent des communications à longue portée.

2.3.2 Les plateformes d'assistance à distance

Nous nous intéressons particulièrement à quelques projets relatifs au suivi et à l'assistance accomplissant un acte de télé-médecine. L'accent dans ces initiatives, est mis sur les interactions entre les

patients ou les données des patients et les professionnels de santé, à l'aide des réseaux de communication. Aussi, une relation et des échanges réguliers sont créés entre le site hospitalier, le domicile et le site de traitement ou encore celui de stockage des données. Parmi divers projets, nous nous focalisons sur la compréhension et les spécificités de STROKEBACK, REACTION et CHRONIOUS.

Le projet STROKEBACK [STRO 14] : Le projet a débuté en Octobre 2011 et se termine en Septembre 2014. L'objectif étant de mettre en œuvre un système de télésurveillance qui soutient et accélère la rééducation à domicile des patients victimes d'accident cardiovasculaire (AVC). Le système intègre une base de données médicales dénommée PHR (Personal Health Record) tel que décrit à la figure 2.4. L'accès à distance aux données permet aux professionnels de santé d'évaluer le rétablissement, de faire des évaluations à mi-parcours tout en indiquant la bonne orientation aux patients.

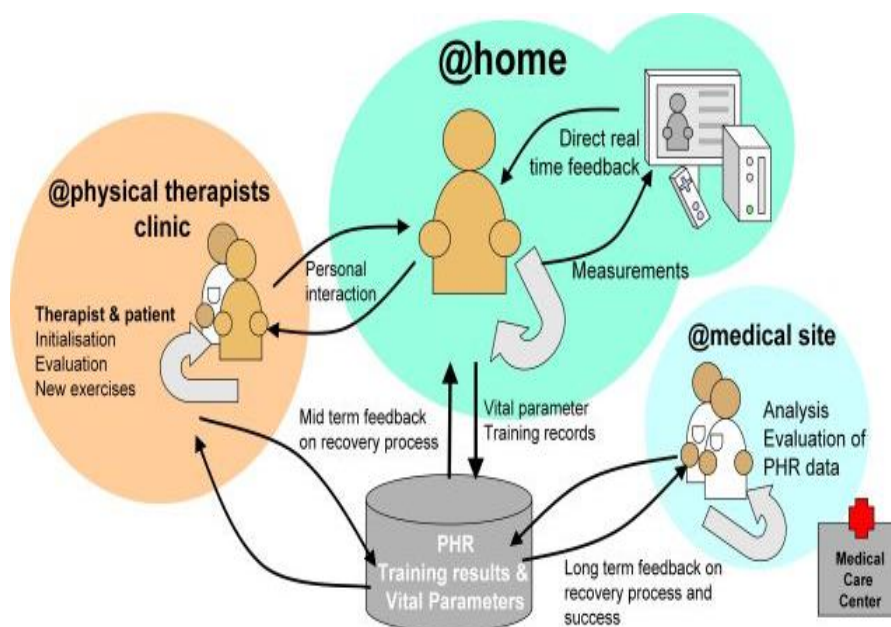


FIGURE 2.4 – Architecture du projet STROKEBACK [STRO 14]

Techniquement, StrokeBack combine des capteurs formant un réseau corporel sans fil pour mesurer les paramètres vitaux. De plus, les réseaux d'accès sont sollicités pour l'établissement de liaisons entre les différentes entités à savoir, les hôpitaux, les cliniques, le dispositif au domicile du patient et les plate-formes de stockage des données tel que cela est indiqué à la figure 2.4. Ainsi, ce projet devra faire face à de nombreux défis liés à la coordination des capteurs, à la fusion/stockage électronique, aux contraintes des communications mobiles sans fil, à la mobilité des patients, à la sécurité et par conséquent, à la vie privée.

Le projet REACTION [REAC 14] : REACTION (Remote Accessibility to Diabetes Management and Therapy in Operational healthcare Networks) est un projet dédié aux personnes diabétiques. Le but de ce projet est de développer une plate-forme pour l'amélioration de la santé à long terme du patient diabétique. Du point de vue pratique, son architecture est basée sur des capteurs assurant une surveillance continue de la glycémie, des signes vitaux et un système automatisé contrôlant le taux

d'insuline. Ainsi, la plate-forme relie les équipements autour du patient aux acteurs intervenant dans le processus des soins tel que détaillé à la figure 2.5.

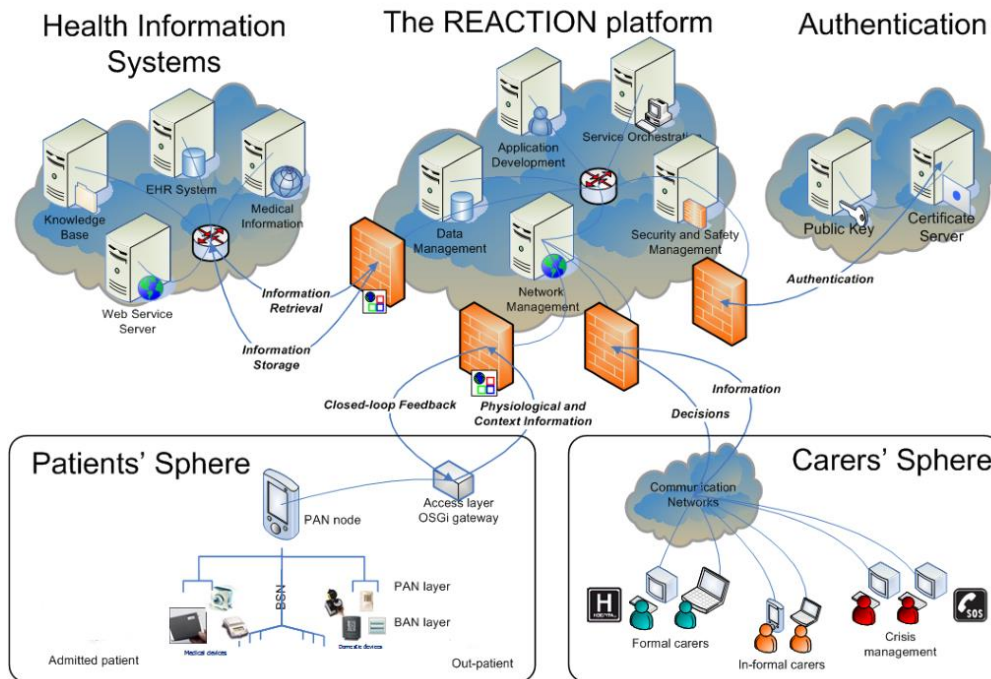


FIGURE 2.5 – Architecture du projet REACTION [REAC 14]

La figure 2.5 expose également les liaisons entre le réseau autour de la personne, les systèmes d'information de santé désignés par l'acronyme HIS (Health Information Systems) et les fournisseurs de services (sécurité, cloud). Ce projet soulève assurément de nombreux défis dont le déploiement d'un réseau de capteur non-invasif et l'interopérabilité entre les diverses sources de communication.

Le projet CHRONIOUS [CHRO 12] : Ce projet vise à développer une plate-forme de suivi pour les personnes atteintes de maladies chroniques. La plate-forme ambitionne d'abord d'améliorer les conditions d'auto-traitement et d'auto-prise en charge du patient. Ensuite, elle devrait aider les professionnels des soins, dans la surveillance de la santé des personnes souffrant de maladies chroniques en général. CHRONIOUS était initialement prévu pour le suivi de maladies pulmonaires et rénales chroniques, mais selon ses initiateurs, la plate-forme reste extensible à d'autres maladies.

La fonction de surveillance continue de l'activité et de l'état de santé des malades par CHRONIOUS s'appuie sur un ensemble de capteurs et d'équipements tels que les smartphones ou les PDA (Smart Assistant Device) servant de nœuds collecteurs des données, comme illustré à la figure 2.6. Ce projet démontre la réalisation possible du suivi de plusieurs pathologies à la fois, mais il n'en demeure pas moins dans la pratique, qu'il traîne les difficultés d'implémentation similaires aux précédents. L'analyse ainsi réalisée de certains projets de recherche relatifs au suivi de patient, apporte plus de clarification sur les acteurs, les outils et les technologies du domaine en interaction. Pour rendre les activités de la e-santé plus compréhensibles et sur la base de ces projets, nous faisons l'ébauche d'une architecture représentative de l'ensemble des échanges entre les entités.

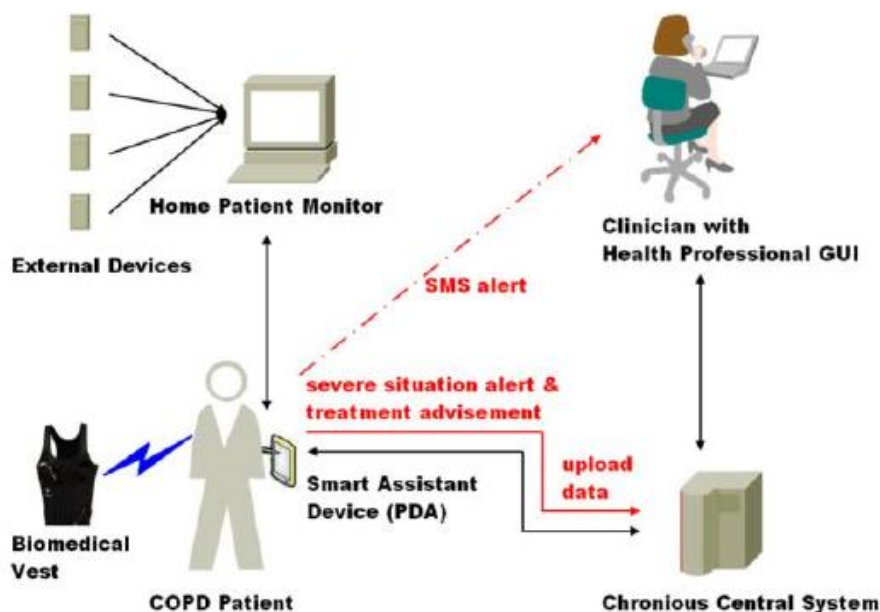


FIGURE 2.6 – Architecture du projet CHRONIOUS [CHRO 12]

2.4 Architecture générale pour le suivi de patient

Les projets étudiés mettent en évidence trois environnements distincts qui demeurent toutefois complémentaires. Le réseau corporel qui relie divers capteurs de mesure des signes vitaux à un équipement (contrôleur) d'assemblage des données, constitue le premier contexte. Le second est d'une part, composé de capteurs le plus souvent non-médicaux (capteurs de position, de température, de sécurité) et d'autre part, de l'ensemble des objets communicants du quotidien. Nous qualifions cet environnement de réseaux local tel que présenté à la figure 2.7. Enfin, le dernier contexte nommé réseaux distant, comprend les outils nécessaires pour le suivi en tout lieu. Ce contexte prend en compte, aussi bien la mobilité du patients que les exigences de stockage et d'accès à distance.

Une description plus en détail de la figure 2.7, permettra de ressortir la particularité de chaque contexte en terme d'outils et de technologies déployés.

2.4.1 Les caractéristiques des technologies exploitées

Le matériel et les outils propres à chacun des contextes, s'accordent avec un ensemble de techniques et de standards de communication bien précis.

Le contexte réseau corporel : Très orienté communications sans fil de courte portée, il repose principalement sur les normes ZigBee avec une portée maximum d'environ 10 mètres, Bluetooth qui oscille entre 10 et 100 mètres et les puces RFID.

Le contexte réseau local : En plus des technologies Bluetooth et ZigBee, ce contexte fait appel aux standards WiFi, UWB, GSM, GPRS, UMTS, LTE pour les besoins d'accès et de communications à longue distance.

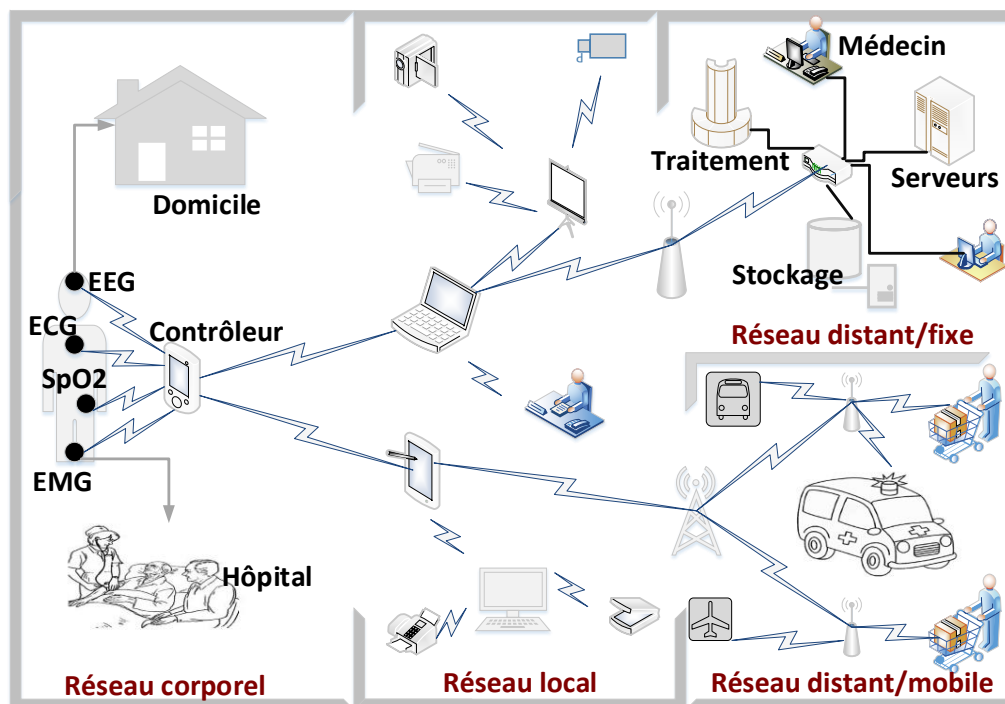


FIGURE 2.7 – Architecture et contextes du suivi de patient

Le contexte réseau distant : Dans ce contexte, les normes de communication orientées longue distance sont les plus sollicitées. Ainsi, la plupart des projets tenant compte de la mobilité du patient, optent pour les réseaux LTE, UMTS, WiMax associés au standard GPS.

Dans le tableau 2.1, nous faisons un récapitulatif des réseaux et standards impliqués dans les communications à caractère sanitaire.

Ce tableau offre une base et des éléments d'appréciation de chaque standard en terme de débit et de portée. Des évolutions dans l'utilisation des technologies sont également notables avec le passage de la 2G à la 4G, après franchissement de l'étape de la 3G. Le constat le plus essentiel, c'est de s'apercevoir que ces changements (2G à la 4G) sont suscités par le besoin de services plus diversifiés et plus exigeants. A titre d'exemple, le désir d'applications multimédias à été déterminant dans l'avènement des réseaux 3G et 4G. Toutefois, ces évolutions et cette diversité de standards ne semblent pas suffisantes pour garantir une assistance à la personne en tous lieux. Aussi, dans les projets e-santé, d'énormes difficultés apparaissent communément dans la phase du déploiement de ces technologies.

Cas particulier des réseaux filaires : Les réseaux filaires proposent les débits les plus élevés et les plus stables excédant souvent les 100 Mb/s. Basés sur les câbles, ils trouvent leur place dans les contextes de réseau local et celui de réseau distant fixe. Le réseau filaire occupe alors une place indéniable dans les architectures de communication consacrées aux systèmes de santé. Cependant, l'essor des réseaux sans fil, avec le déploiement d'équipements moins encombrants ou moins invasifs, améliore considérablement le confort et la mobilité du patient suivi. Dans ce travail de thèse, nous nous intéressons exclusivement aux problématiques des réseaux sans fil.

Nom	Standard	Débit théorique	Portée Max (m)	Fréquence (GHz)
RFID	ISO 10536 ; 14443	106 Kb/s	3 m	-
Bluetooth	IEEE 802.15.1	750 Kb/s	10 m	2,4
UWB	IEEE 802.15.3	≈ 50 Mb/s	> 10 m	-
Zigbee	IEEE 802.15.4	250 Kb/s	10 m	2,4
ZigBee	IEEE 802.15.4a	20 Kb/s	75 m	0,9
WiFi	IEEE 802.11b	11 Mb/s	> 100 m	2,4
WiFi	IEEE	54 Mb/s	≈ 30 m	5,5
WiFi	IEEE 802.11g	54 Mb/s	≈ 100 m	2,4
WiFi	IEEE 802.11n	320 Mb/s	≈ 30 m	≈ 2,4 et 5,5
WiMAX	IEEE 802.16	70 Mb/s	50 km	2-11
2G	GSM	9,6 kp/s	500 m à 10 km	0,9 et 1,8
2.5G	GPRS	48 kp/s	≈ 10 km	0,9 et 1,8
2.75G	EDGE	171 kb/s	≈ 10 km	0,9 et 1,8
3G	UMTS	384 Kb/s	< 10 km	1,885-2,025 ; 2,11-2,2
4G	LTE	5-75 Mb/s	< 9 km	0,8 et 2,6

TABLE 2.1 – Les standards réseaux sans fil

2.4.2 Analyse des problèmes et limites

Les données de santé présentent des caractéristiques variables. Chaque type d'information est lié à des contraintes précises et exige des ressources adaptées. Ainsi, la transmission d'une donnée de santé multimédia en temps-réel, nécessitera un service réseaux à caractère haut-débit. A titre d'exemple, pendant qu'une information de type texte se contentera d'un réseau 2G, la transmission de la vidéo exigera les réseaux 3G et 4G. Il est alors primordial de signaler que les performances ainsi demandées, reposent sur un ensemble de critères dont la puissance d'émission et la largeur de la bande. Pour garantir une bonne réception à plus de 15 Km avec le WiMAX par exemple, il faudra émettre avec suffisamment de puissance. Il est aussi intéressant de noter que le débit réel dépend de nombreux facteurs tels que la distance entre l'utilisateur et la station de base ou encore la topographie du lieu. Ainsi, les débits théoriques annoncés dans le tableau 2.1 sont loin d'être atteints avec une portée très approximative et une qualité de service qui laisse à désirer. Aussi, les réseaux qualifiés de performants en terme de débit tels que la LTE (4G) et l'UMTS (3G) ne couvrent pas toutes les zones. Ces technologies à haut débit sont aussi assujetties à un coût de déploiement et d'exploitation élevé. Au-delà des questions de débit, de disponibilité, de connectivité du réseau et des coûts signifiés, d'autres critères non moins importants influencent le choix d'une technologie de communication dans le domaine de la santé. Il s'agit de la gestion des interférences et des problèmes d'interopérabilité tels que révélés par l'analyse des projets de recherche. Réaliser un handover vertical est une première solution pour répondre aux exigences des applications en terme de portée, de débit, de disponibilité, etc.. Sa réalisation de manière optimisée et transparente pour l'utilisateur reste un sujet de recherche [Sind 14].

2.4.3 Solution envisagée

Dans la recherche d'une solution plus flexible capable de fournir des services plus adaptés et tenant compte des exigences des applications, la technologie Radio Cognitive qui appartient à la famille des réseaux intelligents semble incontournable. Elle pourrait être une solution efficace dans la gestion

des ressources. Elle s'avère également efficace pour la prise en compte des contraintes relatives à l'environnement de la radio telles que les interférences, la problématique d'interopérabilité et les changements de bandes de fréquences ou de technologie au besoin.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini la e-santé et ses composantes. Sur la base de ses applications, nous avons relevé ses apports et son intérêt dans les systèmes de santé. Les nombreux projets initiés et l'analyse de quelques uns, montrent l'émergence de cette discipline et les espoirs qu'elle suscite. L'architecture de communication générale inspirée de ces différents projets de recherche et résumée à la figure 2.7, met en exergue les interactions ainsi que les échanges de données médicales dans le cadre du suivi de patient. L'analyse des projets a eu également le mérite d'exposer les nombreux défis existants. Le prochain chapitre introduit la technologie Radio Cognitive qui est de plus en plus envisagée pour la levée de quelques verrous techniques. C'est un chapitre qui présentera les caractéristiques de cette technologie et illustrera les différentes opportunités qu'elle offre au domaine de l'informatique médicale.

Chapitre 3

Les réseaux Radio Cognitive : Fondements et opportunités

“Nous nous gavons des ressources, nous pompons tout ce que nous pouvons, en songeant déjà à la prochaine planète qu’il nous faudra coloniser pour survivre.”

Maxime Chattam

Sommaire

3.1	Introduction	22
3.2	Principe et modules Radio Cognitive	22
3.2.1	La norme IEEE 802.22 [GT_{norme}]	22
3.2.2	Principe de la Radio Cognitive	22
3.2.3	Le Cycle de la cognition	23
3.2.4	Architecture de la Radio Cognitive	24
3.2.5	Description des modules	24
3.2.6	Niveau d’intégration des modules aux modèles en couche	26
3.2.7	Les outils de l’intelligence Radio Cognitive	26
3.3	Les domaines d’application de la Radio Cognitive	28
3.3.1	Réseaux d’urgence	29
3.3.2	Réseaux pour les systèmes de santé	29
3.3.3	Réseaux militaires	30
3.4	Synthèse : Radio Cognitive et problématiques réseaux pour la santé	30
3.5	Conclusion	32

Résumé

Dans ce chapitre, nous décrivons le principe de la technologie Radio Cognitive et définissons ses modules. Nous énumérons quelques domaines intéressants pour son application dont particulièrement celui de la santé. Tout en examinant ses atouts, nous nous concentrons sur les problèmes que cette technologie, par son usage, pourrait adresser dans le processus du suivi de patient.

3.1 Introduction

La qualité de l'infrastructure réseau déployée fait assurément partie des facteurs clés de succès de l'informatique médicale. Pilier des échanges d'information, les réseaux de communication sont confrontés à de nouveaux challenges liés à l'hétérogénéité des objets communicants et à la diversité des services. Qu'ils soient pour la santé ou non, les services et les applications sont de plus en plus insatiables en ressources, pourtant limitées. Les interférences s'accroissent et le désir de mobilité des patients, particulièrement, nécessitent une connectivité en tout lieu. S'ajoute à ces contraintes, les questions subsistantes de performance ou de haut débit, primordiales pour certaines catégories de contenu médical tel que le multimédia. Ces différentes problématiques ont accru la demande de solutions de communication plus flexibles ou plus intelligentes, capables de prendre en compte les exigences des applications. La Radio Cognitive est vue à cet effet comme une technologie très prometteuse. Dans la suite de ce chapitre, le principe et les modules de cette technologie sont décrits en section 3.2. Ensuite, nous listons quelques domaines affichant un intérêt pour son utilisation en section 3.3. Enfin, en section 3.4, les problématiques visées par l'usage de la Radio Cognitive dans le domaine du suivi de patient sont exposées.

3.2 Principe et modules Radio Cognitive

La Radio Cognitive compte des atouts intéressants qui devraient satisfaire un ensemble de problématiques de la e-santé. Avec son concept d'intelligence dans les réseaux de communication, cette technologie pourrait contribuer à l'amélioration de la qualité des échanges d'informations médicales. En d'autres termes, elle devrait contribuer à offrir de meilleures performances aux applications de transmission de données de santé. Signalons qu'au vu de ses avantages, les initiatives se multiplient autour du développement de cette technologie, comme en témoigne les travaux initiés autour de la norme IEEE 802.22 sommairement présentée à la section 3.2.1.

3.2.1 La norme IEEE 802.22 [*GT_{norme}*]

La technologie des réseaux radio cognitive, bien que récente, s'appuie sur l'engouement autour de la norme 802.22. Le besoin d'un réseau régional étendu aux zones difficilement accessibles dénommé "Wireless Regional Area Networks(WRAN)" a suscité les travaux sur cette norme. Il faut préciser que le WRAN exploite les possibilités de la radio cognitive pour doter les régions rurales géographiquement éloignées, de la technologie sans fil, en utilisant de manière opportuniste les canaux de la télévision. Les détails sur le principe de la Radio Cognitive permettront de mieux cerner l'origine de toute l'espérance placée en cette technologie ou encore les raisons de tout l'espoir qu'elle suscite pour le domaine médical.

3.2.2 Principe de la Radio Cognitive

Avant tout, il est essentiel de rappeler que les bandes de fréquences sont classées en deux catégories à savoir les fréquences libres et les fréquences licenciées ou propriétaires. En général, les fréquences libres atteignent facilement l'état de saturation pendant que certaines plages de fréquences privées sont vacantes. En outre, sur la base de cette classification, le principe Radio Cognitive dénombre deux catégories d'utilisateurs que sont les primaires et les secondaires.

1. **Les utilisateurs Primaires (PU) :** Ils forment l'ensemble des utilisateurs licenciés ou encore prioritaires et qui possèdent un droit d'exploitation sur la fréquence donnée.

2. **Les utilisateurs secondaires (SU) :** Ils regroupent l'ensemble des utilisateurs ne jouissant d'aucun droit d'exploitation sur les bandes de fréquence, mais capables d'explorer les bandes de manière opportuniste, en prenant les mesures idoines permettant de réduire au maximum les risques d'un désagrément. Ils sont alors qualifiés d'utilisateurs radio cognitive.

Le principe se résume ainsi en une prouesse des utilisateurs secondaires à occuper de manière opportuniste le canal de communication (spectre) laissé vacant par les utilisateurs primaires tout en traitant efficacement les interférences et à le libérer dès lors qu'un utilisateur primaire manifeste le besoin de communication. Ce principe de la Radio Cognitive est fondé sur une capacité de raisonnement et une base de connaissance structurant les règles pour la prise de décision. Ainsi, la démarche et le fonctionnement d'un équipement Radio Cognitive intègrent le schéma classique du cycle de la cognition tel que présenté à la section 3.2.3.

3.2.3 Le Cycle de la cognition

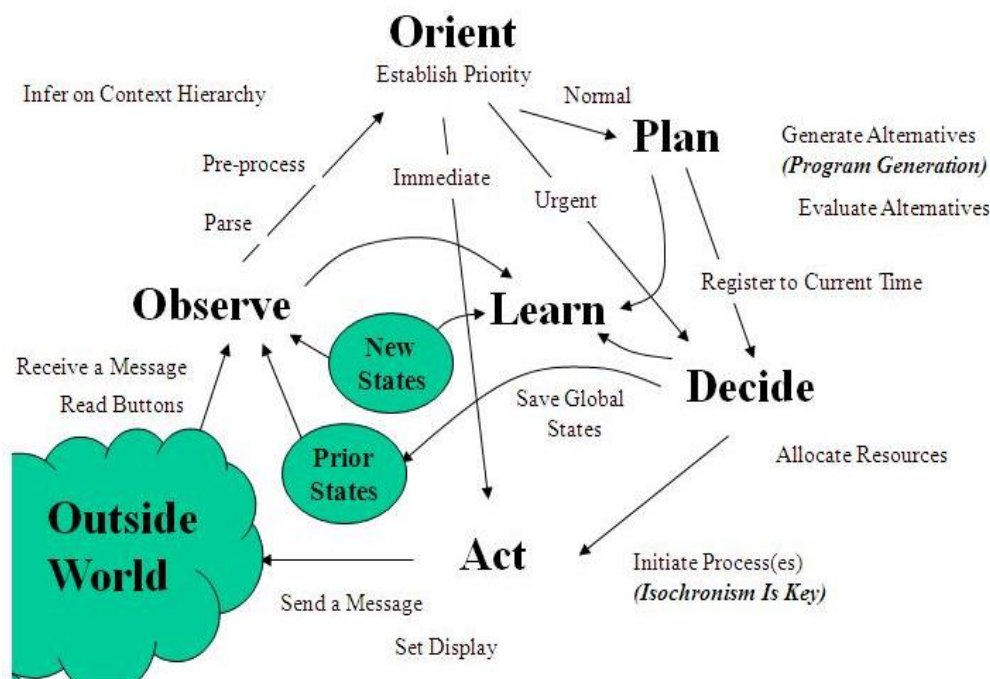


FIGURE 3.1 – Cycle de la cognition [Mito 06]

Le cycle de la cognition, dans ce cadre, définit les interactions qui existent entre les activités de l'équipement radio cognitive et son environnement. L'analyse ou l'observation, la planification des actions et la prise de décision constituent le fondement de ces activités telles que présentées à la figure 3.1. En somme, l'équipement radio cognitive émet tout en tenant compte du contexte et des contraintes des applications sous-jacentes. Ce qui constitue un facteur important dont peut tirer profit le domaine de la santé avec ses flux à différents niveaux d'urgence. Ce mécanisme est rendu possible grâce aux actions ou fonctions introduites par le cycle de la cognition. En effet, l'observation (Observe) de son environnement précède la prise de décision (Decide) la mieux adaptée. C'est un processus qui transite par une suite d'étapes entre autres, l'orientation (Orient), la classification

pour l'établissement de priorités, la planification (Plan) des activités et l'apprentissage (Learn) par expérience. Pour la mise en œuvre de ces actions, la Radio Cognitive compose avec deux entités essentielles que nous présentons par l'entremise de son architecture.

3.2.4 Architecture de la Radio Cognitive

La Radio Cognitive assemble deux composantes avec des particularités et des fonctionnalités distinctes. La première partie symbolisée sur la figure 3.2 par le **Radio logicielle**, est plus connue sous le terme de Software Defined Radio (SDR). C'est le composant matériel et logiciel doté des capacités d'auto-configuration, d'auto-programmation et d'auto-adaptation. Il réalise les traitements relatifs au filtrage, à la décimation, à la démodulation et au décodage du signal entre autres. Le second composant est consacré au développement de modules, symboles de l'intelligence (**Moteurs de l'intelligence**). Les moteurs d'analyse, de mesure, de raisonnement ou encore de prise de décision tels que présentés à la figure 3.2, constituent des exemples de fonctionnalités implémentées par les systèmes Radio Cognitive. L'intérêt d'une présentation aussi détaillée de ces propriétés est de démontrer toute la maturité de la Radio Cognitive à supporter la complexité et la diversité des flux engendrés par le domaine de la santé.

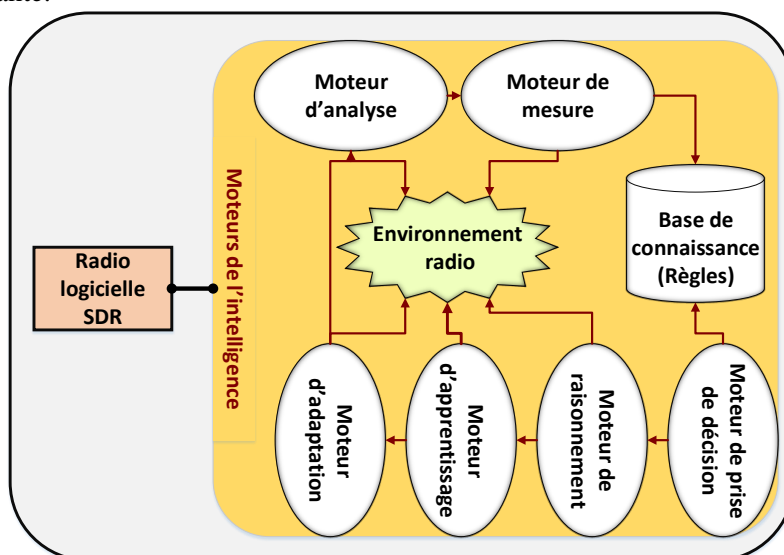


FIGURE 3.2 – Schéma de la Radio Cognitive

La connaissance et l'aptitude à prendre conscience de son environnement constituent particulièrement des facteurs pouvant simplifier la réalisation du suivi en tout lieu avec une prise en compte des contraintes inhérentes. La mise en œuvre de l'ensemble de ces propriétés prometteuses découle du développement et de l'implémentation d'un ensemble de modules dont certains font l'objet d'explicitation pour une plus grande compréhension.

3.2.5 Description des modules

Nous rappelons que les modules, tels que représentés à la figure 3.3, décrivent les fonctions implémentées par le moteur d'intelligence. Les modules indispensables dans un réseau Radio Cognitive et à l'origine de toute sa flexibilité sont ceux de la détection, du partage, de la prise de décision et de la mobilité. Une description plus en détail du rôle de ces modules, simplifiera leur compréhension.

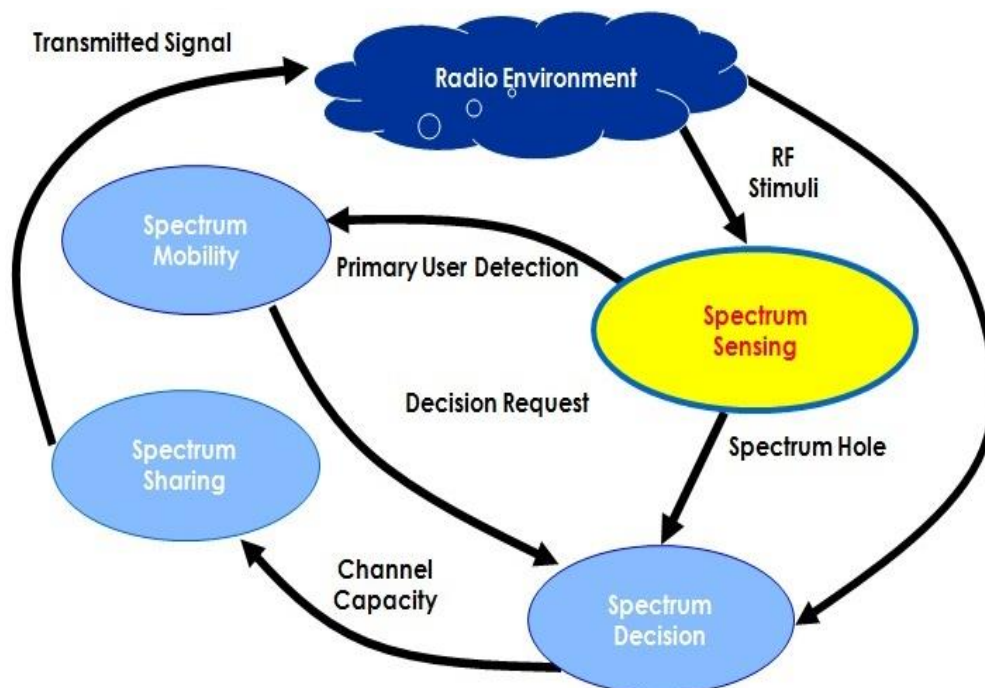


FIGURE 3.3 – Principaux modules de la Radio Cognitive [Aky1 09]

Le module sondage du spectre (Spectrum Sensing) : Il détermine la capacité à mesurer, scruter, apprendre et à se rendre compte des paramètres liés aux caractéristiques du canal radio. Les mesures fournissent des informations sur la disponibilité du spectre, la puissance de transmission, les interférences et le bruit dans l'environnement radio. L'intérêt de ce module dans le contexte des réseaux de communication de données de santé, réside dans ses attributs qui renseignent sur les valeurs portant sur la satisfaction des besoins des utilisateurs et des applications.

Le module prise de décision (Spectrum Decision) : La prise de décision est une dynamique reposant sur le choix du canal de communication approprié, justifiant la qualité de service requise pour les applications. La décision est motivée par les caractéristiques du canal et le type des utilisateurs (PU ou SU). En effet, l'exploration de l'environnement externe réalisée par le module de sondage, fournit les informations statistiques utiles pour décider sur quel canal envoyer les données de manière opportuniste.

Le module partage du spectre (Spectrum Sharing) : L'idée de partage du canal répond à l'exigence de synchronisation d'accès aux portions de bandes libres entre les utilisateurs. Cette fonction s'identifie à un gestionnaire de bande contrôlant et priorisant les accès. Le module devra disposer de cet effet de suffisamment d'informations ou de paramètres décrivant l'état du canal, les équipements ou les ressources en partage et cela concourt à la modélisation des critères de non perturbation.

Le module mobilité spectrale (Spectrum Mobility) : La mobilité renferme deux aspects distincts pris en compte par le module. La mobilité liée à la ressource spectrale et celle liée à l'utilisateur et par conséquent au terminal.

1. **La mobilité au niveau du spectre** : La mobilité spectrale traduit le fait que chaque émetteur/récepteur doit être capable de changer de fréquence si la portion de bande initialement occupée n'est plus disponible ou ne garantit plus la qualité de service désirée.
2. **La mobilité de l'utilisateur** : La mobilité d'un utilisateur, à l'image d'un patient mobile équipé d'un équipement Radio Cognitive, induit des franchissements de plusieurs cellules et cela est connu sous le terme de handover. Ces changements de cellules sans interruption de la conversation ou du transfert des données sont réalisés en conformité avec les fréquences libres disponibles dans la cellule de destination.

La présentation générale de ces fonctions témoigne des capacités particulières de la Radio Cognitive et confirme son aptitude à prendre en compte de nombreuses contraintes liées aux réseaux de communication pour la santé. De plus, dans la suite de ce travail de thèse, nous détaillerons encore plus le fonctionnement de certains de ces modules (Sensing, Sharing), pour le besoin de compréhension des améliorations à leur apporter. Pour donner plus d'informations sur le principe de la Radio Cognitive et sa faisabilité, nous présentons le niveau d'intégration de l'ensemble des modules dans la pile protocolaire à la section 3.2.6.

3.2.6 Niveau d'intégration des modules aux modèles en couche

Notons que la Radio Cognitive introduit de nouveaux concepts (Sondage, mobilité spectrale) qui se rattachent à différents niveaux des couches protocolaires (modèle OSI et modèle TCP/IP). Ainsi, pour les besoins de détection de bandes libres, le module Sondage (Spectrum Sensing) est implémenté au niveau de la couche Physique du modèle de référence. La fonction de gestion de la Mobilité spectrale (Spectrum handoff) Radio Cognitive, pour être efficace, s'étend sur les couches allant du niveau Physique à la couche Transport. Le module de synchronisation des accès au canal appelé module de Partage du spectre (Medium access) est associé aux couches Liaison et Physique et enfin le module de prise de Décision (Spectrum decision) couvre les couches Liaison et Réseau tel que cela est décrit à la figure 3.4. Par conséquent, les différents modules de la figure 3.3 sont donc ajoutés à divers niveaux et selon le besoin à satisfaire (sondage, partage, mobilité). Le besoin de communication une fois exprimé par les applications, déclenche l'activité des différents modules (Radio Cognitive) et cette activité se concentre autour du module de prise de Décision. Ainsi, le module de prise de Décision qui est mis à contribution à partir de la couche Réseau et qui reçoit les informations d'initiation de la communication du niveau supérieur (couches Application et Transport), s'appuie sur le module Sondage (couche Physique) afin de proposer la ressource (canal) appropriée pour la transmission (accès-transmission). La notification des changements de bande de fréquence lorsque les caractéristiques de la bande occupée l'exige est également mise en exergue avec les liaisons établies principalement entre les modules Sondage, Mobilité (spectrum handoff) et prise de Décision. Par ailleurs, dans cette configuration, il est important de noter par exemple que les besoins des applications sont évalués au niveau applicatif afin de prendre en compte les aspects qualité de service de bout-en-bout qui incombent à la couche Transport. De plus, on note une possibilité de contrôle cross-layer de l'efficacité énergétique au niveau de l'ensemble de la pile protocolaire.

3.2.7 Les outils de l'intelligence Radio Cognitive

Les fonctions contribuant à la flexibilité dans les réseaux Radio Cognitive sont en grande partie inspirées des techniques de l'apprentissage artificiel et de la théorie des jeux. Ces outils mathématiques permettent en général de modéliser l'environnement radio en déterminant les variables et en élaborant les règles et les stratégies qui mènent à la prise de décision. Nous donnons quelques exemples de

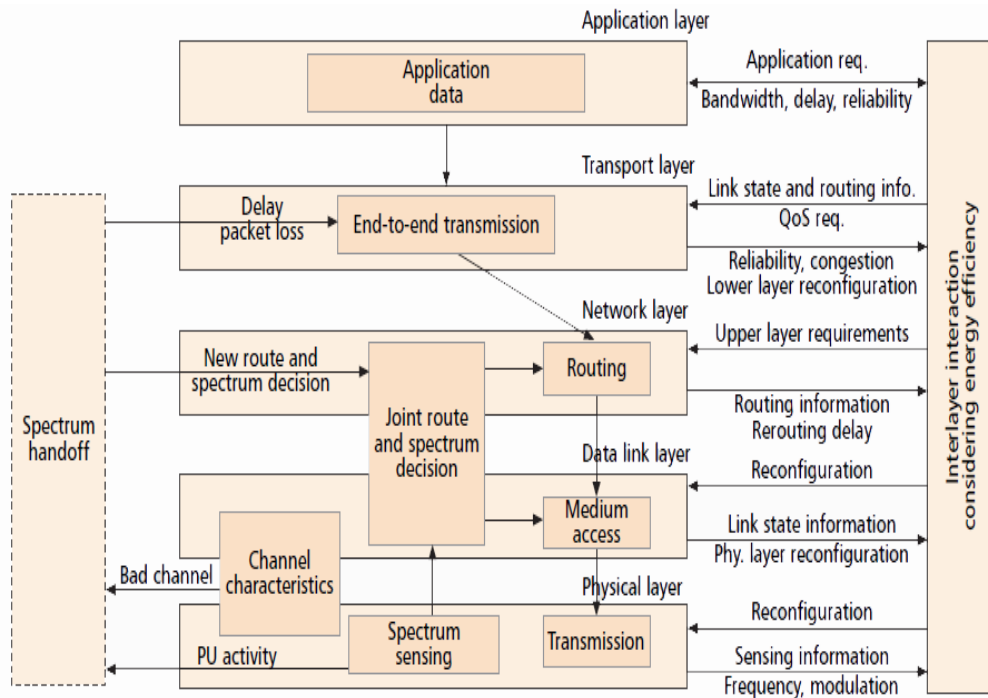


FIGURE 3.4 – Modules Radio Cognitive et leur adjonction aux couches du modèle OSI [Aky1 06]

travaux illustrant les méthodes de modélisation de l'environnement Radio Cognitive relatives à ces deux approches.

L'apprentissage artificiel L'apprentissage se définit selon Cornuéjols [Corn 10] comme une notion englobant toute méthode permettant de construire un modèle de la réalité à partir de données, soit en l'améliorant partiellement, soit en le créant complètement. De cette définition, il ressort les possibilités de modélisation de l'environnement, de renforcement des connaissances et d'amélioration ou d'optimisation du système. En d'autres termes et dans le cadre actuel, l'apprentissage repose sur l'acquisition d'expérience, les connaissances mémorisées qui assurent une efficacité au moteur de raisonnement et de prise de décision dans le temps. Cela suppose donc un entraînement préalable sur des données ou un échantillon valide et suffisant. L'apprentissage constitue ainsi un appui important pour les équipements Radio Cognitive dans leurs actions de planification, de prédiction et donc d'anticipation. A titre d'exemple de travaux faisant usage des techniques d'apprentissage pour l'amélioration des modules de la cognition, on note l'algorithme de sondage coopératif du spectre introduit par Thilina et al. [Thili 13]. Ainsi, pour améliorer le processus de détection de bandes libres, les techniques de classification par apprentissage sont implémentées. Dans cette même veine, un modèle global de prise de décision axé sur l'apprentissage est proposé par Wu et al. [WuYu 10]. Ces travaux mettent en avant un scénario de communication Radio Cognitive qui se renforce par l'apprentissage. Ce scénario est basé sur la prise de décision par expérience et la déduction des tendances à travers une implémentation de la méthode des moindres carrés. Les résultats de leurs simulations démontrent une amélioration des performances d'ensemble par apprentissage d'instances de communications.

Sur la base de notre analyse de la littérature, nous constatons que les techniques d'apprentissage sont assez intéressantes pour la modélisation, le renforcement des modules de sondage spectral et de prise

de décision. Cependant, certains aspects du moteur décisionnel à l'image de ceux impliquant de fortes interactions, sont mieux formalisés par les méthodes de la théorie des jeux tel que résumé et soutenu avec des références à quelques travaux au paragraphe suivant.

La théorie des jeux La théorie des jeux selon Rida et al. [Rida 13], vise à analyser des situations d'interaction stratégiques où plusieurs entités (agents) sont porteuses de caractéristiques (actions) qui les affectent mutuellement. L'objectif étant d'arriver à modéliser le comportement rationnel et stratégique des décideurs afin que ceux-ci prennent leurs décisions en fonction du comportement des autres agents ou entités. L'utilité de la théorie des jeux consiste donc à développer des outils pour analyser ces interactions. Des travaux de recherche dans le contexte de la Radio Cognitive s'appuient également sur cette théorie afin de mieux représenter les contraintes du partage de ressources. A titre d'exemples, les travaux de Mohammadian et al. [Moha 10], posent le problème de partage dynamique du spectre. Plusieurs utilisateurs (Radio Cognitive) sont mis en concurrence de manière non-coopérative pour la demande d'accès au spectre. Cette situation est formulée comme un jeu de marché avec une fonction-revenue dépendante des exigences et des besoins. Par ailleurs, Manna et al. [Mann 12] exposent un scénario d'utilisation de la théorie des jeux pour le partage du spectre dans les bandes non licenciées. Une fonction-variable multi-paiement est utilisée pour illustrer le processus de réalisation de l'équilibre de Nash¹ en faisant varier les différents schémas de modulation et la puissance de transmission des utilisateurs non-coopératifs partageant le même spectre. Aussi, certaines études telles que celles réalisées par Chungang et al. [Chun 13], examinent le comportement interactif et les stratégies de prise de décision entre les utilisateurs Radio Cognitive et les utilisateurs licenciés, afin de résoudre les questions de performances de bout en bout. D'autres recherches également basées sur la théorie des jeux, modélisent l'efficacité énergétique pour les équipements [Kaiw 12] ou encore la gestion des interférences [Ming 11] induites par le partage des ressources.

On peut alors constater que les algorithmes proposés en général par la théorie des jeux sont assez orientés vers le choix de la stratégie la plus appropriée dans l'optimisation du partage du spectre. Cette dernière approche, en définitive permet de renforcer les performances des modules Radio Cognitive surtout en présence de fortes contentions et de grandes interactions entre les utilisateurs tel que cela est relevé par les travaux susmentionnés.

La théorie des jeux et l'apprentissage artificiel restent les outils les plus utilisés et les plus connus dans le processus d'amélioration des services ou des modules Radio Cognitive. Ils représentent donc les principaux facteurs de l'intelligence et de la flexibilité dont pourrait bénéficier assurément les réseaux dédiés aux services de santé. Toutefois, il n'en demeure pas moins que d'autres outils tels que le Grey Model (GM) ou encore le Model Predictive Control (MPC) sont souvent sollicités. Dans les prochains chapitres, une définition de ces derniers outils sera donnée et leur intérêt fera également l'objet d'explications détaillées. Mais avant, il nous semble essentiel d'avoir une idée du champ d'application actuel de la Radio Cognitive au vu de toutes ses capacités et du caractère extensible, adaptable de ses modules.

3.3 Les domaines d'application de la Radio Cognitive

En plus du domaine de la santé dont nous faisons largement allusion et qui constitue le principal objectif de cette thèse, les réseaux Radio Cognitive semblent bien adaptés pour les systèmes de

1. L'équilibre de Nash consiste en une combinaison de choix stratégiques où chaque acteur cherche à anticiper correctement les choix des autres en théorie des jeux.

transmission militaire et les communications en situation d'urgence.

3.3.1 Réseaux d'urgence

Les réseaux d'urgence donnent à un usager en difficulté, une population ou aux services de secours la possibilité d'établir des communications. La mise en place de ces réseaux pourrait résulter du déclenchement d'une catastrophe naturelle qui conduirait à un dysfonctionnement total ou partiel des réseaux traditionnels. Elle pourrait être aussi motivée par la volonté d'extension des postes d'appel d'urgence créés autour de l'environnement ou des axes routiers. Dans les deux cas de figure, la Radio Cognitive pourrait jouer un rôle essentiel. Grâce au caractère flexible de ses modules, un équipement Radio Cognitive sera capable d'explorer une large gamme de technologie (bandes GSM, WiFi, TV), de détecter des bandes afin de réaliser ses communications. La capacité à parcourir différentes technologies augmente considérablement les possibilités de communication. Les réseaux d'urgence constituent l'un des scénarios exposés par le projet LICCoRNe [LICo 14]. Financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) en France, ce projet se propose d'étudier la transmission de données, l'ingénierie de services qui inclut le scénario des transmissions d'urgence avec les réseaux radio cognitive. Dans cette même veine, Kaiwang et al. [Khay 13], proposent les réseaux ad hoc Radio Cognitive (CRAHN : Cognitive Radio Ad Hoc Network) comme base des communications dans la gestion des désastres. Dans les travaux de Mubashir et al. [Muba 10], un cadre de déploiement du réseaux Radio Cognitive en réponse à une catastrophe qui endommagerait totalement ou en partie, le réseaux traditionnel est défini. L'architecture proposée a pour objectif dans un tel contexte d'aider à la restauration du réseaux affecté et de rétablir les connexions. Il est alors évident que les chercheurs s'orientent de plus en plus vers cette technologie pour ses opportunités et sa capacité à apporter des réponses aux questions de communication en cas d'urgence. Le parcours de quelques contributions à l'image de celles exposées par Gorcin et al. [Gorc 08] ou encore Onem et al. [Onem 13], apporte plus de détails sur les communications dans des contextes difficiles et démontre l'intérêt d'un usage de la Radio Cognitive en pareilles circonstances. Toutefois, l'usage possible de la Radio Cognitive dans les réseaux d'urgence reste une piste encore sous-explorée et aux perspectives de recherche énormes. Ces perspectives prometteuses semblent plus urgentes ou encore plus pressées pour le domaine de la santé et la sous-section 3.3.2 permettra d'en avoir un premier aperçu.

3.3.2 Réseaux pour les systèmes de santé

Les différents modules et leurs atouts respectifs évoqués dans la section 3.2.5 apportent des évolutions notables dans les réseaux en général. De même, ils pourraient fournir des éléments de réponse aux contraintes actuelles d'implémentation des technologies de communication pour la santé. Ces contraintes relatives aux aspects de connectivité, de gestion des interférences et aux performances seront résumées à la section 3.4. Aussi, il est important d'indiquer que le chapitre suivant sera largement consacré aux travaux s'intéressant à l'application de la Radio Cognitive au domaine de la santé. Par ailleurs, la sécurité dans les réseaux de capteurs médicaux, la protection des personnes face aux effets des ondes électromagnétiques constituent des problématiques additionnelles auxquelles la Radio Cognitive pourrait apporter des réponses. A défaut de la cryptographie qui semble computationnellement coûteuse pour les réseaux de capteurs médicaux, les changements de bande de fréquence supportés par la Radio Cognitive pourraient aider à endiguer certaines formes d'attaques à l'image des écoutes du type « man in the middle ». D'autre part, même si les effets des ondes électromagnétiques sur la santé n'ont pas encore été clairement démontrés, il est tout de même judicieux d'adopter des mécanismes pouvant limiter les expositions à ces radiofréquences. L'impact des ondes radio sur la

personne, pourrait ainsi être réduit grâce au module de prise de décision Radio Cognitive. En effet, avec la connaissance de son environnement, un équipement doté des capacités Radio Cognitive est à mesure d'adopter des stratégies telles que l'adaptation automatique de la puissance de transmission, le changement de canal ou encore l'arrêt temporaire de toute diffusion d'onde. La gestion et le contrôle des ondes électromagnétiques à l'aide des modules Radio Cognitive constituent alors des perspectives intéressantes de recherche. Au-delà de l'effet des ondes, on notera à la section 3.3.3 que cette technologie intéresse fortement le domaine militaire.

3.3.3 Réseaux militaires

L'armée américaine à travers l'importance des moyens consacrés à la recherche et au développement de cette technologie, atteste du potentiel de la Radio Cognitive, dont le déploiement s'accorderait avec leurs besoins de communications militaires innovantes. A cet effet, un projet important initié au début des années 2000 par l'agence pour les projets de recherche avancée de défense dénommé DARPA XG (Defense Advance Research Projects Agency neXt Generation) [DARPA] implémente les techniques d'utilisation opportuniste du spectre. De plus, le projet DARPA rajoute aux modules radio cognitive, un mécanisme de contrôle de haut niveaux assurant la traçabilité des communications de manière autonome.

Ainsi, les réseaux Radio Cognitive déployés dans les zones de combat pourront aider à l'évitement des écoutes, à déjouer les interceptions de communication et donc à limiter l'espionnage de guerre. En outre, lorsque certaines fréquences sont brouillées, le dispositif Radio Cognitive peut activer le sondage afin de trouver des bandes de fréquence d'accès de rechange. En somme, la Radio Cognitive dans le domaine militaire constitue probablement un moyen pour la détection d'éventuelles intrusions qui permet de lutter contre le piratage grâce à ses fonctions d'intelligence.

Sur la base de toutes ces évolutions et de l'intérêt grandissant de son usage dans divers domaines, on peut affirmer que cette technologie prendra une place importante dans les réseaux du futur et devra faire face aux contextes de communication les plus complexes. Alors, une convergence de vue sur la capacité de la Radio Cognitive à résoudre les problématiques actuelles de communication du domaine de la santé se dessine. Pour être encore plus précis, nous faisons une synthèse des problématiques de la santé susceptibles d'avoir des réponses satisfaisantes à travers les réseaux Radio Cognitives.

3.4 Synthèse : Radio Cognitive et problématiques réseaux pour la santé

Ce travail de synthèse identifie clairement les atouts de la Radio Cognitive afin de les associer à différentes questions soulevées par le processus du suivi de patient, principal but dans cette thèse. Plus précisément, se fondant sur les modules Radio Cognitive évoqués dans ce chapitre, cette synthèse permet de faire un état des problématiques adressables dans le domaine de la santé.

La question de la gestion des interférences : Le module de prise de décision est alors sollicité dans ce contexte. En effet, en fonction du niveau d'interférence mesuré ou détecté, ce module choisira la stratégie qui limite les effets. Le changement de canal et l'adaptation automatique de la puissance d'émission constituent des stratégies possibles. Une stratégie étant associée à une règle ou un ensemble de règles déclencheurs. Notons que la règle ici est une fonction du module (prise de décision) décrivant l'ensemble des contraintes et les actions à entreprendre selon les conditions préétablies.

La problématique de la disponibilité du réseau : La haute disponibilité définit la capacité à assurer une connectivité en tout lieu. Ce critère est intrinsèquement lié à la disponibilité des canaux de communication et à l'aptitude à corriger les discontinuités de connexion sans préjudice majeur pour les applications. C'est un principe très important dans le processus de suivi de patient en tout lieu. Ainsi, le module Sondage et son caractère multi-technologies va permettre de déceler des bandes libres afin de maintenir la connexion en toute circonstance. Associé à des outils statistiques, ce module peut alors permettre de développer des mécanismes d'anticipation pour assurer la connectivité dans un contexte d'instabilité dans l'occupation de bande. C'est le cas bien entendu d'un patient en mobilité.

Les solutions à faible coût et efficacité énergétique : L'utilisation de la Radio Cognitive devra permettre de réduire considérablement les coûts de communication par l'exploitation opportuniste du spectre. En effet, le coût d'accès au spectre fréquentiel est quasiment nul car ne nécessitant aucun paiement de licence particulière. De même, le coût des traitements et par conséquent, la consommation énergétique des applications dépendra des algorithmes implémentés. Ce qui constitue un problème commun à toutes les solutions technologiques et fait l'objet de divers travaux de recherche dans le domaine de la Radio Cognitive [Trip 13][PoKa 12]. Cette problématique de la Radio Cognitive intègre donc le champ de la recherche actuelle sur les questions d'algorithmes à faible coût. Les besoins les plus pressants à ce sujet dans le domaine de la santé demeurent ceux liés aux capteurs médicaux et aux équipements de suivi de patient mobile qui disposent d'une faible autonomie énergétique. L'intelligence développée par les modules de la Radio Cognitive est alors un facteur très important qui pourrait contribuer à l'élaboration de règles favorisant l'économie d'énergie.

Les solutions proposées pour le suivi et le confort du patient : A la suite des contraintes que nous venons d'énumérer et susceptibles d'être prises en compte par les modules de la Radio Cognitive, la question du confort du patient suivi demeure entière. Le processus de suivi de patient s'inscrit dans une démarche qui doit être avant tout acceptée par le bénéficiaire et le confort en est la clé. A ce propos, plus une solution est confortable, plus elle a des chances d'être acceptée et adoptée dans la vie quotidienne. L'un des critères de mesure de cette commodité est assurément le caractère non-invasif des capteurs. La Radio Cognitive, par l'action du module Sondage offre la possibilité d'une détection parallèle des signes vitaux et des signaux de communication tel que nous l'expliquerons à travers des référencements à quelques travaux de recherche dans le prochain chapitre. C'est un mécanisme qui devra permettre évidemment de réduire le nombre de capteurs utilisés. D'autres fonctions avancées dans le traitement et d'analyse des signaux pourraient se substituer aux capteurs de localisation, d'identification des objets à titre d'exemple.

Cette énumération de diverses problématiques suivie de l'analyse des opportunités de résolution offertes par la Radio Cognitive permet de s'apercevoir de l'étendue du champ de recherche à explorer. Dans cette thèse, nous nous intéressons principalement au problème de disponibilité du réseau Radio Cognitive pour les applications médicales, à la question de gestion des interférences et nous terminons par une analyse des dispositions à prendre afin de garantir un niveau de performance (QoS) acceptable. Apporter un début de réponse à ces questions semble primordial pour le processus de validation du concept de réseaux médicaux Radio Cognitive. Par ailleurs, le critère de confort dont la mise en œuvre dans ce contexte fait largement appel au domaine du traitement du signal, bien que constituant une perspective de recherche intéressante, n'entre pas dans le cadre de ce travail de thèse. Enfin, l'efficacité énergétique qui constitue une contrainte essentielle à prendre en compte dans les réseaux e-santé Radio Cognitive est traitée dans le cadre d'une autre thèse et n'est donc pas abordée dans ce

travail.

3.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de dépeindre les principaux modules de la Radio Cognitive et d'expliquer leurs fonctionnements d'une manière plus générale. Nous avons dénombré les atouts de cette technologie et mis en exergue sa capacité à construire des processus autour de l'apprentissage symbolique, les statistiques et divers théories décisionnelles qui balisent son raisonnement. L'intérêt grandissant de l'usage de la Radio Cognitive dans plusieurs domaines, notamment les réseaux d'urgence et le terrain militaire à été mis en évidence. Nous avons également procédé au rappel de quelques opportunités offertes ainsi que les verrous susceptibles d'être levés dans le cadre des communications de données de santé, grâce à sa gestion intelligente des ressources réseaux. Cette dernière assertion, constituant la problématique centrale de la présente thèse, sera développée dans la suite du manuscrit. Par conséquent, l'analyse de divers travaux de recherche traitant des innovations et de l'apport de la Radio Cognitive dans le domaine de la santé, se décline comme l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 4

Application de la technologie Radio Cognitive au domaine de la e-santé

*“Nous sommes ce que nous pensons.
Tout ce que nous sommes résulte de nos pensées.
Avec nos pensées, nous bâtissons notre monde.”*

Bouddha

Sommaire

4.1	Introduction	34
4.2	Évolution des réseaux et intérêt de la Radio Cognitive en e-santé	34
4.3	La Radio Cognitive dans les infrastructures réseaux de e-santé	35
4.4	Présentation des contextes de suivi du patient et travaux inhérents	37
4.4.1	Les réseaux de capteurs e-santé Radio Cognitive	39
4.4.2	Les travaux évoquant les aspects de suivi du patient à l'hôpital	42
4.4.3	Les travaux testant l'hypothèse de mobilité du patient	44
4.4.4	Cas des réseaux Ad Hoc Radio Cognitive pour la e-santé	45
4.5	Quelques cas particuliers	45
4.5.1	Le sondage de bandes libres et identification de signes vitaux	46
4.5.2	Le sondage de bandes libres et déduction d'informations utiles	46
4.6	La Radio Cognitive dans les projets de télé-médecine	47
4.7	Conclusion	49

Résumé

Dans ce chapitre, nous conduisons une étude assez représentative des travaux de recherche et des architectures de communication pour la santé s'appuyant sur la technologie Radio Cognitive. Les verrous susceptibles d'être levés en e-santé selon les propositions dans la littérature sont mis en exergue. L'intérêt particulier dans ce chapitre, est de montrer les avantages de cette technologie dans le domaine médical tout en affichant par la même occasion l'importance des défis encore à relever.

4.1 Introduction

L'analyse des projets nous a permis de relever une très forte propension à l'utilisation des bandes Industrielles, Scientifiques et Médicales (ISM) ainsi que les bandes GSM dans une moindre proportion, dans les architectures de communication dédiées au domaine de la e-santé. Les fréquences ISM, qui sont à usage libre suivant le principe de régulation, sont de plus en plus saturées. A l'évidence, elles ne peuvent plus faire face à l'accroissement actuel ou à venir des échanges et plus particulièrement aux transferts de données de santé. Les standards IEEE 802.11b, IEEE 802.11a, IEEE 802.11g, Bluetooth, ZigBee entre autres, sont les plus usuels dans les bandes ISM. Les difficultés majeures relevées avec ces normes, résident en leur inefficacité à garantir la qualité de service, leur gestion approximative des interférences et surtout la question essentielle de leur coexistence radio (logicielle et matérielle) ou leur co-utilisation, de manière transparente pour l'utilisateur. Toutes ces raisons conduisent à renforcer l'engouement perceptible de l'usage de la Radio Cognitive pour les communications de santé. Ce chapitre dresse alors un état de la réflexion et des travaux de recherche sur l'usage de la technologie Radio Cognitive dans le domaine de la santé. A cet effet, nous faisons d'abord un rappel des problèmes persistants malgré les évolutions technologiques (réseau) à la section 4.2. A la section 4.3, nous évoquons quelques travaux explorant l'idée d'infrastructure Radio Cognitive et présentons le niveau d'intégration des modules de cette technologie. Ensuite, nous faisons une classification des travaux de recherche en fonction de différents contextes de suivi du patient identifié à la section 4.4. La section 4.5, nous permet de relever quelques attributs ou cas particuliers d'activités favorisées par l'exploitation des résultats du sondage. Enfin, nous analysons l'apport de la Radio Cognitive dans les plateformes WBAN au niveau de la partie 4.6 avant de conclure le chapitre à la section 4.7.

4.2 Évolution des réseaux et intérêt de la Radio Cognitive en e-santé

Bien que la tendance semble être la course aux technologies GSM et leur perpétuelle évolution, avec les différentes générations successives, à savoir la 1G, 2G, 3G, 4G, 5G, etc., les problèmes de performance restent entiers avec ces dernières dans les transmissions de données en télé-médecine. En effet, même si les dernières générations de réseaux (3G, 4G) offrent des débits assez satisfaisants, la disparité des connexions réseaux à certains endroits (intérieur des bâtiments, zones reculées, etc.) et l'instabilité des débits offerts constituent encore des défis à relever. L'infrastructure et les protocoles de ces réseaux traditionnels n'ont pas été assez élaborés pour prendre en compte les contraintes de l'environnement afin de s'y adapter en temps réel. L'allocation de la largeur de bande une fois fixée en début de communication, ne peut faire l'objet d'un réajustement quelle que soit la durée de la transmission courante et le niveau de détérioration de la qualité de service. Ce qui devrait causer d'énormes préjudices aux applications de télé-assistance, de télé-consultation, de télé-monitoring ou encore de télé-diagnostic qui prendraient des heures et nécessiteraient des interactions en temps-réel. Ces bandes GSM demeurent également coûteuses pour toute la quantité de données produites et à transmettre en e-santé ; d'où cet optimisme placé dans la Radio Cognitive dont nous faisons une revue des développements en terme d'idées, de propositions et de techniques implémentées dans la littérature qui soutiennent l'aspiration à venir à bout de ces diverses problématiques réseaux. Nous organisons à cet effet cette revue de la littérature avec un accent particulier sur deux aspects importants. Il s'agit d'une part, du niveau d'introduction de la Radio Cognitive dans la chaîne de communication e-santé avec les problématiques essentielles abordées et d'autre part, des différents contextes pour lesquels cette technologie est envisagée. Enfin, sur la base des questions traitées, nous identifions les contributions ayant pris en compte les critères importants tels que la fiabilité, la disponibilité et la qualité de service.

4.3 La Radio Cognitive dans les infrastructures réseaux de e-santé

Une proposition d'infrastructure Radio Cognitive pour la santé a été faite par Shan et al. [Shan 10] avec les fonctions cognitive principalement implémentées au niveau des stations de base (nœuds re-lais). Cette proposition a pour objectif d'évaluer les performances des réseaux Radio Cognitive en terme d'aptitude à supporter les transmissions de données médicales. Ainsi, l'infrastructure réseau Radio Cognitive envisagée se charge du sondage du spectre afin de détecter les bandes libres. La classification, par priorité du contenu à transmettre, suggérée, les stratégies de partage de ressources mises en œuvre, augurent d'une certaine réduction des délais de transmission. Techniquement, l'idée introduit le déploiement de stations de base Radio Cognitive couvrant un ensemble d'équipements médicaux. Les équipements médicaux chargés de la collecte ou de l'agrégation des données de santé à partir de diverses sources ou capteurs (WBAN : Wireless Body Area Network [Nazi 11], WPAN : Wireless Personal Area Network [KimH 08]) sont dotés de deux interfaces. L'une est consacrée évidemment à cette collecte d'indices sur les signes vitaux et l'autre est dédiée aux échanges d'informations avec les stations de base Radio Cognitive. Les données assemblées sont alors transmises vers les centres de traitement et de stockage par l'intermédiaire des stations de base Radio Cognitive qui mettent pour rappel, à contribution le module du sondage du spectre afin d'allouer les bandes libres appropriées. Il faudra retenir qu'au delà des aspects sondage et prise de décision spectrale, ce travail montre une classification possible des contenus avec d'une part des transmissions d'urgence sensibles aux délais et aux pertes de paquets et d'autre part des transmissions périodiques moins exigeantes. La transmission des données d'urgence, créditée de la plus forte priorité, bénéficie immédiatement de l'accès au canal si nécessaire. Notons tout de même que dans cet article de recherche, les exigences en terme de contenu des échanges en temps-réel et la complexité des transmissions de données de type multimédia n'ont pas été assez étudiées. De même, les questions de disponibilité et de fiabilité du réseau qui se rattachent à l'efficacité du module Sondage n'ont pas été traitées. La problématique essentielle abordée à travers cette proposition d'architecture de communication Radio Cognitive concerne les questions de partage des canaux.

La seconde proposition importante que nous mentionnons dans ce contexte d'infrastructure Radio Cognitive dédiée aux applications de santé est issue des travaux de Ziqian et al. [Ziqi 11]. Cette architecture plus détaillée qui décrit les échanges entre les équipements en présence implémente exclusivement la Radio Cognitive au niveau du réseau PAN (Personal area network). Ainsi, le nœud Radio Cognitive relié aux différents capteurs dans cette architecture, collecte les données (signes vitaux) qu'il transfère vers le centre de stockage tel que cela est présenté à la figure 4.1. L'équipement Radio Cognitive pourrait être connecté à un point d'accès WiFi pour le patient suivi à domicile ou dans un centre hospitalier. Le principe de cette architecture prévoit également le passage du nœud Radio Cognitive de la technologie WiFi vers le GSM ou encore le WiMAX pour les patients en mobilité et dans un environnement extérieur. Cette proposition à ainsi l'avantage d'introduire l'idée de réseaux de capteurs Radio Cognitive. Toutefois, les préoccupations essentielles telles que le confort, l'autonomie en énergie et la qualité de service ou encore la gestion des interférences sont très peu considérées. D'autres insuffisances notables dans ce mécanisme de suivi de patient (figure 4.1) se résument au fait que l'équipement Radio Cognitive au cœur du processus soit connecté à une station de base ou un point d'accès non Radio Cognitive. Cela pose le problème de l'efficacité des transmissions dans l'ensemble, l'intelligence Radio Cognitive n'étant pas partagée ou implémentée par ces équipements intermédiaires (station de base, point d'accès). Rappelons que le principe de l'équipement Radio Cognitive consiste à exploiter de manière opportuniste les bandes licenciées tout comme celles non-licenciées pour le besoin de ses communications. Cela implique une capacité de commutation automatique d'une technologie à l'autre de manière transparente, en temps-réel et en tout lieu. Par

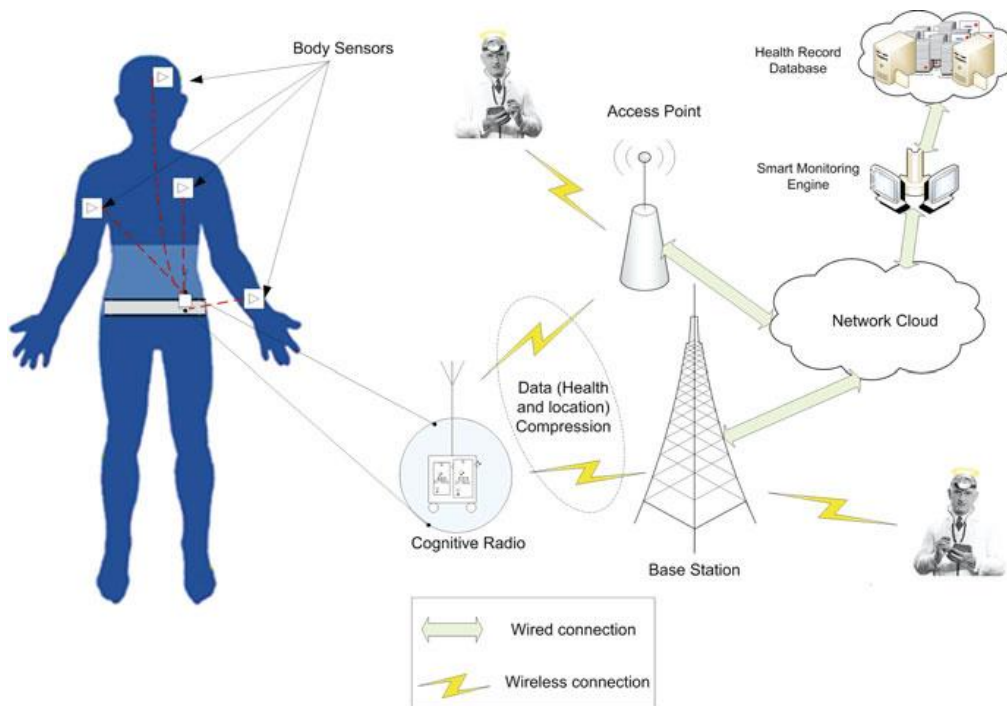


FIGURE 4.1 – Exemple d'infrastructure Radio Cognitive en e-santé [Ziqi 11]

conséquent, une infrastructure Radio Cognitive de suivi permanent de patient, pour être efficace, devrait supporter les fonctions du cycle de la cognition au niveau des nœuds participant au routage tel que détaillé par Henan et al. [Hena 11]. C'est dans cette démarche que semble s'inscrire la troisième proposition d'architecture que nous découvrons et qui est basée sur les travaux de Dimitrakopoulos et al. [Dimi 10], avec un contexte plus étendu que la démarche adoptée par Ziqian et al. [Ziqi 11]. En effet, tel qu'affiché à la figure 4.2, les fonctions Radio Cognitive sont dans ce cadre implémentées aussi bien par le réseau *PAN* que par les équipements intermédiaires (les stations de base). Cela constitue donc une réunion des deux premières suggestions d'architecture. Le réseau d'accès proposé (à la figure 4.2) offre alors une possibilité d'exploration d'un ensemble de technologies (3G, 3G⁺, WiMAX, WLAN) dans le routage des données et même en situation de mobilité (domaine ambulance) du patient. L'approche démontre qu'à partir des informations du contexte, du profil ou encore des politiques établies (Input), l'équipement Radio Cognitive usant de son moteur d'intelligence, exécute la configuration/re-configuration (Output) appropriée. On constate également que les changements de bande de fréquence et de technologie en fonction des exigences (QoS : Qualité de Service) constituent des exemples d'actions possibles.

Notons aussi que le scénario de communication décrit à la figure 4.2, prend en compte le concept de mobilité matérialisé par le domaine de l'ambulance sur lequel nous reviendrons dans la sous-section 4.4.3. Pour l'évaluation des performances de ce scénario, les signes vitaux tels que les données de l'électrocardiogramme (ECG), la pression artérielle et le glucose étaient à transmettre. Les stations de base flexibles (Radio Cognitive) ont servi de supports pour ces transmissions avec l'utilisation en alternance des technologies UMTS et WiMAX. Les résultats obtenus démontrent que le cadre proposé (Co-health), apporte une nette amélioration des performances en terme d'efficacité (gain en temps) et de fiabilité. La volonté affichée dans ce travail de permettre aux nœuds Radio Cognitive de changer

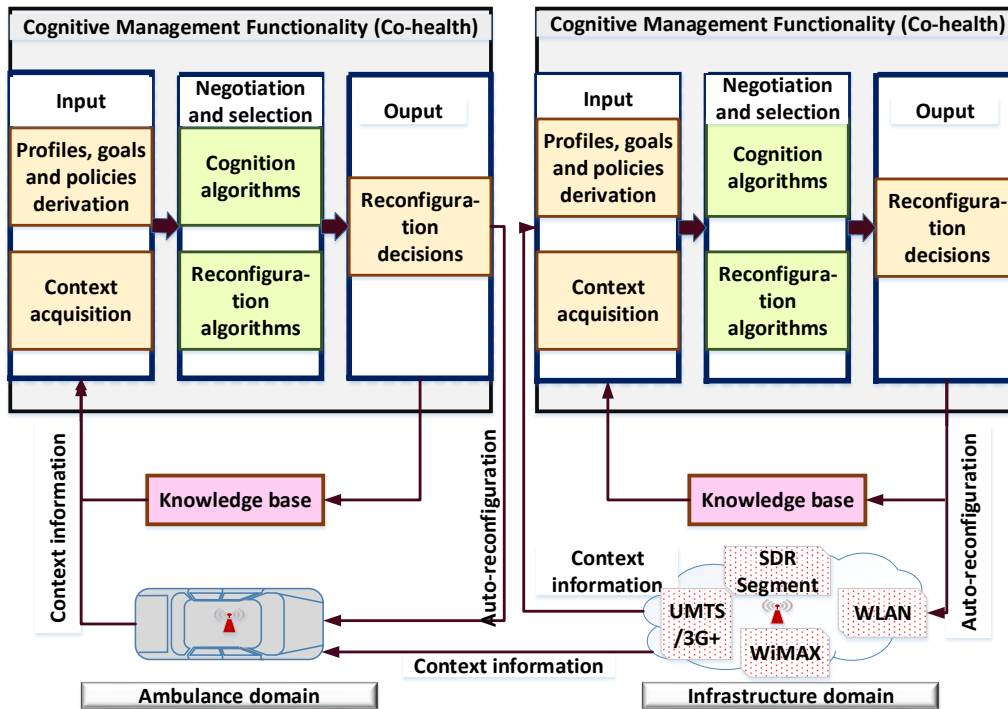


FIGURE 4.2 – Exemple plus illustratif du principe Radio Cognitive en e-santé [Dimi 10]

dynamiquement de bande ou de technologie au besoin constitue donc une idée novatrice dans cette proposition. Aussi, il est à noter que Co-health s'est assez focalisé sur la problématique du partage de ressources (sélection de canaux) déjà étudiée dans la première proposition.

En somme, on note à travers cette revue que la démarche conduisant à l'introduction des fonctions cognitive à divers niveaux d'une architecture de suivi du patient devient une réalité. Nous retiendrons également que la problématique des réseaux Radio Cognitive la plus étudiée dans ces architectures demeure celle du partage du spectre. Le sondage spectral et les suggestions de mécanismes fiables d'évitement des interférences, tout comme les contraintes de QoS et de confort constituent des problèmes très peu abordés.

4.4 Présentation des contextes de suivi du patient et travaux inhérents

Après avoir exposé quelques idées d'implémentation des fonctions cognitives dans une architecture de communication dédiée au suivi du patient, nous mettons à présent un accent sur les environnements de suivi de patient pour lesquels les communications Radio Cognitive pourraient être envisagées. Nous profitons de cette présentation des contextes pour inventorier les outils (logiciels et matériels) et les technologies associées. Cette partie permet également de mettre en évidence la pluralité des environnements du suivi avec leurs contraintes diverses. Les travaux de Alghamdi et al. [Algh 13] permettent ainsi de mieux situer les principaux environnements du suivi de patient. Les enseignements à tirer de l'analyse de ces travaux, concernent aussi bien la catégorisation des risques (maladies chroniques, maladies à haut risque, maladies liées au vieillissement etc.), le choix du type de suivi (suivi continu, non-continu, prolongé, en tout lieu etc.) que l'estimation de la portée des technologies à utiliser selon le contexte tel que spécifié à la figure 4.3.

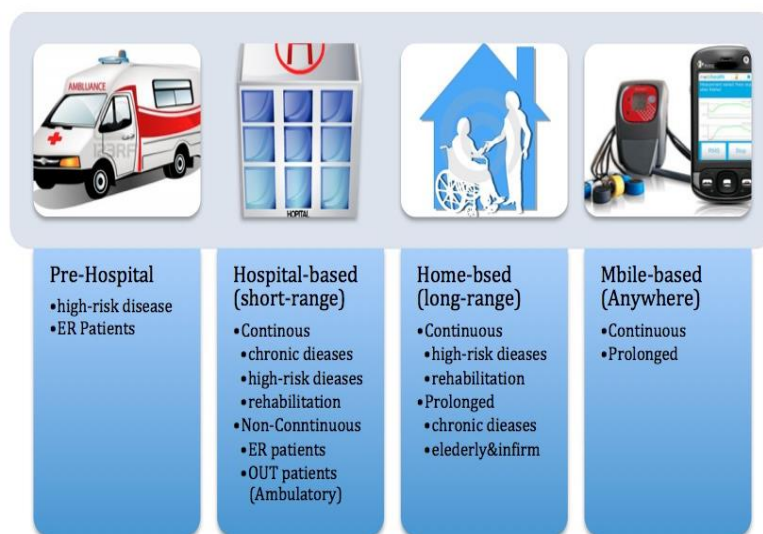


FIGURE 4.3 – Contextes de suivi selon la classification arrêtée dans [Algh 13]

Cette figure donne l'aperçu de la classification tout en faisant apparaître les contraintes relatives à chaque contexte. Le choix des technologies est ainsi influencé par les facteurs tels que la distance ou l'environnement, à titre d'exemple. Toutefois, il semble essentiel de rappeler que les WBAN et les WPAN tels que représentés à la figure 4.1, composent les points de départ du processus de suivi du patient. La figure 4.4 en est l'illustration parfaite avec sa liste représentative des plateformes applicatives (largement basées sur les WBAN et WPAN) de la littérature classées par contexte. Bien que non Radio Cognitive, ces différentes plateformes applicatives fournissent diverses informations intéressantes telles que les limites des solutions proposées. L'analyse de ces limites permet de mieux appréhender les efforts actuels d'appropriation de la Radio Cognitive par le domaine de la e-santé à travers les concepts assez récents de "WBAN ou WPAN radio cognitive" que nous éluciderons à la section 4.4.1 avec une énumération sommaire de travaux existants.

Ce travail d'analyse et de classification permet aussi d'observer que très peu de plateformes applicatives suggèrent l'implémentation de la Radio Cognitive, malgré le nombre croissant d'applications du domaine, les technologies (variables) utilisées avec les problématiques aussi évidentes d'interopérabilité, d'interférence et de qualité de service relevées par Alghamdi et al. [Algh 13]. L'un des avantages également d'une telle catégorisation, est d'avoir mis en évidence pour rappel les concepts de mobilité, de suivi à l'hôpital ou à domicile qui se rattachent aux contextes. Ce travail d'organisation garde tout son sens et guide notre démarche dans la structuration de la présente analyse de la littérature. En effet, c'est une base intéressante pour une meilleure organisation des contributions (en terme d'articles de recherche) de l'état sur l'utilisation de la Radio Cognitive en e-santé, afin de faciliter leur compréhension mais aussi de mieux appréhender la spécificité des problèmes par environnement. Les contributions à cet effet les plus notables, énoncent d'ailleurs les avancées en terme de propositions sur l'utilisation des CR-WBAN (WBAN Radio Cognitive) et CR-WPAN (WPAN Radio Cognitive) pour le suivi de patient à domicile ou à l'hôpital.

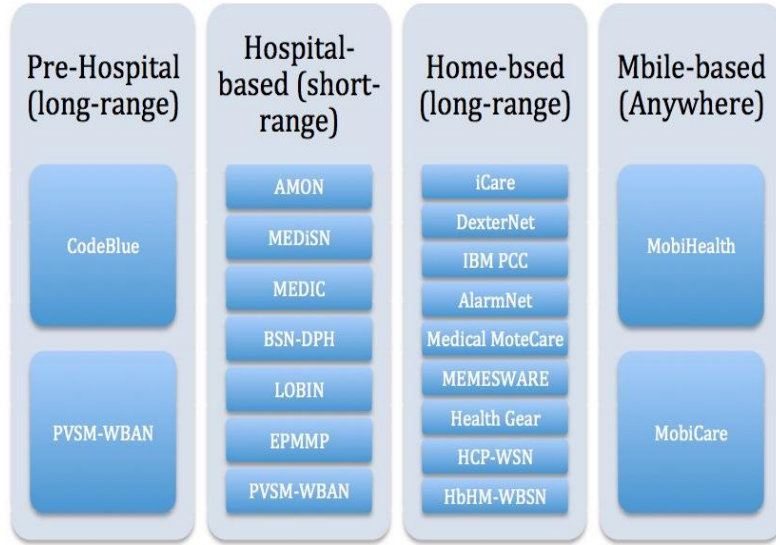


FIGURE 4.4 – Exemples de plateformes applicatives pour chaque contexte [Algh 13]

4.4.1 Les réseaux de capteurs e-santé Radio Cognitive

Rappelons que les principaux objectifs des travaux s'appuyant sur la technologie Radio Cognitive dans le contexte du suivi de patient s'articulent autour d'une conception dotant les équipements utilisés en capacité cognitive afin d'initier l'exploration opportuniste du spectre fréquentiel. C'est dans cette optique que Feng et al. [Feng 10] ont soumis une proposition relative à l'application de la technologie Radio Cognitive aux WBAN. Ce travail se propose d'évaluer les performances au niveau physique du réseau de capteurs Radio Cognitive. L'un des principes de fonctionnement du module Sondage du spectre est alors détaillé. Ainsi, la modélisation du processus de détection de bandes libres se décline en une série d'actions allant de la mesure du signal à l'accomplissement de tests d'hypothèses tel que retracé par l'équation (7.1).

$$H(x) = \begin{cases} H_0 : & y(t) = n(t) \\ H_1 : & y(t) = x(t) + n(t) \end{cases} \quad (4.1)$$

Sur la base de l'amplitude du signal reçu ou mesuré $y(t)$, l'équipement Radio Cognitive détermine à partir d'un seuil λ prédéfini si le canal sondé est libre ou occupé. Ainsi, la première hypothèse H_0 , caractérise le cas où le signal mesuré et analysé n'est constitué que du seul bruit gaussien $n(t)$ connu sous l'acronyme AWGN (Additive white Gaussian noise)[AWGN]. La seconde hypothèse H_1 , renseigne sur la présence d'un utilisateur (licencié) avec la détection d'un signal additionnel $x(t)$. Ce mécanisme qualifié de détection énergétique fournit les différentes probabilités symbolisées par l'équation (7.2).

$$\begin{cases} P_d = P_r(r > \lambda | H_1) \\ P_f = P_r(r > \lambda | H_0) \end{cases} \quad (4.2)$$

Dans cette équation, P_d représente la probabilité de détection tandis que P_f exprime la probabilité de fausse alarme. La contribution de Feng et al [Feng 10] consistait donc à maximiser P_d tout en maintenant P_f à un niveau de fausse détection acceptable. Par conséquent, la démarche a été d'associer à la technique de détection énergétique, la méthode de détection cyclostationnaire plus détaillée

par les travaux de Rebeiz et al. [Rebe 13]. Le couplage de ces deux techniques permet ainsi de garantir une bonne qualité de détection dans un contexte WBAN où le signal est susceptible de subir des effets d'atténuations liés aux mouvements du corps humain. Signalons que le principe de détection hybride (énergétique et cyclo-stationnaire) adopté dans cette contribution apporte des résultats plus fiables. Cependant, la complexité et le coût de calcul découlant de ce principe apparaissent élevés ou difficilement supportables dans ce contexte orienté vers l'utilisation de capteurs très peu autonomes en énergie. Un compromis tel que nous le verrons dans la suite de ce manuscrit et au chapitre de nos contributions, entre capacité de calcul ou faible coût algorithmique et fiabilité des résultats de détection, semble être la tendance pertinente. Outre cette proposition, les travaux de Chavez-Santiago et al. [Chav 12] étendent l'implémentation des fonctions cognitives à la couche MAC (Medium Access Control). La principale contribution technique dans cet article de recherche est d'avoir ébauché une architecture WBAN médicale où le nœud-contrôleur qui collecte les données issues des autres capteurs est capable d'explorer avec agilité le domaine fréquentiel tout en étant apte à gérer les interférences découlant du partage des canaux de communication. L'idée suggérée est basée sur l'utilisation de la norme IEEE 802.15.6 (UWB) qui devra être supportée par un dispositif matériel intégrant le concept de radio impulsionnelle UWB (IR-UWB). Cette radio impulsionnelle adopte comme technique de codage du signal numérique, la répartition orthogonale sous forme de multiples sous-porteuses, caractéristique du multiband-OFDM [Siri 06] (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing). Le concept IR-UWB [Yuan 12], pour sa capacité à prendre conscience de son environnement et à s'y adapter intelligemment, est alors similaire à la Radio Cognitive. Précisons également que la technique du multiband-OFDM procède par découpage de la bande de fréquence en 14 sous-canaux de largeur 528 MHz chacun [ECMA-368]. Un exemple de configuration au niveau de la couche physique, permettant de rendre le contrôleur-WBAN Radio Cognitive est proposé par Chavez-Santiago et al. [Chav 12].

Une fois doté de cette capacité Radio Cognitive, le contrôleur-WBAN représentant le nœud central est chargé de coordonner et de synchroniser les communications avec les différents capteurs médicaux du dispositif (WBAN). Le contrôleur est alors identifié à un émetteur-récepteur IR-UWB, auquel l'on associe un autre émetteur-récepteur multiband-OFDM. La transformée de Fourier rapide (FFT) qui est une représentation spectrale discrète du signal échantillonné, fournit les informations permettant à l'équipement radio IR-UWB, après analyse, de statuer sur la présence ou non de bandes libres pour les transmissions opportunistes. Le dispositif prévoit un canal de broadcast pour le partage des informations de synchronisation entre les autres capteurs et le nœud-capteur Radio Cognitive. En effet, pour réduire les risques d'interférence et de collision, la couche MAC de la radio IR-UWB coordonne les accès au canal et distribue les temps ou périodes de transmission en fonction des bandes disponibles ou libres. La couche MAC pour rappel, obtient les informations relatives à l'état du canal (canal libre ou canal occupé) grâce au module Sondage du spectre. Les résultats du sondage spectral déterminent également la politique de partage avec pour principal but d'éviter les interférences avec les autres utilisateurs. Cet attribut de gestionnaire des interférences est confié au contrôleur radio dans la plupart des architectures WBAN Radio Cognitive et le principe général est mieux explicité par les travaux de Qiang et al. [Qian 13]. L'idée dans cet article consiste d'une part à construire un scénario de partage du canal WiFi, facteur d'interférences et d'autre part d'exposer une méthode efficace d'allocation de ressources qui minimise ces impacts. C'est un algorithme qui contrôle et édicte les règles d'accès au canal et le fonctionnement, dans son ensemble, de ce système est donné par la figure 4.5.

La figure 4.5 est un exemple illustrant parfaitement l'assignation des rôles avec une subdivision de l'architecture en trois sous-systèmes, le sous-système « Interférence » étant le générateur du bruit perturbateur qui serait produit en situation réelle de suivi du patient. Le coordinateur qui désigne ici le nœud implémentant les algorithmes de la cognition, associé au reste des capteurs, collecteurs des données de santé forment le sous-système WBAN. Le dernier sous-système qualifié d'Observateur,

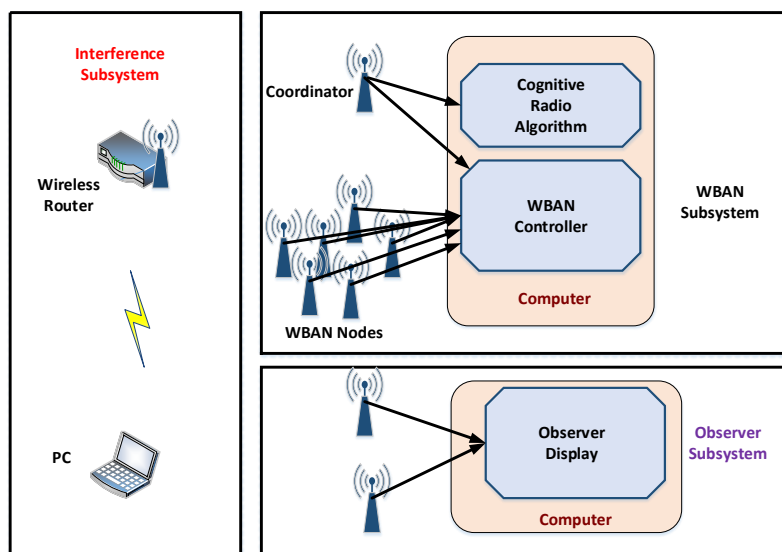


FIGURE 4.5 – Modèle de gestion des interférences proposé dans [Qian 13]

contrôle évidemment le bon fonctionnement de l'ensemble du système ou des équipements et affiche leur état aux utilisateurs. Les statistiques sur les pertes de paquets, le taux de réussite, la puissance du signal de transmission constituent entre autres les paramètres surveillés. L'idée faisant la singularité de ce scénario repose sur l'algorithme proposé de distribution dynamique de la durée d'accès au canal. Le coordinateur Radio Cognitive réalise les activités de sondage du spectre et en déduit également le degré d'interférence engendré. Notons que le sondage est une activité périodique et l'algorithme de Qiang et al. [Qian 13] se propose donc d'ajuster la période de déclenchement du sondage en fonction de l'état d'occupation de la bande de fréquence, déductible à partir des statistiques de collision. Le même principe a été repris par Junchao et al. [Junc 12] avec une plateforme similaire à celle de la figure 4.5. Toutefois, l'algorithme d'estimation de l'état du canal, dont l'exécution précède la dynamique de partage de bande de fréquence cette fois proposée, intègre la valeur de l'amplitude du signal. Il est aussi important de souligner que la complexité du problème de gestion des interférences est à la dimension de la fragilité du contexte de suivi du patient. C'est en cela que la démarche initiée par Syed et al. [Syed 13], basée sur la conception d'un système Radio Cognitive centralisé qui tient compte des caractéristiques de l'environnement externe à la radio, constitue une approche intéressante de résolution du problème. L'accent est donc mis sur les interactions entre les objets communicants mais aussi sur l'effet des ondes sur les équipements non-communicants de l'environnement. Une attention est également portée sur leurs gestions ou coordinations, rendues possibles grâce aux fonctions cognitives. A titre d'exemple, les communications initiées au domicile dans le cadre du suivi de patient occasionneraient des perturbations dans cet environnement de réseau ubiquitaire. Le réseau ubiquitaire désigne ici, pour rappel, l'intégration de processeurs et des interfaces réseaux sans fil dans les objets du quotidien tels que le réfrigérateur, la balance, les ampoules ou encore la télévision afin de les rendre communicants. Ce concept d'objets communicants est assez développé par Mukherjee et al [Mukh 12] qui traitent des questions liées à l'assistance et à l'autonomie à domicile. Cette contribution orientée, analyse et traitement des données issues des capteurs, termine par une recommandation importante sur la nécessité de disposer d'une infrastructure intelligente indispensable pour le bon fonctionnement du système de suivi dans un environnement ubiquitaire. Il nous semble indiqué de relever que le traitement et l'analyse des données de santé est un domaine important de l'informatique

médicale. Cependant, c'est une problématique qui n'est pas abordée dans ce travail de thèse. Les travaux de Pandey et al. [Pand 14] et ceux de McGregor et al. [McGr 13] qui sont entièrement consacrés au traitement des données massives encore connu sous le concept de Big Data donnent un large aperçu de l'avancée des recherches dans ce domaine. Le contexte ubiquitaire permet de mesurer la grandeur du défi à relever et les travaux suscités permettent de s'apercevoir du rôle important que pourrait jouer la Radio Cognitive. Cette technologie apporte aux réseaux de capteurs avant tout une réponse au problème d'interopérabilité des technologies et du matériel avec la diversité de capteurs fonctionnant sous des normes différentes. De plus, la Radio Cognitive devrait faciliter l'interprétation, l'analyse de divers signaux et de disposer d'informations utiles. Pourtant, les travaux, jusqu'à présent énumérés et que nous estimons assez représentatifs de l'état de l'art, n'implémentent les fonctions cognitives qu'au niveau du nœud coordinateur (smartphone ou capteur de plus grande capacité énergétique). En effet, la centralisation de l'intelligence au seul nœud-contrôleur constitue non seulement un frein à la scalabilité mais aussi pose le problème de robustesse. Par exemple, au cas où le nœud contrôleur ne parvenait plus à exécuter les fonctions cognitives, l'ensemble du réseau se retrouverait sérieusement impacté. Précisons tout de même que cette non planification et extension des modules de la Radio Cognitive à l'ensemble des nœuds pourrait être vraisemblablement liée au caractère limité des capteurs en ressource énergétique et en capacité de calcul. La recherche une fois encore d'un meilleur compromis entre efficacité énergétique, capacité de calcul et implémentation des fonctions cognitives au niveau d'un nombre plus important (voir tous les nœuds) de nœuds-capteurs apporterait une amélioration considérable des performances de l'ensemble du WBAN Radio Cognitive. C'est en cela que les travaux de recherche sur l'autonomie [Trip 13] et l'efficacité énergétique [PoKa 12][Hoan 12] dans les réseaux de capteurs prennent toute leur importance.

Aussi, le passage de la télévision de l'analogique au numérique libère de nombreuses fréquences exploitables par la technologie Radio Cognitive. Cela constitue une réelle opportunité pour la réalisation du suivi dans certains environnements constitués d'obstacles affectant la qualité du signal de transmission. La bonne qualité de propagation et de diffusion du contenu multimédia sur les bandes de la télévision serait alors un atout important que l'équipement Radio Cognitive prendrait en compte dans son processus de prise de décision et dans un contexte de suivi à l'intérieur des bâtiments.

Nous retenons alors que les travaux de Syed et al. [Syed 13] nous ont permis d'introduire la spécificité des contextes de suivi du patient avec pour exemple une analyse plus détaillée de l'environnement à domicile. Toutefois, pour la nécessité d'être plus complet et vu la place importante du suivi à l'hôpital, nous faisons référence à quelques travaux traitant de l'apport de la Radio Cognitive en environnement hospitalier.

4.4.2 Les travaux évoquant les aspects de suivi du patient à l'hôpital

L'usage des technologies sans fil en environnement hospitalier soulève la question fondamentale de l'impact des communications et des ondes électromagnétiques qui en découlent sur le matériel médical. De toute évidence, la propagation mal contrôlée des champs magnétiques et électriques peut conduire au dysfonctionnement des appareils médicaux et affecter leurs performances. Le concept d'infrastructure client-serveur Radio Cognitive formulé par Phunchongharn et al. [Phun 10], assorti d'un système d'inventaire des équipements médicaux, constitue un exemple de scénario intéressant envisagé dans la littérature pour venir à bout de telles interférences. En effet, tel que visible à la figure 4.6, le système est composé d'un contrôleur Radio Cognitive représentant le serveur du système d'information hospitalier constituant les utilisateurs secondaires clients (Radio Cognitive) et d'une base de données renseignant sur le matériel médical en présence. Le serveur est alors chargé de la gestion et de la coordination de l'ensemble des communications du système d'information de l'hôpi-

tal. Il contrôle et procède à l'ordonnancement des accès au canal, sur la base des contraintes applicatives ou de la priorité [Mamo 14] du contenu à transmettre et de la sensibilité du matériel à proximité. La technologie RFID (Radio Frequency IDentification), avec ses étiquettes radio-fréquences, permet d'identifier, de suivre le cheminement et de connaître les caractéristiques à distance du matériel sensible.

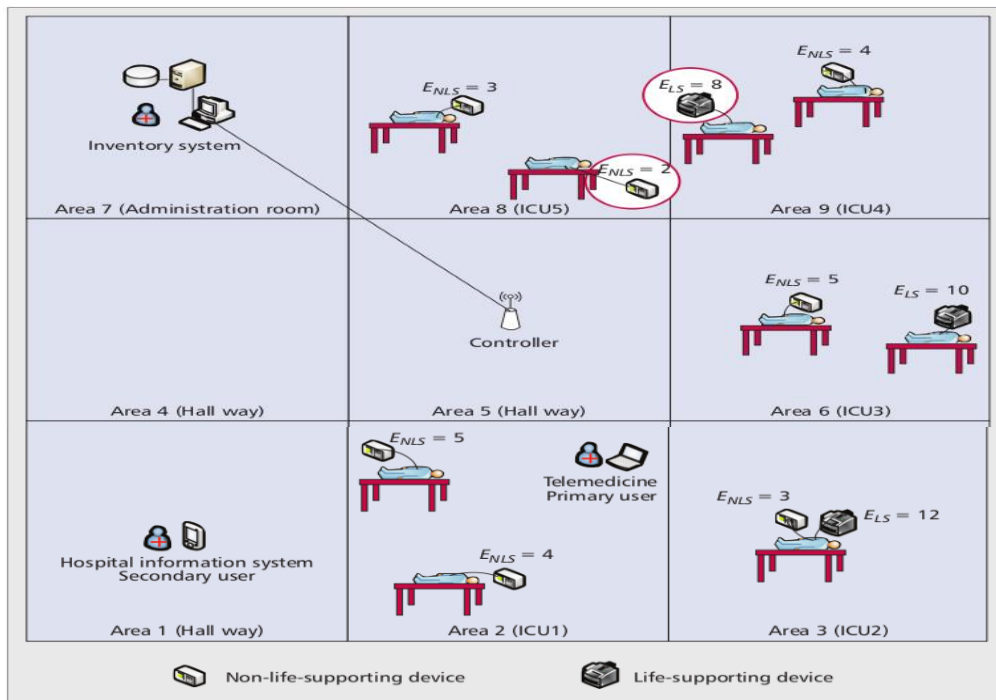


FIGURE 4.6 – Modèle de déploiement de la Radio Cognitive en milieu hospitalier [Phun 10]

Toutefois, l'idée de centralisation de la prise de décision qui fonde la suggestion de Phunchongharn et al. [Phun 10] limite l'efficacité de l'architecture proposée en terme de scalabilité. Aussi, pour obtenir de meilleures performances, cette proposition mérite d'être améliorée afin qu'elle intègre et s'approprie le concept de multi-bands¹ et celui de multi-technologies² qui constituent les principes fondamentaux de la technologie Radio Cognitive.

Le principe de protection des équipements sensibles grâce aux fonctions cognitives est aussi mentionné dans les travaux de Chavez-Santiago et al. [Chav 11] et de Syed et al. [Syed 13]. Tout comme le mécanisme de gestion des transmissions précédemment évoqué (figure 4.6), ces deux dernières contributions procèdent également par inventaire et caractérisation du matériel présent afin d'adopter des stratégies de communication qui réduisent les interférences et améliorent la qualité de service conformément aux principes mieux explicités dans cette nouvelle contribution de Chavez-Santiago et al. [Chav 14]. Par ailleurs, leurs travaux qui ont précédé [Chav 13] renforcent la compréhension sur l'état de faisabilité ainsi que les prédispositions au niveau matériel à satisfaire pour l'aboutissement du processus conduisant à une meilleure gestion des ondes électromagnétiques perturbatrices. Ainsi, la carte (la figure 4.7) que ces auteurs proposent, est l'illustration d'une radio flexible (SDR) capable d'explorer diverses technologies (WiFi, Bluetooth, BLE, ZigBee). Notons que la bande 2.4-2.5

1. Exploration de plusieurs canaux à la fois.

2. Exploration de plusieurs technologies à la fois.

Ghz explorée par la SDR dans ce scénario sert également de support de communication non seulement pour les équipements médicaux (à l'hôpital) mais aussi pour les communications ubiquitaires (au domicile). L'interopérabilité est alors possible selon Chavez-Santiago et al [Chav 13] si toutes les communications générées sont gérées par la SDR transformée en point d'accès pour la circonstance.

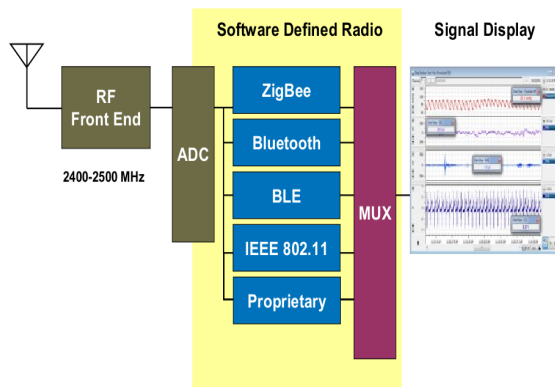


FIGURE 4.7 – Coexistence radio avec la technologie SDR [Chav 13]

En outre, on note à travers cette figure 4.7 que la question de l'interopérabilité des dispositifs médicaux communicants trouverait sa réponse dans ce modèle d'implémentation radio-physique où la SDR déciderait de la convenance de l'onde radio à émettre sur la base de critères tels que la localisation, la période, le degré d'occupation de la bande et le niveau des interférences acceptable. Les fonctions cognitives dans ce contexte analysent à cet effet les données environnementales (Hôpital) et tiennent compte des contraintes relevées dans leur choix de paramètres de transmission.

En plus de cette problématique liée aux interférences, d'autres questions soulevées par le suivi de patient grâce aux technologies Radio Cognitive ont fait l'objet d'étude dans la littérature. En effet, très peu de contributions ont porté sur l'usage de ces fonctions pour le suivi du patient dans un contexte de mobilité.

4.4.3 Les travaux testant l'hypothèse de mobilité du patient

La mobilité introduit de nombreux défis dans les réseaux dédiés au suivi du patient basé sur la Radio Cognitive. Ces défis se mesurent par la complexité à fournir les ressources réseaux, le coût en terme de consommation d'énergie, les difficultés d'apprentissage et par conséquent les problèmes d'adaptation des équipements Radio Cognitive à leur environnement. Pour étudier cet aspect, Butun et al. [Butu 10] ont réalisé une évaluation de l'impact de la mobilité sur les performances du réseau Radio Cognitive. De plus, Nardis et al. [DeNa 10] donnent un vaste aperçu des challenges et opportunités de recherche suscités par cette problématique de mobilité. Notons que les processus stochastiques³, à l'image des chaînes Markoviennes, ont été proposés par Butun et al [Butu 10] pour la modélisation ainsi que la prédiction de la mobilité afin de faciliter la prise de décision par anticipation sur les mouvements. Cette modélisation semble pertinente pour les transmissions d'urgence, avec le déplacement (mobilité) du patient qui est assuré le plus souvent par une ambulance. Un exemple de scénario assez évocateur de la difficulté à maintenir la connexion dans ce cas précis est défini par Van et al. [VanW 12]. L'idée consiste à maintenir le contact entre l'équipe composée d'une ambulance

3. Le processus stochastique est une suite d'expériences dont le résultat dépend du hasard.

transportant un patient victime d'un accident vasculaire cérébral et le personnel soignant de l'hôpital. Une architecture de communication susceptible d'offrir du haut débit pour les transmissions des paramètres physiologiques (pression artérielle, glucose), ainsi que des images et des vidéos émises de l'ambulance vers l'hôpital a été proposée pour ce cas de figure [VanW 12]. Ce prototype met en avant la notion de communications intelligentes qui pourrait être développée dans les ambulances afin que les équipements (intelligents) puissent décider de manière autonome de la bande de fréquence la plus appropriée pour les transmissions en fonction du type de contenu (image, vidéo, texte). On retiendra alors que le maintien de la connectivité dans un contexte de mobilité s'avère une tâche difficile dans les réseaux Radio Cognitive consacrés à l'acheminement de données d'urgence ou de santé, surtout en temps-réel. Cette difficulté devrait s'accroître davantage si éventuellement les communications médicales étaient réalisées en s'appuyant sur les réseaux Radio Cognitive sans infrastructure (les réseaux Radio Cognitive ad hoc). Nous analysons à la sous-section 4.4.4 cette éventualité.

4.4.4 Cas des réseaux Ad Hoc Radio Cognitive pour la e-santé

Les réseaux Radio Cognitive sans infrastructure pourraient être proposés pour supporter des communications en e-santé. Toutefois, la mise en place effective de ces réseaux pose des problématiques diverses et encore plus complexes. En effet, la faisabilité de l'idée repose sur des propositions et l'implémentation de protocoles de routage [Mast 12] assez réactifs permettant de réduire les délais ainsi que l'aptitude à supporter les impératifs de temps-réel. C'est un domaine qui intéresse de plus en plus de chercheurs si l'on s'en tient à l'importance du nombre de contributions submergeant la littérature [WeiQ 10] [MiRy 12]. Il faut préciser que ces travaux, jusqu'à présent, ne traitent que des problématiques spécifiques aux réseaux ad hoc Radio Cognitive et suggèrent rarement leur application possible dans l'établissement de communications pour le domaine médical. L'observation des problèmes [Nama 13] liés à ce type de réseaux soutient la déduction selon laquelle ces infrastructures ne pourraient supporter qu'une certaine catégorie de services de santé. En effet, ils seraient acceptables pour les applications tolérantes aux délais n'ayant aucune contrainte d'urgence à l'image de la transmission de données de mises à jour. L'importance des verrous à lever pour les réseaux ad hoc Radio Cognitive avant toute tentative visant leur expérimentation en e-santé atteste de l'étendue des tâches et de l'état du champ resté encore inexploré, élargissant ainsi de fait nos perspectives de recherche. En effet, les problématiques posées par les réseaux ad hoc en e-santé ne seront pas abordées dans notre présente contribution.

Par ailleurs, nous rappelons que le traitement du signal ou encore l'analyse des données issues du sondage spectral pourrait délivrer des informations pertinentes pour la prise de décision outre celle liée au partage des bandes de fréquence. Il s'agit de quelques fonctionnalités additives fournies par les modules de la cognition, n'entrant pas nécessairement dans le cycle de communication des données de santé et que nous qualifions de cas particuliers qu'il semble important d'évoquer brièvement.

4.5 Quelques cas particuliers

Le sondage du spectre produit une quantité d'information sur l'environnement radio qui peut révéler ou donner des indications sur l'activité du patient et les dangers à proximité entre autres. Ces événements radio bien analysés offriraient de meilleures conditions d'assistance à la personne et contribueraient à l'augmentation de l'autonomie ainsi qu'à la qualité de vie du patient suivi. Par exemple, la possibilité de détection parallèle de signes vitaux et de bandes libres que nous abordons

à la section 4.5.1 peut apporter le confort par la réduction du nombre de capteurs, offrant ainsi un environnement de suivi moins invasif. Il est important de signaler que l'intérêt de cette énumération sommaire de cas particuliers est de scruter brièvement certaines fonctionnalités importantes de la technologie Radio Cognitive qui n'ont pas pu être étudiées dans le cadre de ce travail de thèse.

4.5.1 Le sondage de bandes libres et identification de signes vitaux

La pratique courante dans les réseaux Radio Cognitive est la détection de bandes libres pour assurer les communications. Cependant, avec sa capacité de traitement du signal, le module du sondage spectral peut aussi assurer les fonctions d'un capteur de signes vitaux. Une bonne analyse du signal peut fournir des informations supplémentaires pouvant favoriser la réduction globale du nombre de capteurs. Ce concept de détection concurrente du spectre libre et de signes vitaux a été déjà envisagé par Fu-Kang et al. [FuWa 10]. La figure 4.8 permet de mieux appréhender le mécanisme de fonctionnement dudit système.

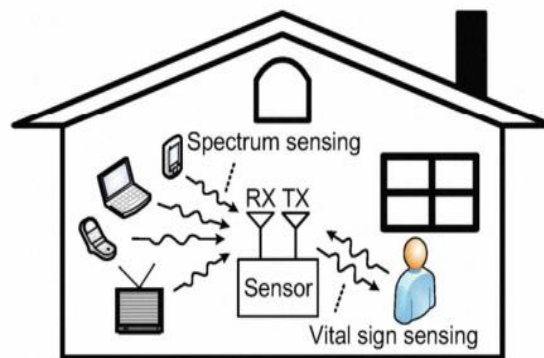


FIGURE 4.8 – Sondage concurrent de bandes libres et des signes vitaux [FuWa 10]

Le principe de cette approche repose, avant tout, sur l'utilisation d'un circuit d'oscillateur verrouillé par injection plus détaillé avec les travaux de Shumakher et al. [Shum 04], pour la détection de bandes libres ainsi que de la puissance du signal. D'autre part, un oscillateur auto-verrouillé par injection est également prévu pour détecter l'effet Doppler qui est une grandeur permettant de mesurer la fréquence cardiaque (pulsations) et le rythme respiratoire. Rappelons que l'effet Doppler caractérise le décalage de fréquence d'une onde électromagnétique (pour ce qui concerne la figure 4.8) entre sa mesure au niveau de l'émetteur et celle réalisée à la réception en fonction de la variation de distance existante entre les deux transmetteurs. Des informations détaillées sur la théorie de Doppler sont consultables dans une étude réalisée par Tianyi et al. [Tian 11]. Ainsi, un prototype de ce mécanisme de sondage parallèle a été implémenté sur le spectre électromagnétique allant de 2 à 4 GHz par Fu-Kang et al. [FuWa 10] pour le besoin de validation de cette architecture. Aussi, le module Radio Cognitive de sondage, au-delà des aspects que nous venons de décrire, pourrait apporter d'autres informations utiles pour le processus de suivi du patient.

4.5.2 Le sondage de bandes libres et déduction d'informations utiles

La figure 4.8 donne une idée de la diversité des signaux pouvant être captés et analysés par un nœud Radio Cognitive. Dans le contexte de suivi du patient, chaque signal particulier peut être porteur d'une information importante. Le signal de la télévision à titre d'exemple, fournit des informations

sur la localisation et l'activité du patient. Ainsi, avec l'émergence de l'informatique des objets, le nœud Radio Cognitive dispose d'une multitude de sources et de signaux distincts lui servant de base de connaissance sur son environnement. Cette perception de l'environnement facilite non seulement sa prise de décision (pour les communications) mais elle met également à la disposition des applications de suivi du patient de précieuses informations (localisation, activités) permettant d'augmenter la qualité de l'assistance à la personne.

Après avoir parcouru l'ensemble de ces travaux et pris connaissance de diverses orientations données par le domaine de la recherche principalement théorique à l'idée de l'utilisation de la Radio Cognitive dans la e-santé, il est primordial de déterminer la place actuelle de cette technologie dans les projets de recherche plus pratiques. Nous apportons alors quelques précisions à cette interrogation à la section 4.6.

4.6 La Radio Cognitive dans les projets de télé-médecine

Les projets constituent l'un des indicateurs importants d'estimation du niveau d'avancée dans l'implémentation et le déploiement effectif des produits de la recherche théorique. A cet effet, bien que pour l'instant, la part des études consacrées aux architectures Radio Cognitive pour la santé ne soit pas assez significative dans la recherche appliquée, cette technologie pourrait très vite investir les cadres d'expérimentation des projets de télé-médecine. Pour se faire une idée de l'urgence et de la nécessité de l'introduction des réseaux plus intelligents (Radio Cognitive) dans le domaine de la e-santé, nous faisons l'analyse d'une liste de plateformes applicatives développées à travers divers projets de recherche. L'étude de ces applications décrites par le tableau 4.1 donne des indications sur leurs limites respectives et pourrait soutenir cette idée que nous préconisons de passage aux WBAN Radio Cognitive dans les projets de recherche. L'étude comparative matérialisée par ce tableau a été réalisée par Alghamdi et al. [Algh 13]. Le choix de la technologie Radio Cognitive comme infrastructure de transmission de données médicales pourrait conduire à une appréciation différente des critères énumérés par ce tableau. Une analyse de ces plateformes, sous l'angle Radio Cognitive (CR-WBAN) et au regard de chacun de ces critères permettra de comprendre notre optimisme quant à l'utilisation de cette technologie.

WBAN et fiabilité : Ce critère souligne la capacité du réseau WBAN à garantir la collecte des données vitales. Il s'agit de l'organisation des capteurs hétérogènes utilisés autour de la personne et la coopération existant entre eux dans le but d'augmenter la fiabilité des transmissions. Dans la littérature, certains travaux proposent l'implémentation de la technologie Radio Cognitive au niveau du nœud coordinateur. Cette initiative semble apporter des réponses aux problèmes des interférences et aux questions d'hétérogénéité des capteurs. Ainsi la Radio Cognitive pourrait apporter une garantie de fiabilité, avec une approche différente de celle largement prise en compte dans les plateforme présentée au tableau 4.1.

WBAN et disponibilité : La disponibilité suppose que la plateforme WBAN doit être en mesure de fournir les services (stockage, traitement) nécessaires au suivi du patient en toute circonstance. Cette disposition exprime la nécessité pour la plateforme de disposer d'une connexion qui garantit les accès aux serveurs distants. Le critère de disponibilité, au vue du tableau 4.1, est très peu étudié par les projets de e-santé. Les infrastructures Radio Cognitive pourraient donc offrir cette disponibilité au vue de la capacité de cette technologie à explorer (Sondage) une large gamme de fréquences (bandes)

WBAN	Fiabilité	Disponibilité	Sécurité	Confort	QoS
CodeBlue	oui	non	oui	non	oui
AMON	oui	non	oui	non	non
PCC	oui	non	oui	oui	non
AlarmNet	oui	non	oui	non	non
MoteCare	oui	non	oui	oui	non
MEDiSN	oui	non	oui	non	non
MEDIC	oui	non	oui	non	non
M.SWARE	non	non	non	non	non
iCare	oui	non	non	non	non
DexterNet	oui	non	non	oui	non
HealthGear	oui	non	non	oui	non
MbiHealth	oui	non	non	non	non
MobiCare	oui	non	oui	non	oui
Sensium	oui	non	non	oui	oui
BSN-DPH	oui	non	non	oui	non
LOBIN	oui	non	non	non	oui
EPMMP	oui	non	oui	oui	non
HCP-WSN	oui	non	non	oui	non
HbHM	oui	non	non	non	non
PVSM	oui	non	non	non	oui

TABLE 4.1 – Limites des plateformes existantes [Algh 13]

afin d'assurer les transmissions. Par ailleurs, nous portons une attention particulière dans la suite de ce travail de thèse au critère de disponibilité du réseau.

WBAN et sécurité : La caractéristique et la logique de fonctionnement de la Radio Cognitive constituent des raisons suffisantes de prétendre à l'assurance d'un niveau minimal de sécurité en plus des travaux de recherche du domaine qui se multiplient [Alra 12] [Zhih 13]. En effet, la récurrence des changements de bande ajoute une complexité supplémentaire à la réalisation des attaques du type man in the middle⁴. Toutefois, le saut de fréquence, ne saurait être comparé ou ne pourrait se substituer aux mécanismes de sécurité existants. Les sauts fréquentiels répondent pour rappel, aux contraintes de partage de la bande et au principe d'utilisation opportuniste des fréquences. Ils ne peuvent donc être assimilés aux précautions ou techniques de sécurité prévues ou existantes pour assurer les enjeux d'intégrité, de confidentialité, de disponibilité de non-répudiation ou encore d'authentification. Rappelons que ces critères de sécurité sont largement traités dans la littérature et ne rentrent pas dans le cadre du présent travail de thèse.

WBAN et confort : L'acceptation ou l'appropriation par le patient de toute solution de suivi repose en grande partie sur le confort qu'elle procure. La capacité de détection et d'analyse du signal, associées à un algorithme de prise de décision adéquat, mèneraient vers des solutions Radio Cognitive de suivi de patient moins invasives avec un meilleur confort. C'est une assertion justifiée par les po-

4. C'est une attaque qui a pour but d'intercepter les communications entre deux entités.

tentialités énumérées dans la littérature et plus particulièrement le mécanisme de sondage parallèle de bandes et de signes vitaux qui semble fournir des informations importantes sur l'environnement radio. Toutefois, ce critère qui occupe une place importante en e-santé n'est pas abordé dans cette thèse. Le niveau de confort que pourrait offrir les WBAN Radio Cognitive au patient est donc une question intéressante à analyser. Nous intégrerons certainement cette problématique dans nos futures contributions.

WBAN et Qualité de Service (QoS) : Le critère de qualité de service mesure dans ce contexte WBAN, les performances ou la qualité du réseau et sa capacité à gérer les interférences. Les stratégies de partage et d'allocation des ressources réseaux, les techniques d'évitement des interférences ou encore la flexibilité exprimée par l'adaptation dynamique des paramètres de transmission constituent autant d'éléments qui fondent l'aptitude de la Radio Cognitive à assurer la QoS dans les WBAN. La question relative à l'amélioration de la qualité de service dans les transmissions de données de santé grâce à la Radio Cognitive occupe une place importante dans la présente contribution et sera, par conséquent, largement étudiée dans la suite de ce travail de thèse.

En définitive, le tableau 4.1 permet de faire un constat important qui devrait nous guider dans le choix de critères à évaluer pour une architecture de communication e-santé Radio Cognitive. En effet, il permet de s'apercevoir que la majeure partie des plateformes actuelles de suivi du patient s'intéressent très peu aux questions de disponibilité, de confort et de QoS. La fiabilité semble être le critère le plus étudié et pris en compte. Pourtant, au vu du potentiel des fonctions de la Radio Cognitive, l'utilisation de cette technologie pourrait modifier une partie des avis émis dans ce tableau. Dans la suite de ce travail de thèse, nous retiendrons la disponibilité et la QoS comme étant nos principaux critères d'évaluation de l'architecture e-santé Radio Cognitive que nous proposerons.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous exposons un état de l'utilisation de la technologie Radio Cognitive dans les propositions existantes relatives aux architectures de communication en télé-médecine. L'opération de classification des travaux par contexte qui en découle permet de mieux appréhender les problématiques visées. Ainsi, nous avons pu noter les stratégies et les mécanismes proposés pour remédier aux problèmes d'interférence et de connectivité aussi bien au domicile que dans un centre hospitalier ou encore en mobilité. Cependant, il ressort de la présente étude que très peu de plateformes applicatives dont le déploiement serait effectif semblent envisager le passage aux réseaux intelligents. Cette constatation nous a conduit à la réalisation d'une analyse plus exhaustive des atouts qu'apporterait une telle transition. Dans la suite de ce travail, nous insistons fortement sur ces différents atouts en proposant une architecture plus complète, généralisant l'intégration de la Radio Cognitive dans les communications en e-santé.

Deuxième partie

Présentation du cadre des communications et contributions

Chapitre 5

Architecture de communication Radio Cognitive dédiée aux systèmes de santé

*“Le sage n’attend pas que les hommes soient malades pour les soigner,
il les guide quand ils sont en bonne santé.”*

Le Huangdi Nei Jing

Sommaire

5.1	Introduction	54
5.2	Présentation de l’architecture	54
5.3	Description des parties	55
5.3.1	Partie intra-WBAN Radio Cognitive	55
5.3.2	Partie inter-WBAN Radio Cognitive	55
5.3.3	Partie Communication extérieure Radio Cognitive	56
5.4	Présentation du cadre d’expérimentation	57
5.4.1	La plateforme Radio Cognitive	57
5.4.2	Le projet ANR-LICoRNe	62
5.5	Publication relative à cette partie	63
5.6	Conclusion	63

Résumé

Le chapitre actuel est essentiellement consacré à l’architecture de communication basée sur la Radio Cognitive pour le suivi de patient en tous lieux. Nous proposons alors un cadre subdivisé en quatre contextes permettant une distinction des problématiques liées à chacun. Par la suite, nous décrivons les caractéristiques des équipements attendus devant permettre l’implémentation des fonctions cognitives en e-santé. Cette description permet alors de faire la transition vers une présentation des composantes de notre plateforme d’expérimentation acquise dans le cadre du projet ANR LICoRNe. Nous terminons ce chapitre avec une présentation de résultats de tests réalisés avec cette plateforme.

5.1 Introduction

La flexibilité, sous-entendu l'adaptabilité, constitue au vu de notre analyse de la littérature un critère primordial dans la conception et le déploiement d'infrastructures de communication des données médicales. En effet, les performances et la qualité de service offertes dans le cadre du suivi de patient ou de l'assistance à la vie autonome dépendent assurément de l'agilité envisagée dans l'utilisation des ressources réseaux. En effet, une architecture de communication pour la santé, pour être efficace, se doit d'être réactive face aux contraintes de l'environnement radio. L'intégration des fonctions de la Radio Cognitive dans la modélisation de la chaîne des outils de communication dédiés à la e-santé trouve ainsi toute sa place. Dans ce chapitre, nous proposons une architecture de communication assez complète où chaque nœud du processus implémente les modules de la cognition, adoptant ainsi le principe de technologie opportuniste. La section 5.2 permet de découvrir la structuration et le niveau d'adjonction de ces modules dans l'ensemble du système. Une description détaillée des parties de ce système à la section 5.3 permet de comprendre le fonctionnement général. La section 5.4 donne une idée des travaux préliminaires ou des expérimentations réalisées, suivie d'un aperçu de conférences avec acte se rapportant au chapitre, à la section 5.5 et enfin la conclusion de cette partie à la section 5.6.

5.2 Présentation de l'architecture

La figure 5.1 symbolise le principe général d'implémentation de la technologie Radio Cognitive dans l'intégralité du processus de suivi ou d'assistance au patient que nous préconisons.

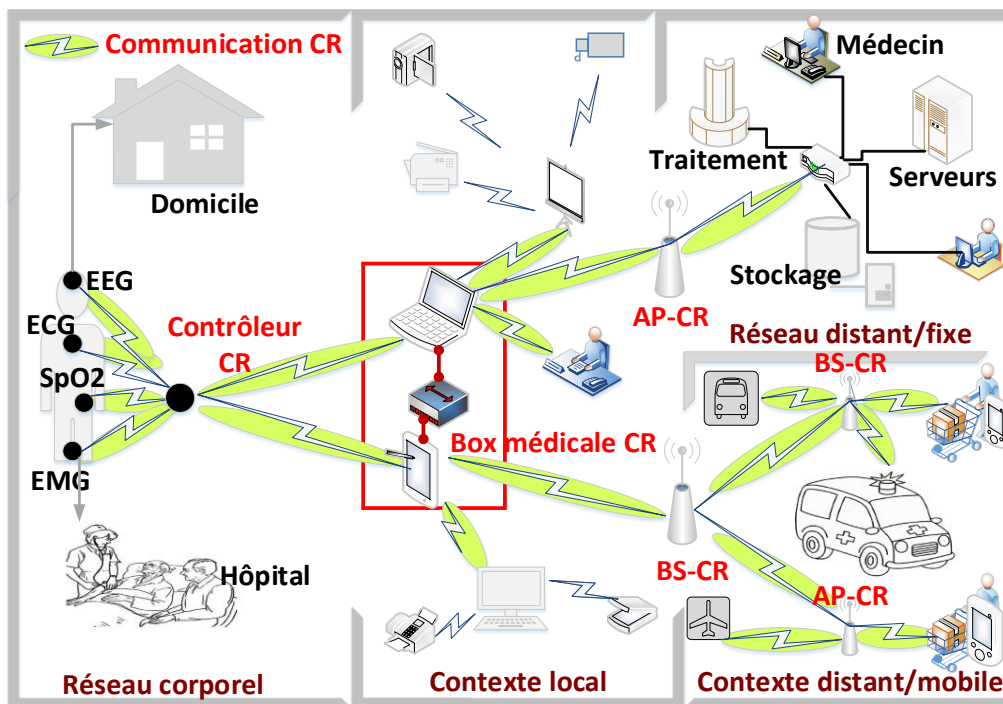


FIGURE 5.1 – Architecture de communication Radio Cognitive en e-santé

A la différence des architectures les plus répandues dans la littérature, celle que nous présentons à la figure 5.1 est assurément la plus exhaustive car elle a, en effet, l'avantage d'étendre l'utilisation des

algorithmes de la cognition à l'ensemble des contextes. Pour une meilleure compréhension de cette nouvelle configuration plus complète, et pour mieux apprécier son principe dans la réalisation des transmissions, nous procédons par une description détaillée des caractéristiques inhérentes à chaque segment du processus tel que subdivisé à la Figure 5.1.

5.3 Description des parties

Dans les architectures existantes [Bour 12], on retrouve le plus souvent la terminologie anglaise « 3-tier » pour qualifier cette segmentation. A la subdivision « 3-tier », nous associons la Radio Cognitive et aboutissons à ce contexte plus large représenté par la figure 5.1. De plus, une distinction légitimée par les contraintes propres au cadre du suivi a été faite entre d'une part les environnements réseau fixe et d'autre part le contexte réseau mobile. Il est important de constater qu'outre le nombre de parties ayant augmenté, notre approche annihile en partie le concept de « 3-tier » avec le contexte de mobilité qui ne prend en compte que « 2-tier » tel que cela se profilera au niveau des sous-sections qui suivent.

5.3.1 Partie intra-WBAN Radio Cognitive

La partie intra-WBAN dans notre architecture, fait référence aux communications entre le contrôleur Radio Cognitive (Contrôleur CR) connu sous le terme de nœud Sink¹ et les capteurs aussi bien extra-corporels qu'intra-corporels. Ces échanges radio mis en œuvre à proximité du corps humain concernent également les communications entre les capteurs. Les technologies associées au contexte intra-WBAN ont la particularité d'être de courte portée (Bluetooth, ZigBee, etc.). Constituant le point de départ du processus de suivi, le dispositif intra-WBAN Radio Cognitive est déployé autant au domicile, à l'hôpital qu'en mobilité. L'interopérabilité entre les capteurs, l'autonomie énergétique, la puissance de calcul et la gestion des interférences constituent les problèmes majeurs inhérents à ce contexte. Une partie de notre actuelle contribution est alors consacrée à l'analyse et à la gestion des interférences afin d'apporter une première réponse à la problématique des ondes électromagnétiques. Aussi, nous nous intéressons à la complexité des algorithmes (sondage) et suggérons un mécanisme basé sur l'apprentissage artificiel pouvant permettre de réduire les coûts de calcul. Toutefois, l'idée de réseau complet-WBAN Radio Cognitive soulève une question importante, non-analysée dans cette thèse, méritant une réflexion plus approfondie et un travail d'expérimentation afin d'obtenir un début de réponse. Par réseau complet-WBAN Radio Cognitive, nous insinuons l'implémentation au niveau des capteurs des différentes fonctions cognitives. Dans une moindre mesure, cela sous-entend l'élargissement ou la multiplication des niveaux d'implémentation (sur plusieurs capteurs) et la génération de stratégies de partage de l'intelligence (les capteurs intelligents partageant leur connaissance). L'extension en cours de notre plateforme Radio Cognitive au WBAN apportera certainement un début de réponse à cette question. Notons, enfin que cette question n'est toutefois pas dissociable des problématiques relatives à l'autonomie d'énergie et au renforcement de la capacité de calcul dans les réseaux de capteurs.

5.3.2 Partie inter-WBAN Radio Cognitive

Nous désignons par l'expression inter-WBAN les échanges de données entre le contrôleur et la zone (matériel) de raccordement de la Box médicale Radio Cognitive (Box médicale CR). La Box

1. Dans les réseaux de capteurs, c'est l'appellation donnée au nœud qui collecte les données auprès des autres capteurs.

médicale désigne un outil matériel et logiciel permettant de faire la liaison entre un patient et les centres de soins, les centres de stockage et de traitement des données ainsi que les contacts d'urgence (famille, proche, assistante de vie etc.). Ce terme désigne également un ensemble de solutions logicielles de suivi de patient installées sur un ordinateur ou un smart-phone. Quel que soit le dispositif, il devra non seulement offrir des interfaces de communication dédiées au transfert des données relatives aux signes vitaux mais aussi avoir la capacité de supporter les interactions du type homme-machine. Les communications générées dans ce contexte sont pour la plupart de courte et moyenne (WiFi) portées. Par ailleurs, la partie inter-WBAN Radio Cognitive soulève la problématique de gestion des interférences liées au suivi du patient à domicile ou à l'hôpital. A domicile, les communications sont générées dans un contexte d'Internet ubiquitaire mettant en jeu divers objets du quotidien communicants tandis qu'à l'hôpital, le contexte est assujéti à la sensibilité et à la vulnérabilité aux ondes du matériel médical. L'environnement hospitalier présentant plus de risques autant pour la personne suivie que pour les autres patients, son analyse a été privilégiée dans le cadre de cette thèse. En effet, le risque de dysfonctionnement du matériel pendant un acte médical ou une opération n'est pas à écarter et cela pourrait avoir des conséquences dramatiques. Dans la suite de ce travail, l'idée de gestion des interférences en milieu hospitalier que nous proposons sera illustrée.

5.3.3 Partie Communication extérieure Radio Cognitive

Les transmissions générées par la Box médicale Radio Cognitive et ayant pour destinataires le médecin, les serveurs et les contacts distants forment la catégorie des communications extérieures. Aussi, dans le contexte de mobilité du patient (ambulance, déplacement etc.), les émissions de données de mises à jour initiées par le contrôleur, pour les besoins du suivi en tout lieu sortent du cadre intra-WBAN ou inter-WBAN et prennent par conséquent la propriété de communications extérieures. Ces transmissions sont généralement de longue portée et réservées aux technologies telles que le WiMAX ou le GSM. Les défis importants associés à ces communications extérieures demeurent la garantie d'une connectivité, surtout en mobilité. Principalement, le choix du type d'infrastructure définit le niveau de complexité du problème et détermine l'ensemble des challenges associés à la connectivité et à la mobilité. Ainsi, s'il est vrai qu'une situation de catastrophe naturelle, par exemple, imposerait l'utilisation des réseaux ad hoc Radio Cognitive dans le cadre du secours et de l'assistance, l'idée de réseau d'infrastructure qu'incarne notre architecture cadre parfaitement avec les contextes "normaux" du suivi à domicile, à l'hôpital et en mobilité du patient et conduit à des problématiques plus évidentes et accessibles. En effet, le principe d'une architecture Radio Cognitive pour la santé tel que représenté à la figure 5.1 permet de faire abstraction des aspects de découverte et maintenance des chemins du routage qui viendraient complexifier encore plus le problème de détection des bandes libres. Ainsi, partant de l'architecture proposée, l'appréciation de la connectivité se résume donc à la capacité des nœud Radio Cognitive à explorer les différentes bandes de fréquences ou les diverses technologies afin d'assurer les communications des données de santé sans discontinuité et cela, même en mobilité. La connectivité et la mobilité du patient constituent des points importants amplement évoqués et traités dans la suite de cette thèse. Nous faisons remarquer également que le choix de cette architecture avec une infrastructure préexistante est motivé par le caractère des transmissions d'urgence qui sont privilégiées et les applications sensibles à la latence qui sont envisagées. Toutefois, la question des réseaux à topologie dynamique pour les services de santé n'est pas à ignorer, bien que n'intégrant pas les sujets abordés avec l'actuelle contribution. La e-santé dans les réseaux Radio Cognitive sans infrastructure est une question qui mérite d'être étudiée afin d'apprendre davantage sur les contraintes et les risques auxquels pourraient être confrontés les applications médicales dans le contexte de réseaux ad hoc. Aussi, la catégorie de flux médical (vidéo, texte) adaptée, la caractéristique du contenu véhiculé

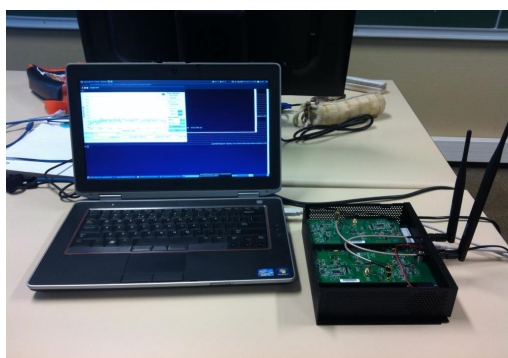
(temps-réel, non temps-réel), l'intérêt, le coût ou encore le contexte (urgence, catastrophe naturelle) favorisant l'usage des réseaux ad hoc constituent autant de critères dont la mesure/évaluation serait appréciable.

L'un des intérêts de cette description de l'architecture, à laquelle nous associons les spécifications technologiques, les contraintes par environnement, est de montrer qu'à travers la perception du contexte, en fonction des ressources disponibles et selon les besoins des applications, la plateforme de suivi Radio Cognitive sera à mesure de s'adapter dynamiquement pour offrir le meilleur service. La présentation d'un prototype matériel et logiciel rendant possible cette adaptation et surtout ayant servi de cadre d'expérimentation de certaines fonctions de notre architecture nous semble à présent utile.

5.4 Présentation du cadre d'expérimentation

La démarche de validation de notre architecture consiste avant tout à identifier les outils (matériel et logiciel) appropriés devant servir à la réalisation d'un ensemble de tests. Notre choix s'est donc porté sur la plateforme GNU Radio [[gnuradio](#)] dont l'association avec le périphérique universel de radio logicielle (USRP : Universal Software Radio Peripheral) permet de simuler les fonctionnalités du réseau intelligent et de reproduire la flexibilité attendue. Pour comprendre ce choix, il est important de noter que le développement des radios définies par logiciel qualifiées de Software Defined Radio (SDR) sur plateforme libre s'est organisé autour des USRP, propriété du groupe Ettus Research [[USRP](#)]. D'un coût raisonnable en comparaison aux équipements professionnels de la famille des SDR proposés, les USRP offrent un niveau de performances (bande passante importante, sensibilité etc.) acceptable pour la réalisation de nos tests. Aussi, l'engouement autour de ces équipements (USRP) favorise l'édition d'une documentation qui rend le système plus compréhensible, facilitant ainsi sa mise en œuvre. Précisons enfin que les USRP sont supportées par gnuradio grâce aux pilotes gr-uhd (gnuradio USRP Hardware Driver). Nous avons donc procédé à l'installation ainsi qu'à la configuration de ces outils à travers les liaisons et interfaces d'ordinateurs. La figure 5.2 illustre parfaitement les composants de cette plateforme dont une description plus détaillée nous semble utile.

5.4.1 La plateforme Radio Cognitive



(a) Sondage du spectre et affichage de la FFT



(b) Test de transmission avec deux nœuds

FIGURE 5.2 – Les outils Radio Cognitive utilisés

Le boîtier USRP1 connecté par un port USB à un ordinateur, sur lequel est préalablement installé le logiciel GNU Radio, permettant alors de reporter le traitement logiciel sur ledit ordinateur forment ainsi l'essentiel des composantes de notre plateforme. L'USRP dans cette configuration représente le dispositif matériel le plus important et mérite d'être particulièrement examiné dans sa composition.

Présentation de l'équipement : L'équipement qui symbolise le matériel Radio Cognitive comprend un convertisseur Analogique/Numérique (C-A/N), un convertisseur Numérique/Analogique (C-N/A), un FPGA (Field-Programmable Gate Array) et une interface USB 2.0. Les convertisseurs du signal analogique vers le numérique, au nombre de quatre (4) dans l'USRP, ont une résolution de 12 bits et une fréquence d'échantillonnage qui est égale à 64 MHz chacun. Cela permet la numérisation d'un signal occupant une largeur de bande de 32 MHz. Les quatre (4) convertisseurs du signal numérique vers l'analogique ont quant à eux une résolution de 14 bits et une fréquence d'échantillonnage de 128 MHz. Ils peuvent ainsi numériser des signaux avoisinant les 64 MHz de bande passante. La FPGA qui est l'entité offrant la qualité de réseau logique reconfigurable et modifiable à l'USRP permet d'amplifier le signal à la réception au cas où celui-ci serait trop faible, améliorant ainsi la fréquence d'échantillonnage. Pour la réalisation des communications, la carte mère (USRP) assigne 4 ports (deux ports pour la réception et deux ports pour l'émission) au branchement de cartes filles diverses. Les cartes filles couvrent les besoins spécifiques à chaque technologie radio. Elles sont ainsi destinées à l'usage des fréquences allant de 0 Hz à plus de 5 GHz, s'étendant par conséquent sur presque tout le spectre radio utilisable. Le tableau 5.1 donne une idée de quelques modèles de cartes filles disponibles ainsi que leurs caractéristiques respectives.

Modèle	Type	Fréquence	B-Passante(MHz)	Puissance(mW)
TVRX2	Rx	50 MHz-860 MHz	10	N/A
RFX900	Tx/Rx, full-duplex	750 MHz-1050 MHz	30	200
RFX1200	Tx/Rx, full-duplex	1150 MHz-1450 MHz	30	200
RFX1800	Tx/Rx, full-duplex	1.5 GHz-2.1 GHz	30	100
RFX2400	Tx/Rx, full-duplex	2.3 GHz-2.9GHz	30	50
WBX	Tx/Rx, full-duplex	50 MHz-2.2 GHz	40	100
SBX	Tx/Rx, full-duplex	400 MHz-4.4 GHz	40	100
XCVR2450	Tx/Rx, half-duplex	2.4 GHz-2.5 GHz	33	100
DBSRX2	Rx	800 MHz-2.35 GHz	1-60	N/A
LFTX	2 Tx	DC-30 MHz	60	1
LFRX	2 Rx	DC-30 MHz	60	N/A
BasicTX	2 Tx	1 MHz-250 MHz	100	1
BasicRX	2 Rx	1 MHz-250 MHz	100	N/A

TABLE 5.1 – Présentation de quelques exemples de cartes filles [USRP]

Ce tableau permet également de découvrir les attributs des cartes filles RFX900 et RFX2400 utilisées dans le cadre de nos travaux d'expérimentation. Le tableau 5.2 liste les différentes versions de cartes mères USRP produites par le groupe ETTUS. A cet effet, notre choix de carte mère s'est opéré après une analyse des coûts financiers associés aux propriétés supportées par chaque type de matériel. L'acquisition de l'USRP1 et son modèle FPGA-Altera Cyclone semblait être une opération judicieuse. L'assemblage de ce matériel ainsi que le processus de traitement quasiment transporté vers l'ordinateur (GNU Radio) offre la flexibilité nécessaire à l'implémentation et aux tests des fonctions

cognitives. Aussi, la diversité de matériels disponibles mise en évidence à travers ces deux tableaux confirme les efforts déployés par les chercheurs et les entreprises afin de proposer des dispositifs encore plus performants en terme de bande passante (B-Passante), de puissance de transmission ou encore de fréquence d'échantillonnage (en MSPS : Mega-Samples Per Second).

Modèle	USRP1	USRP2	USRP N200	USRP N210	USRP E100
Canal RF	2TX/2Rx	1TX/1Rx	1TX/1Rx	1TX/1Rx	1TX/1Rx
Connexion	USB 2.0	Gb-Ether	Gb-Ether	Gb-Ether	100 Mb-Ether
B-Passante	16 MHz	50 MHz	50 MHz	50 MHz	4-8 MHz
C-A/N	12b 64MSPS	14b 100MSPS	14b 100MSPS	14b 100MSPS	12b 64MSPS
C-N/A	14b 128MSPS	16b 400MSPS	16b 400MSPS	16b 400MSPS	14b 128MSPS
MIMO	OUI	OUI	OUI	OUI	NON
FPGA	Altera Cyclone	Xilinx Spartan XC3S2000	Xilinx Spartan XC3SD1800A	Xilinx Spartan XC3SD3400A	Xilinx Spartan XC3SD1800A

TABLE 5.2 – Présentation de quelques versions de cartes mères [USRP]

Le montage, l'installation et la configuration de ces équipements (matériel et logiciel) nous ont par la suite permis de réaliser quelques tests mesurant l'état d'activité dans certaines bandes de fréquence. Présentés au paragraphe suivant, ces résultats aident à mieux comprendre le principe de bandes libres et les possibilités d'utilisation opportuniste offertes dont devra bénéficier l'activité et le mécanisme du suivi de patient exprimés par notre architecture.

Présentation de quelques résultats de test : Différents cadres ont été choisis pour l'exécution de ces tests qui reposent principalement sur les technologies WiFi (norme 802.11b) et GSM. La bande WiFi étant subdivisée en 14 canaux de 22 MHz chacun, dont l'un est inutilisé en France, nous avons avant tout réussi à démontrer l'inégalité du taux d'occupation de chacun de ces canaux. La figure 5.3 présente l'état de l'activité probable d'utilisateurs dans les canaux non superposés 1, 6, 11 et le canal 14. Le choix de scanner les canaux 1, 6 et 11 est justifié par la pratique des fournisseurs d'accès à Internet qui consiste à configurer automatiquement ou par défaut leurs Box récentes sur l'un de ces canaux. Nous avons alors été guidés par la certitude d'une détection de signaux sur ces fréquences. L'objectif n'étant pas d'analyser ces signaux afin d'en déduire la caractéristique des émetteurs ou de la source, nous nous contentons de faire la simple remarque que le canal 6 est plus sollicité que les canaux 1 et 11, pour une même heure et le même emplacement. Le sondage du canal 14, malgré le pic de signal apparent (marque de signal au voisinage de la fréquence 2.480 GHz), confirme son non-usage. Les canaux WiFi étant recouvrants, le signal visible à la figure 5.3(d) est probablement lié aux activités dans les canaux qui lui sont adjacents. Le fait le plus significatif à retenir de cette figure 5.3 est que pour une même période, l'état libre ou occupé des différents canaux varie d'un canal à l'autre. Cette inégalité dans l'activité des utilisateurs est aussi vraie lorsque l'on considère deux environnements différents, comme le démontre la figure 5.4. Outre le temps et l'environnement, la figure 5.5 permet de s'apercevoir que la variation dans le taux d'occupation des bandes de fréquences se vérifie aisément, quel que soit le type de technologie (WiFi, GSM).

L'ensemble de ces expériences permet de mesurer l'importance de la perception de son environnement (radio) et la nécessité pour le nœud Radio Cognitive intégrant l'architecture dédiée au suivi

du patient, de s'adapter afin d'offrir le meilleur service possible. Par exemple, une fois l'état du canal connu pour une période et un environnement donné, le nœud Radio Cognitive pourrait estimer, sur la base des résultats du sondage, la distribution de la puissance de transmission relative à chaque canal et décider, au vu d'un seuil² garantissant la non-interférence, du choix de ses propres paramètres de transmissions (puissance d'émission). Par ailleurs, nous développons cet aspect d'adaptation des paramètres de transmission que nous associons à une idée de choix de stratégies appropriées dans le contexte de mobilité du patient ou encore dans un environnement hospitalier aux prochains chapitres. La figure 5.6 donne une idée sur l'estimation de la puissance de transmission et sa distribution pour le sondage réalisé dans la bande 2.4 GHz correspondant à la figure 5.4(a). On note, à cet effet, une concentration des signaux à travers la valeur de leur puissance (figure 5.6) ou les nuages de points autour des fréquences centrales 2.42 GHz et 2.46 GHz.

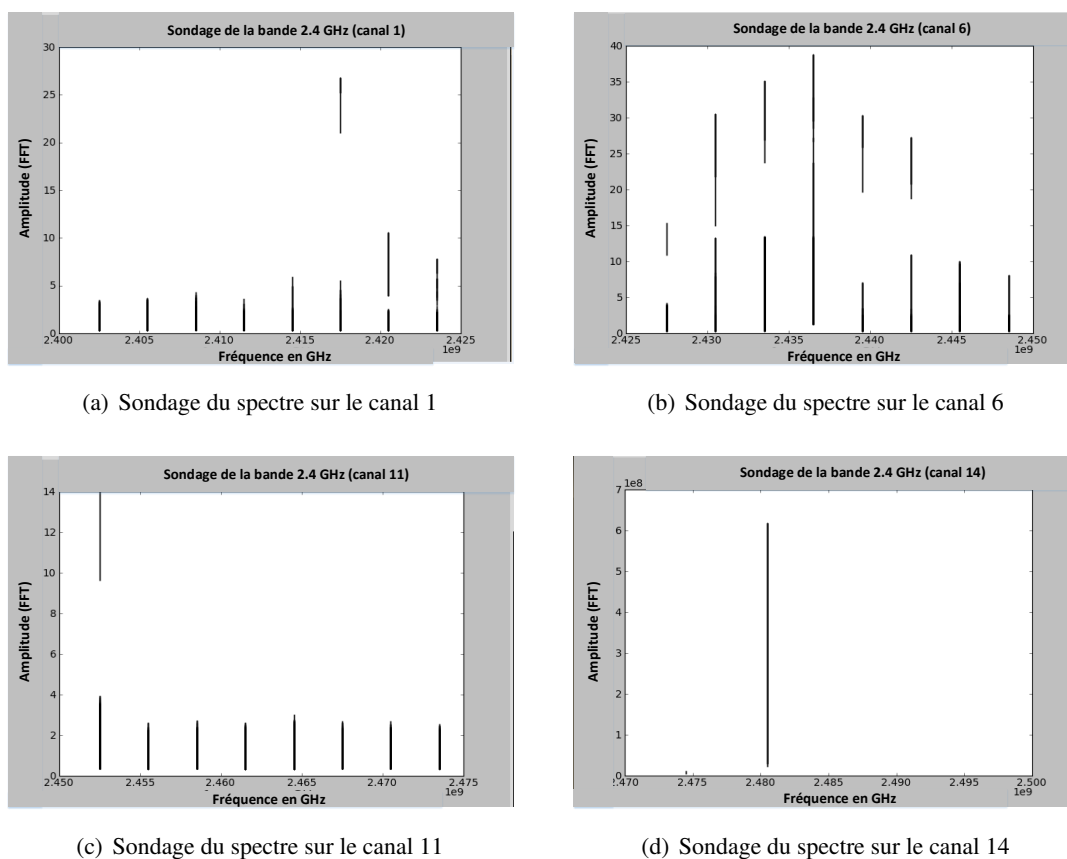


FIGURE 5.3 – Résultats du sondage du spectre sur différents canaux

La présentation du matériel et les tests (sondage) effectués, pour rappel, participent aux étapes de validation de l'architecture que nous proposons. Par ces expériences, nous réaffirmons toute l'importance du module Sondage pour l'ensemble des équipements de l'architecture. Les résultats ainsi obtenus constituent en effet une base importante d'appréciation de la capacité des équipements Radio Cognitive à détecter les trous de fréquences, à prospecter diverses technologies pour le besoin des applications médicales.

2. Nous fournissons plus de détails sur le choix de ce seuil au chapitre suivant.

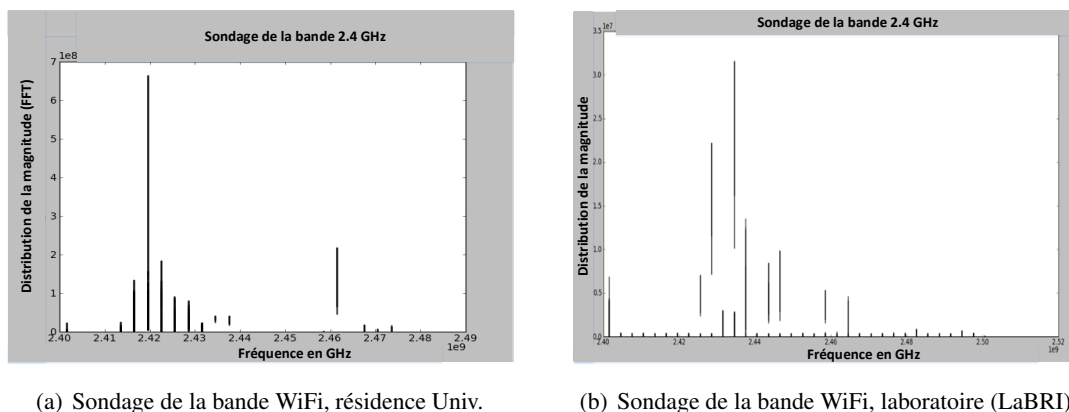


FIGURE 5.4 – Sondage de la bande WiFi dans deux contextes différents

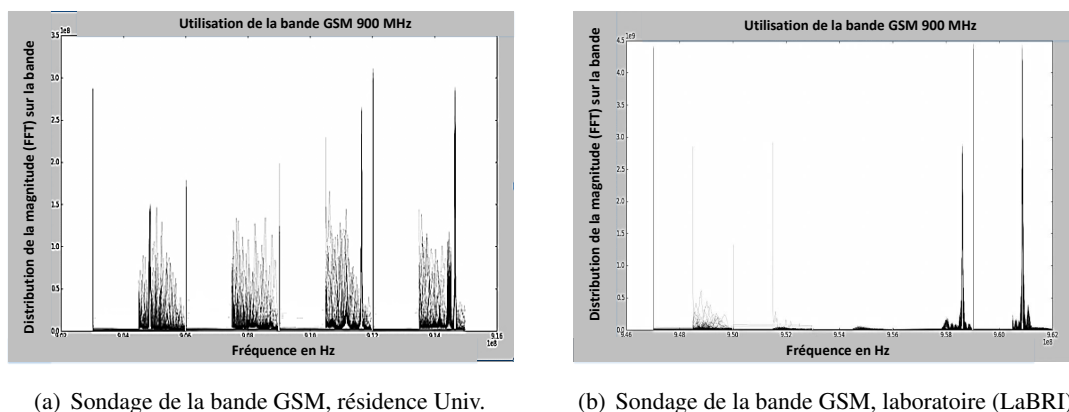


FIGURE 5.5 – Sondage de la bande GSM dans deux contextes différents

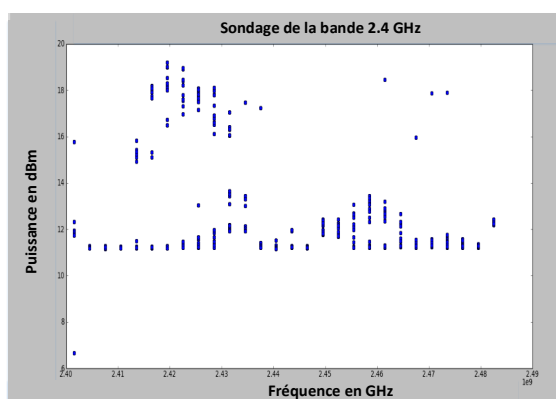


FIGURE 5.6 – Distribution de la puissance de transmission sur les canaux

La disparité mise en évidence dans l'usage de la ressource fréquentielle, tout en confortant le principe de l'accès opportuniste aux bandes, renforce l'idée d'apprentissage de l'environnement radio afin d'en déduire les patterns d'utilisation, voire de modéliser le comportement des utilisateurs. Cela

constitue un défi important à relever afin d'apporter plus de stabilité dans le processus de prise de décision Radio Cognitive. A titre d'exemple, le choix du canal/technologie à sonder en priorité, présentant la plus forte probabilité d'être libre, se verrait facilité. Les outils de l'Intelligence Artificielle (IA) à l'image de l'apprentissage ou encore de la théorie des jeux retrouvent ainsi toute leur place, confirmant de ce fait leur intérêt que nous énoncions déjà dans la partie "état de l'art". Notons que le prochain chapitre s'intéresse entre autres, à l'étude de cette problématique et fourni un exemple possible de modélisation du problème par apprentissage. Notons que c'est sur la base de ces expériences et de cette première proposition menant au renforcement du module Sondage par apprentissage que nous étudierons à titre de nouvelles contributions d'une part les stratégies de partage de ressources pour une gestion efficace de l'effet des ondes. D'autre part, nous proposerons dans la suite de ce travail de thèse, une fonction d'ordonnement de l'accès au canal qui tient compte des contraintes de QoS et du type de contenu (multimédia et temps réel). Toutefois, il est important de préciser que certaines fonctionnalités de l'architecture seront aussi testées dans un cadre d'expérimentation différent. En effet, à la différence du module Sondage et des tests de sauts fréquentiels, l'expérimentation de la capacité du nœud Radio Cognitive à transmettre du contenu vidéo a été réalisée dans le cadre du projet LiCoRNe auquel nous avons pris une part active.

5.4.2 Le projet ANR-LiCoRNe

Le projet LiCoRNe regroupait les Laboratoires et Universités LaBRI³, EURECOM⁴ et UPMC⁵ ainsi que les entreprises Thalès [Thales] et NomoTech [NomoTechn]. Une expérimentation à but démonstratif validant la capacité de la plateforme Radio Cognitive à transmettre du contenu sensible au délai (données de type multimédia) dans un contexte imposant des changements de bande de fréquence (canaux) a marqué son aboutissement. Rappelons que ce projet dont l'un des scénarios important consistait à transmettre des données d'urgence (secours, ambulance, etc.), a eu pour support de tests du matériel, propriété de NomoTech et de Thalès. On dénombre parmi les équipements les plus significatifs une carte fille fonctionnant dans la bande de 5 GHz pour l'USRP, permettant d'émuler un radar. Précisons que la détection du signal radar sur un canal déclenche automatiquement un changement de bande de fréquence pour la suite de la communication. Deux points d'accès avec trois cartes wifi atheros chacune composent par la suite le reste des nœuds. La première opération que nous avons réalisée consistait à vérifier le bon fonctionnement sur les fréquences du DFS (Dynamic Frequency Selection) qui correspond au switching provoqué au niveau du point d'accès par l'évènement radar. La seconde étape concernait le protocole de signalisation et le mode de sélection des canaux pour le switching (CSA : Channel Switch Announcement). En effet, l'idée a été de remplacer le mécanisme de sélection aléatoire (random selection) par une fonction classifiant les canaux. L'algorithme de sélection prévu, à cet effet, prend en compte tous les paramètres recensés dans un « fichier log » (freqset, Channel, Timestamp, RSSI, Width, Noise, Activity, Busy) et effectue une sélection qui tient compte des statistiques à court et long terme. Le résultat de cette expérimentation qui valide la capacité à transmettre dans un contexte contraignant (latence) tout en changeant de bande de fréquence (canal) de manière transparente pour l'application sous-jacente est consultable en ligne [Demo]. Cette idée de changement de bande est largement évoquée aux prochains chapitres dans le cadre de l'une de nos propositions visant à réduire l'effet des interférences sur le matériel médical sensible.

Les deux cadres d'expérimentation susmentionnés offrent largement l'environnement nécessaire à l'exécution des tests, en ce qui concerne le volet expérimental, pour l'ensemble des fonctionnalités

3. Laboratoire Bordelais de Recherche en Informatique

4. École d'ingénieur et centre de recherche en télécommunication.

5. Université Pierre et Marie CURIE.

de l'architecture de communication Radio Cognitive dédiée au domaine de la santé que nous proposons. Toutefois, la question d'une intégration totale de ces outils dans les WBAN (réseau corporel) demeure posée. En effet, le « contrôleur » dans les WBAN représente l'unique équipement donnant l'assurance (capacité de calcul et autonomie énergétique) à pouvoir supporter la complexité de calcul liée aux fonctions cognitives. La conception d'un cadre d'expérimentation additionnel devant prendre en compte ces contraintes de capacité de calcul et d'autonomie d'énergie, semble être une entreprise évidente. Cette question ouvre donc des perspectives de recherche assez intéressantes qui pourraient faire l'objet de nouveaux travaux en renforcement de l'architecture proposée. Enfin, il nous a semblé important de souligner que la démarche ayant abouti à la proposition de cette architecture a donné comme suite, une proposition d'un article de journal que nous référençons à la section 5.5.

5.5 Publication relative à cette partie

L'étude des architectures de communication existantes en e-santé ayant conduit à la proposition de ce cadre (figure 5.1), intégrant la technologie Radio Cognitive, nous a permis de rédiger un article de journal « Survey », décrit en ❶ :

❶ - Journal JNCA, Août 2014 : **Omessaad Hamdi, Mohamed Aymen Chalouf, Dramane Ouattara, Francine Krief**; *eHealth : Survey on research projects, comparative study of telemonitoring architectures and main issues*; Journal of Network and Computer Applications, Journal of Network and Computer Applications (JNCA), DOI information : 10.1016/j.jnca.2014.07.026, AUG-2014.

5.6 Conclusion

En définitive, nous avons proposé dans ce chapitre, et à travers notre architecture de communication, l'idée d'implémentation des fonctions cognitives, afin qu'elles couvrent toute la chaîne de communication des données de santé. Plus complète, comparée aux différents cadres suggérés dans la littérature, cette architecture étend en effet la capacité cognitive aussi bien au réseau corporel entier qu'aux équipements relais (point d'accès, station de base). Ce chapitre a été également mis à profit pour démontrer la caractéristique multi-technologies des équipements Radios utilisés, avec les résultats du sondage réalisé sur diverses bandes de fréquences. Le prochain chapitre s'inscrit dans cette logique de vérification des fonctionnalités validant le bon fonctionnement de cette architecture. En effet, la connectivité qui constitue un critère de performance important en e-santé y sera analysée.

Chapitre 6

Connectivité dans les réseaux médicaux Radio Cognitive

*Internet est le produit d'une combinaison unique de stratégie militaire,
de coopération scientifique et d'innovation contestataire.*

Manuel Castells

Sommaire

6.1	Introduction	66
6.2	Analyse du problème	66
6.2.1	Contexte	66
6.2.2	Verrous techniques	67
6.3	Approche proposée pour le maintien de la connectivité	69
6.3.1	Description du mécanisme de prédiction	70
6.3.2	Les données d'entrée du modèle	71
6.3.3	Distribution de l'énergie sur chaque canal pour une période donnée	72
6.3.4	Description des outils : Apprentissage et Grey Model	73
6.3.5	Résultats	76
6.4	Publications relatives à cette partie	83
6.5	Discussion	83
6.6	Conclusion	84

Résumé

Le suivi régulier des signes vitaux constitue l'objectif principal de l'architecture de communication que nous proposons. Le contexte, pour rappel, repose sur un ensemble de capteurs sans fil hétérogènes équipant le patient et son environnement. L'urgence des transmissions de données médicales générées par ces capteurs appelle à garantir une connectivité pour les nœuds surtout mobiles. L'analyse de cette fonctionnalité constitue le principal objet de ce chapitre. La solution que nous proposons à cet effet est un modèle de prédiction de l'état du canal à sonder. Le modèle associe les techniques d'apprentissage artificiel au système Grey Model afin d'allier faible coût algorithmique et connectivité, indispensable au suivi en temps-réel et en tous lieux du patient.

6.1 Introduction

L'introduction de la Radio Cognitive dans la conception des architectures de communication en e-santé, que nous préconisons, trouve son fondement avant tout dans les prédispositions de cette technologie à assurer une connectivité en tout lieu. En effet, la possibilité offerte d'une utilisation opportuniste des bandes libres ouvre le champ à l'exploration de larges gammes de fréquences comme nous avons pu le constater au chapitre précédent, à travers l'analyse de l'architecture et du matériel associés. Toutefois, subsiste un ensemble de problématiques révélées dans l'état de l'art et également évoquées lors de la description de l'architecture proposée, en matière de détection et de partage des fréquences. En effet, dans le contexte de suivi en temps réel soumis à une éventuelle mobilité du patient et à une variété de contenus à supporter se pose la contrainte de disponibilité des canaux adéquats de transmission en tout temps et en tous lieux. Nous proposons, à cet effet, une fonction de prédiction spectrale venant ainsi renforcer les modules de détection et de partage du spectre et prenant en compte les exigences des applications médicales. Cette solution basée sur la technique d'Apprentissage Artificiel (AA) associée au système Grey Model (GM) facilite l'identification à l'avance des bandes libres afin d'anticiper les sauts fréquentiels imposés souvent par le contexte de mobilité ou encore l'état du canal devenu occupé. La suite de ce chapitre est une analyse du problème de connectivité en section 6.2 suivi de la description du mécanisme de prédiction à la section 6.3. Nous posons un regard sur les résultats et les problèmes encore en suspens à travers une discussion ouverte à la section 6.5 avant de conclure le chapitre par la section 6.6.

6.2 Analyse du problème

6.2.1 Contexte

Le suivi des signes vitaux du patient, qu'il soit en mobilité, dans un centre hospitalier ou à domicile engendre une collecte de données par les capteurs, un traitement minimal au niveau du nœud local intelligent (fixe : Box médical ou mobile : Smart-phone, PDA, etc.) et génère un ensemble de transmissions allant des alertes aux mises à jour tel que cela est relevé par l'architecture proposée. Le caractère sensible de ces informations justifie l'utilisation d'équipements Radio Cognitive (le nœud intelligent), capable de surmonter le défi de connectivité. En effet, un équipement Radio Cognitive capitalise et exploite au besoin différentes interfaces de communication (WiFi, Bluetooth, GSM etc.). Selon le besoin de l'application médicale, l'urgence de la communication, la disponibilité fréquentielle, la Radio Cognitive peut choisir l'interface, et donc la technologie adéquate, pour assurer les transmissions. Cela suppose également la nécessité de disposer de canaux de communication de manière permanente sur les fréquences cibles. Par conséquent, et dans le but d'assurer une connectivité permanente entre le patient suivi dans son environnement (fixe ou mobile) et les acteurs extérieurs (les intervenants médicaux, les applications médicales, les serveurs de stockage/traitement, etc.), le dispositif de sondage de la Radio Cognitive est sollicité. En effet, il constitue le point de départ dans le processus d'exploration des différentes technologies et donc des interfaces disponibles sur les équipements, conduisant à offrir la bande fréquentielle idéale aux applications de santé. De plus, de la célérité du module de détection de bandes (Sondage), dépend largement la capacité du nœud Radio Cognitive à assurer la connectivité. Le principal objectif dans cette contribution, est donc de proposer un mécanisme de renforcement du module Sondage afin d'accroître son efficacité dans la recherche de bandes libres. Une présentation générale des problématiques techniques liées aux opérations de sondage du spectre permettra de mieux appréhender l'ampleur des défis à relever à ce niveau pour plus d'efficacité dans les communications Radio Cognitive.

6.2.2 Verrous techniques

Le sondage du spectre est tributaire d'un ensemble de contraintes techniques allant du coût à réduire pour les WBAN à la durée de l'opération à contrôler pour la nécessité de performances (connectivité). Pour une meilleure appréhension des difficultés techniques, nous résumons les différentes méthodes standards de sondage du spectre existantes en associant à chacune ses avantages et inconvénients dans le tableau 6.1.

Technique de détection	Avantages	Inconvénients
Détection énergétique	(+) Pas d'analyse discriminante, moins complexe, faible coût.	(-) Moins fiable, imprécis, ne supporte pas un très faible SNR, ne distingue pas PU et SU.
Détection cyclo-stationnaire	(+) Indifférent au SNR, robuste, fiable, distingue PU et SU.	(-) Analyse discriminante, Coût élevé.
Détection hybride	(+) Combine les 2 avantages	(-) Combine les 2 inconvénients

TABLE 6.1 – Tableau comparatif des techniques de détection du spectre

Détection énergétique : Elle est basée sur les signaux stationnaires et suppose que le bruit est gaussien de variance connue. Cela permet théoriquement (au radiomètre) de détecter, à un niveau acceptable, le rapport du signal sur le bruit. Plus précisément, un seuil préfixé permet de statuer sur la présence d'un signal de communication ou non. En pratique, ce mécanisme semble assez limité car manquant évidemment de précision. Cette insuffisance est la conséquence de la méconnaissance du bruit et de ses variations. **La méthode cyclo-stationnaire** est basée sur une reconnaissance de signaux cyclo-stationnaires suivant le principe d'analyse discriminante. En effet, une phase d'apprentissage sur des exemples de signaux préalablement étiquetés entre bruit et bruit plus signal est nécessaire. La détection est par la suite ponctuée de tests consistant à prédire le format (bruit ou bruit + signal) d'un nouveau signal connaissant le modèle préalablement appris. En général, l'on associe la méthode énergétique à celle cyclo-stationnaire pour aboutir à un **détecteur hybride** combinant leurs deux avantages mais « sommant » également leurs inconvénients. Le sondage du spectre tel que nous allons l'explicitier à travers les processus allant de la détection au partage du spectre est une activité très récurrente, par conséquent très coûteuse.

Récurrence du sondage : Pour une meilleure compréhension du processus général d'allocation de canaux de communication aux applications dans le cadre de notre architecture (e-santé) et pour s'apercevoir de la perpétuelle sollicitation du module Sondage, nous résumons le fonctionnement d'un nœud Radio Cognitive à travers l'organigramme de la figure 6.1.

Cette figure fait apparaître au moins deux événements importants imposant l'exécution de la fonction de détection. La mobilité spectrale, lorsque la qualité de service ou l'état d'occupation du canal l'impose, et la prise de décision qui ramène au Sondage tant que le canal détecté semble inapproprié. Cette exigence est surtout liée au besoin de communication exprimé par les applications médicales où

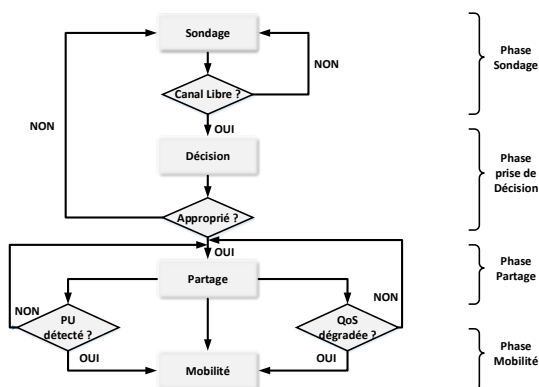


FIGURE 6.1 – Fonctionnement du nœud Radio Cognitive

une bande (canal) appropriée (largeur de bande par exemple) devra être détectée. La récurrence de ces opérations et le temps mis par le nœud concerné dans la recherche de bandes libres constituent des facteurs qui impactent sérieusement la connectivité. Aussi, on note que durant la communication des données de santé, le sondage devra se poursuivre afin de rester informé de l'arrivée éventuelle d'un utilisateur prioritaire possédant une licence (PU). C'est la première mesure permettant au nœud de gérer efficacement les interférences. Assurer la connectivité dans le contexte WBAN Radio Cognitive exige une analyse et une prise en compte des contraintes suscitées. En effet le sondage spectral pour la détection de bandes libres constitue l'opération la plus coûteuse en termes de temps de traitement et de consommation énergétique pour un équipement radio mobile de suivi du patient. L'autonomie en énergie à maximiser pour tout équipement médical mobile ne saurait donc tolérer un perpétuel sondage qui apparaîtrait inefficace et souvent inopportun. Dans la logique consistant à trouver des mécanismes alliant faible coût algorithmique et précision des résultats du sondage, on retrouve les approches basées sur la prédiction. Ainsi, des solutions de prédiction s'appuyant sur les mesures et les probabilités des états des canaux (libre ou occupé) sont prévues afin de réduire considérablement la fréquence du sondage tout en assurant un choix raisonné du canal à sonder en priorité. Toutefois, ces solutions de prédictions présentent des faiblesses qu'il semble important de souligner.

Les algorithmes de prédiction existants et intérêt de Grey Model : Les algorithmes existants se sont plutôt concentrés sur la modélisation de la prédiction du handover¹ selon Butun et al. [Butu 10], laissant peu explorée la prédiction spectrale en environnement mobile. Pourtant, il faut admettre que tout changement de cellule implique de manière implicite l'exécution du processus de détection de bandes libres dans le cadre de l'architecture de communication en e-santé que nous proposons. Par conséquent, toute prédiction du handover devrait se faire en conjonction d'une prédiction spectrale. Selon Liu et al. [LiuR 10], quelques études sur la prédiction spectrale utilisant des approches telles que la théorie des jeux et l'apprentissage artificiel sont proposées mais dans un cadre statique. Ce qui pose toujours la problématique de mobilité ou du handover associé à une prédiction de la disponibilité spectrale dans la nouvelle cellule pour le suivi du patient en tous lieux. En effet, le suivi est assujéti aux contraintes de mobilité du patient et aux changements de fréquence induits. Notons alors que les techniques d'apprentissage artificiel tels que le modèle de Markov caché et les réseaux de neurones se révèlent particulièrement bien adaptées pour la prédiction du spectre mais restent encore limitées par leur utilisation dans un cadre très statique. Pour rappel, le cadre statique auquel nous faisons allusion

1. Ensemble d'opérations permettant à l'équipement mobile de changer de cellule radio sans interruption.

exprime l'absence de changement de cellule. De plus, il est important de préciser que le handover déclenche naturellement une nouvelle période d'entraînement pour les algorithmes d'apprentissage, ce qui engendre un délai non négligeable pour le sondage, mais aussi pour la connectivité d'un dispositif de suivi médical. D'après Hua et Ruo-en [HuaR 09] et Ye [YeXu 10], d'autres modèles standards de prédiction moins envisagés dans les réseaux Radio Cognitive utilisant les techniques statistiques telles que AR (Auto Regressive), MA (Moving Average), ARMA (Auto Regressive Moving Average), ARIMA (Auto Regressive Integrated Moving Average) sont aussi explorés.

Ces modèles exigent la mise à disposition de données complètes et assez représentatives. Les études dont le but serait de réduire l'impact des changements de cellule ou de bandes de fréquences sur la connectivité, par une construction de modèles de prédiction et d'anticipation moins coûteux, permettront de garantir l'efficacité des transmissions permanentes pour le processus de suivi du patient. D'où l'approche que nous suggérons, composée d'un modèle à information incomplète tel que la technique du Grey Model auquel l'on associe une fonction d'apprentissage.

6.3 Approche proposée pour le maintien de la connectivité

La solution que nous proposons consiste à ajouter une fonction de prédiction au module de sondage spectral, pourvoyeur de canaux (bandes de fréquence) aux applications de communication e-santé de notre architecture. Le principe de ladite fonction est illustré par la figure 6.2.

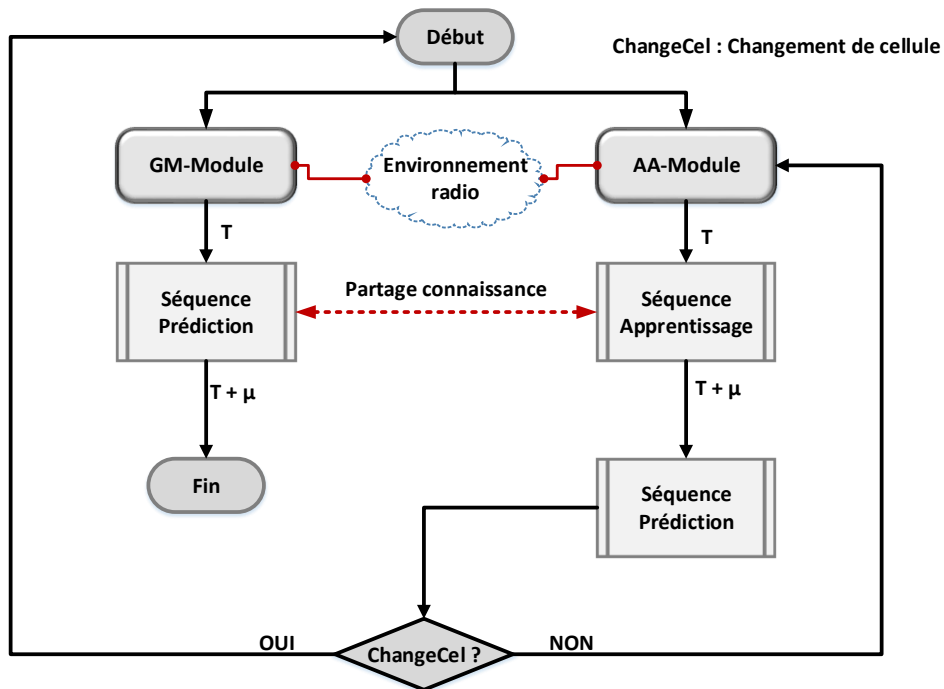


FIGURE 6.2 – Principe de prédiction proposé

Cette fonction associe les techniques d'apprentissage (AA-Module) au système Grey Model (GM-module) pour évaluer la probabilité d'occupation des canaux et ainsi guider la décision relative au choix du canal à sonder. Le Grey Model permettra de dissimuler le temps dévolu aux séquences d'entraînement et de minimiser les coûts computationnels. L'évaluation préalable d'une part de la dis-

ponibilité du spectre dans la future zone en situation de mobilité du patient et d'autre part des bandes libres d'une même zone afin d'anticiper les changements de canaux constituent les problématiques traitées. Nous illustrons cette réponse apportée aux questions de récurrence et de coût de l'activité du sondage à travers la figure 6.2 qui fait une description du mécanisme de prédiction. Plus précisément, avec ce mécanisme, le canal ayant la plus forte probabilité d'être libre est sondé en priorité, réduisant ainsi le nombre de tentatives échouées.

Autre intérêt de la fonction de prédiction proposée : Au-delà du coût de l'opération (sondage) minimisé pour les équipements de l'architecture e-santé, cette solution dote le nœud Radio Cognitive d'un caractère d'anticipation. En effet, tout en limitant le nombre des opérations de sondage, elle a le mérite surtout de l'encadrer en notifiant sa réalisation au moment opportun ; le moment étant à chaque fois évalué à l'avance et décidé par anticipation. Par ailleurs, les opérations de sondage et de transmission effectuées en concomitance dans ce cas précis réduisent les délais. Pour s'en apercevoir, il suffit de se référer aux deux étapes importantes de la communication dans notre architecture que sont le sondage et la partage du spectre. Le partage inclut un ensemble d'actions de signalisation et de synchronisation. A cela s'ajoute la durée du sondage. Le passage d'un canal à l'autre se faisant suite à l'arrivée d'un utilisateur prioritaire, à la dégradation de la qualité de service sur la bande d'origine ou encore suite à la mobilité du patient/spectre, ce temps de changement de bande de fréquence apparaît non négligeable pour notre architecture e-santé.

La fonction de prédiction, que nous suggérons, est donc un atout supplémentaire pour les modules Sondage et Partage des équipement Radio Cognitive de l'architecture de communication e-santé proposée. De plus, le principe de fonctionnement Radio Cognitive assez répandu consistant à faire du sondage multiple afin de construire une base de données relative aux canaux libres à utiliser n'est plus un impératif, le sondage pouvant maintenant être réalisé au besoin. Fournir à présent plus de détails sur cet algorithme de prédiction permettra de mieux cerner son fonctionnement et la complémentarité existant entre les deux techniques (Apprentissage : AA-Module et Grey Model : GM-Module) impliquées.

6.3.1 Description du mécanisme de prédiction

La théorie du Grey Model vue par Julog [Julo 02] est connue pour l'analyse des problèmes à informations incomplètes ou incertaines. Elle présente comme principal avantage sur les techniques statistiques de prédiction standards, telles que AR, MA, ARMA et ARIMA, l'aptitude à se satisfaire d'une quantité minimale de données d'entrée pour réaliser ses prédictions. Les systèmes de prédiction basés sur le Grey Model s'appliquent à de nombreux domaines dont la météorologie avec la prédiction de la température [Huan 97], les finances [Chou 07], les réseaux de télécommunication [Jiec 10], les activités militaires [YuZh 09], les analyses médicales [HsuK 06] entre autres. Notre solution s'appuie sur cette capacité à prédire sur la base de données incomplètes, souvent peu significatives, offerte par le Grey Model et le faible coût de traitement des algorithmes d'apprentissage une fois bien entraîné. En effet, le nœud intelligent du patient exploite le module d'Apprentissage (AA-Module) et le module Grey Model (GM-Module) dans une nouvelle zone (patient en mobilité) ou au début de son activité. Le Grey Model servant à ce stade à la prédiction spectrale pendant que le module apprentissage exécute les séquences d'entraînement à partir des données de l'environnement radio et éventuellement des résultats du Grey Model. La fonction de prédiction revient alors au moteur d'apprentissage, une fois son efficacité prouvée par la pertinence de ses résultats et qu'aucun besoin de changement de zone (ChangeCel) n'est éprouvé tel que définit par la figure 6.1. L'échange d'informations entre le module

GM-Module et le module AA-Module permet d'enrichir d'une part l'échantillon d'apprentissage par les résultats prédits au niveau du module GM-Module et d'autre part d'informer ce dernier lorsque la phase d'entraînement s'achève pour que la prédiction revienne au module AA-Module tel que décrit par le processus (figure 6.1). Il est important de signaler que cette fonction combinant deux modèles (Grey Model et Apprentissage) a le mérite d'allier efficacité avec les prédictions du GM-Module sans aucune latence dommageable et faible coût algorithmique avec un module d'apprentissage (AA-Module) bien entraîné. La fonction, ainsi décrite, utilise comme paramètres divers types de données que nous retraçons à la section 6.3.2.

6.3.2 Les données d'entrée du modèle

Nous nous sommes particulièrement intéressés au canal WiFi composé de quatorze sous-canaux dans le cadre de ces tests et expérimentations. Ce choix est justifié par les caractéristiques de la plateforme Radio Cognitive dont nous disposons. Capable d'explorer les fréquences 2.4 GHz et 900 MHz notre priorité s'est alors portée sur le WiFi qui ne nécessite aucune autorisation auprès des autorités de régulation contrairement au GSM. Toutefois, précisons que le principe adopté au cours de ces tests reste similaire pour les autres types de canaux. En outre, prenant une bande cible, c'est-à-dire un sous-canal WiFi, son spectre fréquentiel fait une nouvelle fois l'objet d'une partition en plusieurs sous-canaux dont la taille est fonction des besoins de l'application médicale. Chaque nouveau sous-canal peut être soumis à un sondage périodique et selon le besoin. Notre objectif étant de réaliser une distribution de probabilité de l'état du sous-canal (libre ou occupé) sur les futures périodes, cela nous amène à fonder notre raisonnement sur un ensemble de paramètres décrits ci-dessous :

1. **L'énergie détectée sur chaque sous-canal** : Les échantillons d'énergie détectée constituent les premiers paramètres de la fonction qui vont permettre de construire les états des canaux (occupé ou libre), base des futures prédictions. Pour la mesure de l'énergie et l'identification du signal sur chaque canal, nous utilisons la technique de détection énergétique, peu coûteuse et appropriée dans notre architecture WBAN. Rappelons que la comparaison de l'énergie reçue par l'équipement radio, avec un seuil prédéfini selon le type du canal, permet de trancher sur la présence ou non d'un signal et donc d'un utilisateur prioritaire (PU) telle qu'illustré à la figure 6.3. Le principe est également rappelé par l'équation 7.2 à deux hypothèses, H_0 désignant un canal libre (OFF) et H_1 illustrant un canal occupé (ON).

$$H(x) = \begin{cases} H_0 : & y(t) = n(t) \\ H_1 : & y(t) = x(t) + n(t) \end{cases} \quad (6.1)$$

Où $y(t)$ représente le signal reçu par l'équipement médical-radio de communication, $n(t)$ le bruit gaussien et $x(t)$ le signal de détection de présence.

2. **Les données statiques de l'environnement radio** : Les données statiques restent déchiffrables et très peu évolutives avec le temps. Il s'agit ici du nombre de canaux d'une bande donnée, le type de la bande ou la technologie associée, la fréquence centrale de chaque canal, le seuil énergétique de chaque canal entre autres.
3. **Les données dynamiques de l'environnement radio** : Les données dynamiques, beaucoup plus aléatoires et évolutives, comprennent l'énergie sur chaque canal, la puissance d'émission sur chaque canal, le nombre d'utilisateurs primaires dans une zone ou cellule, le nombre de canaux libres à un instant donné entre autres.

Les données radios à maîtriser ou que nous privilégions dans le cadre de nos tests relatifs à l'architecture de communication e-santé sont celles dynamiques. L'énergie sur un canal paraît de loin le facteur le plus important influençant l'ensemble des paramètres. Son estimation et sa corrélation avec les autres informations, une comparaison avec le seuil énergétique représenté par μ sur la figure 6.3, permet de marquer un canal par un état libre ou occupé. Cette distribution de probabilité guide ainsi la prise de décision se rapportant au choix du canal à sonder. La prédiction de la distribution de l'énergie sur les sous-canaux constitue alors la priorité des opérations de tests à réaliser afin d'évaluer le critère de connectivité du nœud radio de suivi du patient en tous lieux. Toutefois, le sondage des canaux WiFi réalisé grâce à la plate-forme GNU-Radio au chapitre précédent montrent, pour rappel, l'importance de certaines informations environnementales dans la prise de décision qu'il faudra intégrer ou prendre en compte en pratique pour aboutir à une fonction/prédiction plus complète. En effet, le constat, déjà fait, est que certaines sous-bandes paraissent encombrées pendant que d'autres sont libres. L'état d'une sous-bande change en fonction du jour et de l'heure, de la zone géographique pour la même bande de fréquences (WiFi). C'est d'ailleurs sur ce principe d'occupation périodique matérialisé par la distribution de l'énergie sur les bandes dans le temps, tel que représenté à la section 6.3.3, que repose le présent mécanisme de prédiction.

6.3.3 Distribution de l'énergie sur chaque canal pour une période donnée

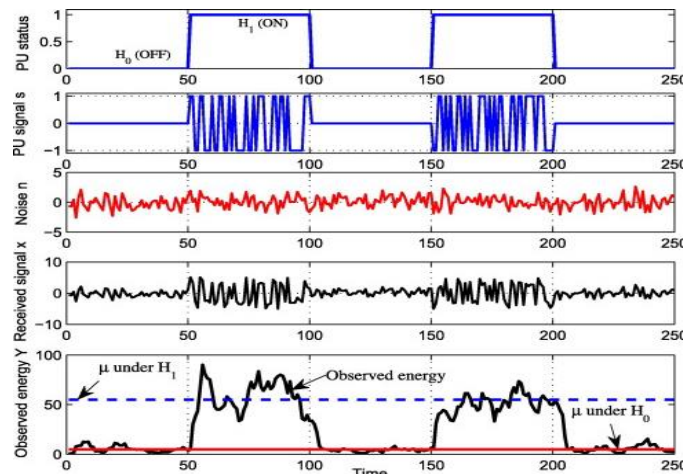


FIGURE 6.3 – Illustration de l'interprétation du signal reçu

L'équipement radio cognitive du patient étant capable de mesurer l'énergie sur un canal à chaque instant, alors notre solution consiste en une distribution de cette donnée et l'estimation de sa probabilité sur les futures périodes. Cela repose sur une série de mesures (base de connaissances) à l'instant t , permettant de faire l'ajustement nécessaire de la prédiction réalisée en $t - 1$ et cette correction d'erreur permettant de faire une meilleure prédiction de l'instant $t + 1$ par apprentissage. De manière plus générale, cette évaluation/prédiction aide à l'estimation de la probabilité d'occupation du canal au temps $t + k$, d'anticiper le choix du canal en k à sonder et par conséquent les opérations de sondage et de saut de fréquence (canal) dès le temps $t + j$, avec $j < k$. La figure 6.3 montre la relation entre le signal reçu (Received signal X) sur le canal, l'énergie (Observed energy Y) qui en découle ainsi que l'interprétation de la mesure obtenue par une distinction entre signaux des utilisateurs primaires (PU signal s) et le bruit gaussien (Noise n). Le niveau d'énergie ou la puissance du signal déterminant

la présence (H_1 ON) ou l'absence (H_0 OFF) d'un utilisateur primaire ou secondaire (SU). Notons toutefois que les mesures d'énergie sur les sous-canaux de la bande WiFi réalisées par l'équipement Radio Cognitive du patient en temps-réel fournissent des données brutes nécessitant un traitement spécifique afin d'obtenir des informations fiables. Les mesures avec la plate-forme GNU-Radio démontrent, en effet, la nécessité d'appliquer des algorithmes telle que la Transformée de Fourier rapide (FFT) afin d'harmoniser ces données avec le domaine fréquentiel. Plus précisément, la FFT devra permettre la transformation des données discrètes du domaine temporel vers le domaine fréquentiel. Ces données mesurées en temps réel, une fois traitées, serviront à alimenter les modules GM-Module et AA-Module pour servir de valeurs réelles d'échantillon. Le Grey Model se satisfaisant de très peu de données d'entrée (INPUT) pour réaliser ses prédictions, les premières mesures qui alimentent ce module permettent d'une part de passer immédiatement aux prédictions (gain en temps et continuité de prédiction, par dissimulation du temps d'entraînement) et d'autre part de construire la base de connaissance du module d'apprentissage (AA-Module) qui a besoin d'échantillons assez représentatifs. Le module apprentissage artificiel (AA-Module) combine ainsi ces mesures (échantillons réels) avec le résultat des prédictions du Grey Model pour constituer sa base de connaissance. Les détails que nous fournissons à la section 6.3.4 permettent de mieux comprendre la conception de ces modules et les différents outils rattachés.

6.3.4 Description des outils : Apprentissage et Grey Model

Pour les besoins de simulation du modèle, nous avons opté pour les chaînes de Markov comme technique d'apprentissage associée au GM (1,1).

Choix et description du modèle d'apprentissage (AA-Module) : Différents outils d'apprentissage existent à l'image de la logique floue (Fuzzy Model) ou encore du réseau bayésien. Cependant, notre premier objectif n'est pas de les comparer pour en désigner le mieux adapté. Pour l'instant, nous assumons que quelle que soit la technique d'apprentissage utilisée, sa combinaison avec le Grey Model constitue un atout important en terme de coût de calcul pour les équipements radio e-santé impliqués dans l'architecture. Le choix du modèle Markovien, à cet effet, est juste motivé par sa fonction état-transition moins complexe à modéliser et sa capacité de circonscription des erreurs relatives aux prédictions. Dans cette solution, la maîtrise des erreurs constitue la variable complexe conditionnant la précision des valeurs prédites. La technique de correction d'erreurs est basée sur l'observation d'une courbe de tendance, et seules les valeurs les plus récentes décrivant la tendance de la série sont pertinentes pour prédire les valeurs futures. En effet, pour un ensemble de données d'échantillonnage $X(1), X(2), X(3), \dots, X(N)$, une fonction d'ajustement appliquée aux valeurs permet d'évaluer les tendances futures en assignant un poids aux valeurs précédentes. La fonction d'ajustement en k sur un ensemble de données $X(N)$ par exemple donne :

$$\hat{X}(k) = p_1 x_k + p_2 x_{k-1} + p_3 x_{k-2} + \dots + p_n x_{k-n+1} \quad (6.2)$$

Avec $p_1, p_2, p_3 \dots p_n$ représentant les poids assignés aux données, les valeurs les plus récentes bénéficiant des poids les plus élevés comme suit :

$$\hat{X}(t) = \alpha * [x_{t-1} + (1 - \alpha) x_{t-2} + (1 - \alpha)^2 x_{t-3} + \dots + (1 - \alpha)^{t-1} x_1] \quad (6.3)$$

Avec α et $[1, (1 - \alpha), (1 - \alpha)^2, (1 - \alpha)^3, \dots, (1 - \alpha)^{t-1}]$ caractérisant respectivement le coefficient d'ajustement et les poids affectés aux différentes valeurs.

La valeur de α constituant le facteur essentiel à maîtriser est ainsi modélisée par les chaînes de Markov, composées d'un ensemble d'états et de transitions. Les valeurs de α , sont réparties sur l'intervalle $\phi [0; 1]$ subdivisée en un ensemble de sous-intervalles égaux où chaque sous-intervalle représente un état possible du modèle de Markov, comme indiqué à la figure 6.4. A partir de la distribution initiale des différentes valeurs de α dans le temps sur les différents états/intervalles et les différentes transitions observées d'un état à l'autre, on calcule les probabilités de transitions futures de α . Ainsi, la probabilité de transition d'un état i à un état j , notée P_{ij} est évaluée comme suit :

$$P_{ij} = Q_{ij}/Q_i \quad (6.4)$$

Avec Q_i représentant le nombre de fois que α reste dans l'état/intervalle i et Q_{ij} , le nombre d'occurrences de transitions entre l'état/intervalle i et l'état/intervalle j . Ainsi avec cinq états différents, choix fait par l'algorithme en fonction des variations de α , les valeurs possibles de P_{ij} forment la matrice de transition M suivante :

$$M = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} & P_{35} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} & P_{45} \\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54} & P_{55} \end{pmatrix}$$

Notons qu'à la distribution initiale est associée un vecteur initial exprimé par :

$$\Phi^{(0)} = [\phi_1^{(0)} \phi_2^{(0)} \phi_3^{(0)} \phi_4^{(0)} \phi_5^{(0)}] \quad (6.5)$$

Ils constituent les probabilités possibles de transitions entre les états. Le calcul de la distribution des états futurs de transition $(t + 1)$ à partir de $\Phi^{(0)}$ est alors obtenu par :

$$\Phi^{(t+1)} = \Phi^{(0)} M^i \quad (6.6)$$

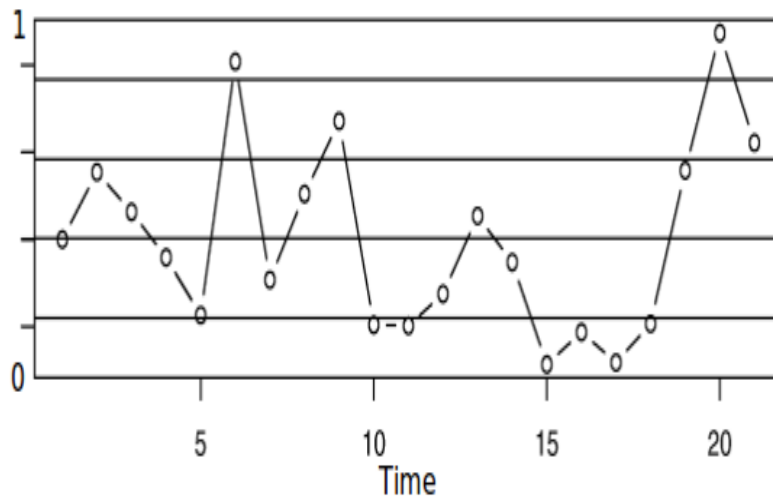


FIGURE 6.4 – Illustration du mécanisme état-transition

Choix et description du Grey Model (GM-Module) : Selon une étude comparative réalisée à l'Université de Bologne [Univ 10], il existe très peu d'écart en terme d'efficacité de prédiction entre le Grey Model et particulièrement la théorie du filtre de Kalman discret. Les résultats obtenus dans cette étude montrent alors une diversité de choix possible de modèles pour la modélisation du mécanisme de prédiction. Cependant, lorsque nous plaçons ces modèles et principalement le filtre de Kalman dans le contexte de notre architecture e-santé de suivi en tout lieu, il se pose avant tout la question du coût de calcul et les contraintes d'autonomie énergétique pour les équipements mobiles. En effet, le filtre de Kalman, par exemple, nécessite une initialisation correcte de ses matrices à l'instant t_0 et surtout, devra disposer d'estimations de matrices de covariance d'erreurs modèle et d'erreurs des observations. L'initialisation ou la mise en route de l'algorithme de filtrage est donc un problème majeur avec des échantillons de données à fournir au préalable contrairement au Grey Model dont les mesures les plus récentes suffisent à construire le modèle sans grande difficulté. Aussi, la dimension du filtre de Kalman déterminée à l'initialisation et définie par la dimension des matrices de covariance des erreurs et des observations est une donnée impactant le coût de calcul. La technique du Grey Model est donc de loin le modèle de prédiction le mieux adapté à notre contexte où le défi dans la durée reste la réduction au maximum du coût de calcul et la production de résultats de prédiction satisfaisants. En effet, le Grey Model constitue le meilleur compromis entre célérité de prédiction et faible coût de calcul. Son association ou sa combinaison avec les algorithmes d'apprentissage bien entraînés semble alors être la solution la moins coûteuse possible applicable au mécanisme de prédiction (figure 6.2) pour le suivi en mobilité du patient proposé. Parmi ses versions, le $GM(1, 1)$ reste le plus appliqué dans les systèmes de prédiction selon Sheng et al. [Shen 11]. D'autres modèles à plusieurs variables tel que le $GM(1, N)$ plus complexe à modéliser existent mais nous utiliserons dans le cadre de cette étude le $GM(1, 1)$ largement suffisant pour la prédiction de l'énergie du canal singularisé par une seule variable.

Procédure de modélisation du GM(1,1) :

1. Le système prend en entrée une séquence de valeurs, correspondant à l'énergie mesurée par l'équipement radio de l'utilisateur/patient sur chaque sous-canal x , X , décrivant l'ensemble des sous-canaux (b_1, b_2, \dots, b_N) , avec la valeur de X_0 représentant la séquence initiale où $x^0(t)$ correspond à la sortie du système à l'instant t . On note alors que :

$$X_0 = [x^0(1), x^0(2), x^0(3), \dots, x^0(n)] \quad (6.7)$$

2. A partir de la séquence initiale définie plus haut, le système génère une nouvelle séquence X_1 , avec comme nouvelle valeur :

$$X_1 = [x^1(1), x^1(2), x^1(3), \dots, x^1(n)] \quad (6.8)$$

Où

$$x^1(t) = \sum_{i=1}^t x^0(m) \quad (6.9)$$

La variable m correspondant ici à la suite de mesures réalisées sur les sous-canaux.

3. L'équation différentielle du premier ordre obtenue à partir de X^1 est donnée par :

$$\frac{dx^1(t)}{d(t)} + ax^1(t) = b \quad (6.10)$$

Les coefficients a et b étant respectivement celui reflétant la tendance prédictive et celui de contrôle exprimant la partie de l'information connue ainsi que celle de l'information non connue du modèle.

4. Les estimations des paramètres ou les coefficients de la matrice $[a, b]^T$ sont alors obtenus par la méthode des moindres carrés sachant que :

$$[a, b]^T = (B^T B)^{-1} B^T y_N \quad (6.11)$$

Où

$$B = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2}(x^1(1) + x^1(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(x^1(2) + x^1(3)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(x^1(3) + x^1(4)) & 1 \\ \dots\dots\dots & \\ \dots\dots\dots & \\ -\frac{1}{2}(x^1(n-1) + x^1(n)) & 1 \end{pmatrix}$$

Et $y_N = [x^0(2), x^0(3), x^0(4), \dots, x^0(n)]$; n étant la taille de la séquence définie par le système.

5. Sur la base de ce qui précède, la fonction de prédiction devient alors :

$$\bar{x}^1(t) = (x^1(1) - \frac{b}{a})e^{-at} + \frac{b}{a} \quad (6.12)$$

6. Enfin, la valeur prédite au temps $t + 1$ pour chaque sous-bande est obtenue par :

$$\bar{x}^0(t+1) = \bar{x}^1(t+1) - \bar{x}^1(t) \quad (6.13)$$

Après cette description des fonctions, nous détaillons à présent les résultats obtenus lors des simulations qui permettent de valider le fonctionnement du mécanisme.

6.3.5 Résultats

L'implémentation de la fonction d'apprentissage et les tests réalisés ont été possibles grâce à notre observation/analyse réelle du spectre à travers la plate-forme Radio Cognitive qui a facilité l'obtention des paramètres utilisés pour les simulations. Plus précisément, les valeurs d'entrée du module apprentissage (AA-Module) ont été obtenues à travers les observations des résultats du sondage du spectre réalisé au chapitre précédent. Quant à la fonction de simulation du Grey Model, elle prend en paramètre les valeurs générées par la fonction *AWGN* qui permet d'ajouter des échantillons de bruit blanc gaussien au vecteur ou au signal initial. Notons que le principal objectif de ce travail de simulation du Grey Model est de montrer la célérité d'exécution/prédiction de ce modèle, faisant ainsi la preuve que cette technique constitue le complément idéal pour l'algorithme d'apprentissage (AA-Module).

Simulation du module Grey Model :

Avant toute description des résultats de simulation du Grey Model, il nous apparaît essentiel de montrer cette différence déjà évoquée entre ce modèle et les techniques d'apprentissage. S'appuyant sur des résultats concrets, nous validons l'instantanéité des prédictions du Grey Model et l'absence de période d'entraînement préalable. Les résultats décrits par Dounis et al. [Doun 06], concernant une étude comparative du Grey Model avec la technique de prédiction basée sur la logique flou (Fuzzy Predictive Model) appartenant au domaine de l'apprentissage artificiel, utilisés dans les systèmes de prédiction météorologiques, constituent un exemple de résultats pertinents. Cette étude démontre la capacité du Grey Model à réaliser des prédictions sans aucun entraînement préalable et les résultats sont affichés à la figure 6.5. A ces résultats (figure 6.5), il faut associer les données de la figure 6.6, afin de s'apercevoir de l'écart de temps et la grande quantité de données d'échantillonnage consacrés à l'entraînement (train + test) pour un algorithme d'apprentissage et le gain réalisé à terme en utilisant le Grey Model dont les prédictions restent quasi instantanées. Ces résultats viennent ainsi corroborer l'utilité et l'intérêt de notre proposition qui repose sur une compensation des prédictions par le Grey Model durant la phase d'entraînement de la fonction AA-Module.

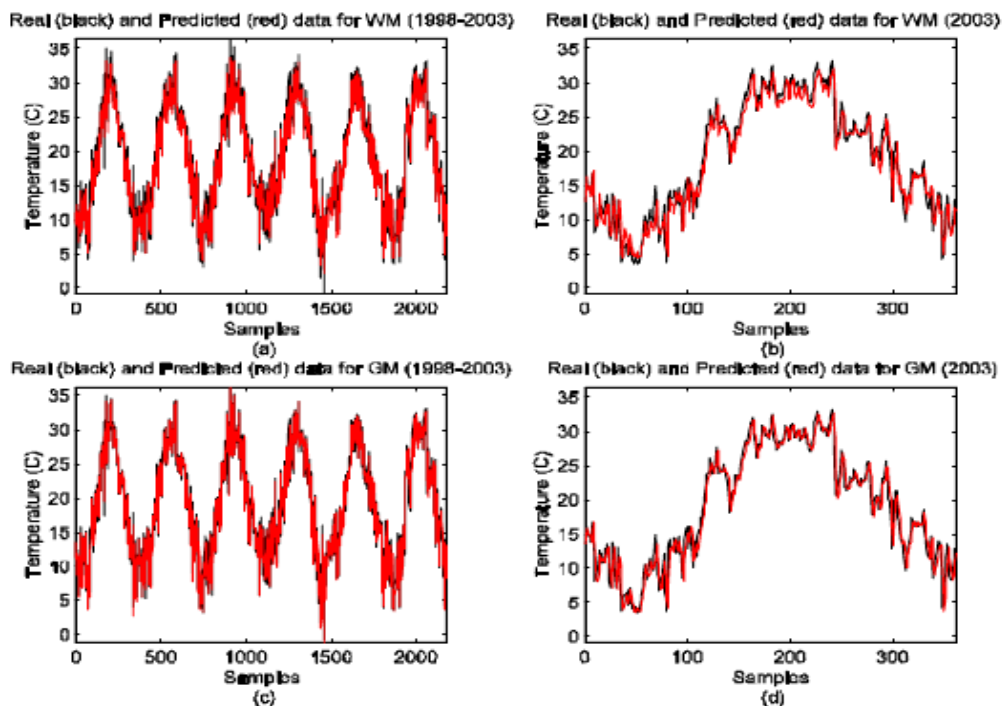


FIGURE 6.5 – Prédiction avec GM(1,1) selon Dounis et al. [Doun 06]

A la différence des résultats dans [Doun 06] relatifs aux données de température, les simulations dans le cadre de notre architecture e-santé basée sur la Radio Cognitive concernent la prédiction de l'énergie sur un sous-canal afin de faciliter le partage des fréquences et d'assurer les transmissions de données de santé. Nous avons donc choisi de modéliser la fonction de simulations du module Grey Model sous GNU Octave [Octave], la version libre de Matlab Simulink principalement destinée aux calculs numériques. La génération aléatoire du signal original ainsi que les variations constatées sont réalisées grâce à la fonction AWGN (Additive White Gaussian Noise). L'énergie alors détectée par le nœud Radio Cognitive correspond au RSSI (Received Signal Strength Indication) et donc au signal

PREDICTION COMPARISON								
Predictor	Fuzzy (WM)				Grey			
Inputs	T(k-1)	T(k-2)	T(k-6)	T(k-7)	T(k-1)	T(k-2)	T(k-6)	T(k-7)
Mfs	9	7	7	5	-			
Output	T(k)				T(k)			
Mfs	15							
AND Method	Product							
Implication	Product							
Aggregation	Sum							
Defuzzifier	Centroid							
Rules	138							
Results	Train		Test		Local Prediction			
Computation Time	32.366 sec		2.063 sec		0.471 sec			
AME	1.385728		1.447687		1.407747			
MSE	3.066376		3.375785		3.524036			
ρ	0.971563		0.972925		0.970235			
Maximum Error (absolute)	8.736815		8.198800		9.056811			

FIGURE 6.6 – Tableau comparatif des résultats obtenus par Dounis et al. [Doun 06]

généralisé au temps t , donnée d'entrée pour la fonction de prédiction au temps $t + 1$. L'exécution de la fonction donne les résultats représentés à la figure 6.7 et les écarts de prédiction constatés à la figure 6.8.

La figure 6.7 sur laquelle la courbe $RSSI_{prédit}$ représente les valeurs de la prédiction par Grey Model débute au même instant que la courbe $RSSI_{mesuré}$ caractérisant les valeurs réelles. Notons que la figure 6.7 correspond à un échantillonnage de 1000 valeurs tandis que la figure 6.8 se contente d'un échantillon de 100 valeurs mesurées et prédites sur une période de 20 secondes, les quantités (1000 et 100) exprimant ainsi la densité des mesures. Pour un intervalle entre les mesures plus élevées ou pour une densité de mesure faible, les imprécisions liées aux valeurs prédites deviennent plus perceptibles tel qu'affiché à la figure 6.8. Malgré quelques écarts ou erreurs de prédiction plus visibles sur cette figure (figure 6.8), la capacité du Grey Model à réaliser des prédictions en temps réel est une fois de plus prouvée à travers ces résultats et plus particulièrement les prédictions exprimées à la figure 6.7. Cela renforce notre idée d'utiliser cette technologie en complément du module apprentissage pour assurer la connectivité en tout lieu à travers ses prédictions durant les phases d'apprentissage.

Simulation du module Apprentissage :

Les valeurs mesurées en temps réel par l'équipement radio cognitive, nœud intelligent du patient, correspondent aux données d'échantillonnage X . Se fondant sur ces mesures, des ajustements sont réalisés par la fonction d'apprentissage afin de prendre en compte les erreurs pour les futures prédictions. L'algorithme, sur la base des observations/mesures obtenues, discerne de l'échantillon d'une part les composantes périodiques qui apparaissent stationnaires ou cyclo-stationnaires et d'autre part les composantes irrégulières qui ne reflètent aucune saisonnalité. De ces composantes se décline une tendance qui permet alors de réaliser les prédictions grâce à la fonction d'ajustement. Au minimum,

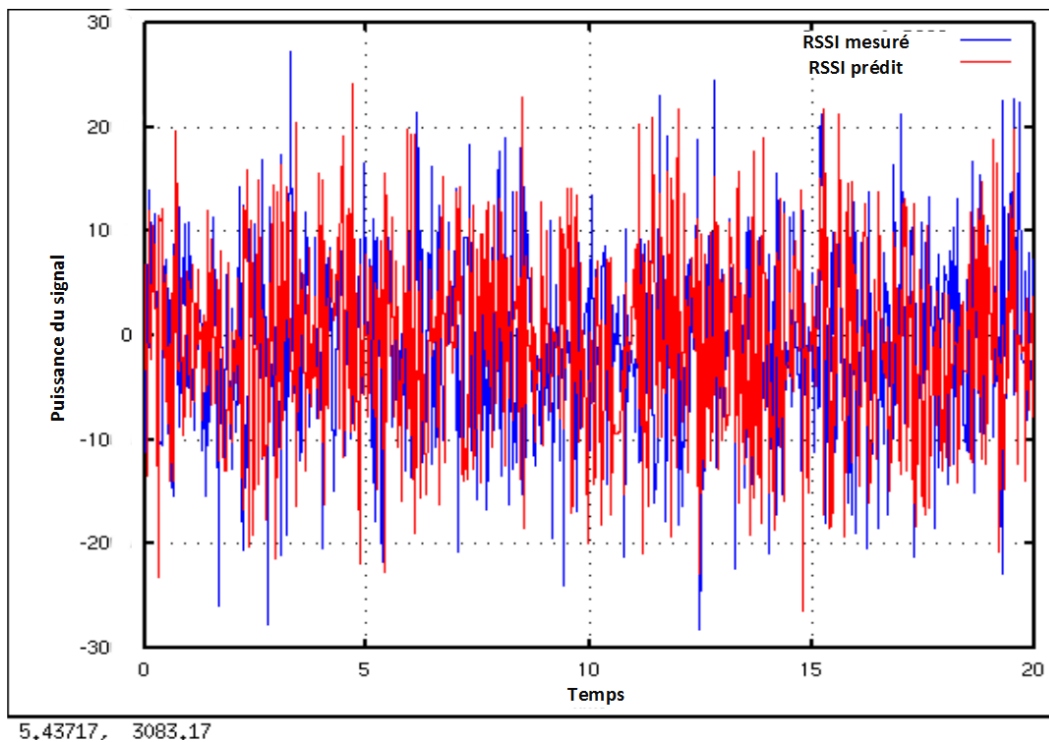


FIGURE 6.7 – Résultats des prédictions avec GM(1,1)

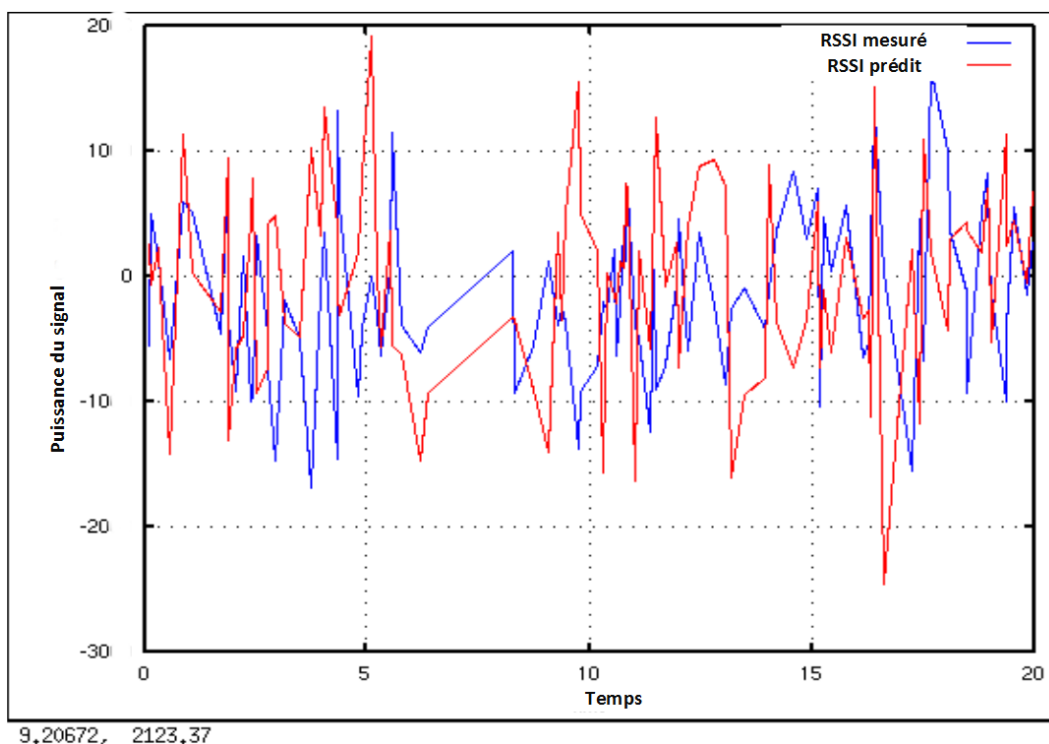


FIGURE 6.8 – Aperçu des écarts de prédictions avec GM(1,1)

deux périodes sont nécessaires pour faire fonctionner l’algorithme et le nombre de valeurs mesurées

pour chaque période varie en fonction du temps, des critères de pertinence des valeurs, du degré de précision des prédictions antérieures les plus récentes. En effet, les prédictions étant réalisées en prélude au sondage, la valeur effectivement sondée permet d'apprécier la précision de la fonction de prédiction. Ainsi, la taille de la base de connaissance devient fonction de l'effectivité du processus d'apprentissage. Un poids fort est affecté aux valeurs récentes résultantes du sondage après prédiction qui déterminent les tendances et un poids faible, voire la suppression des valeurs les plus anciennes de la base. Les valeurs (X) contenues dans le tableau 6.1 et générées dans le cadre de notre étude constituent notre échantillon d'apprentissage. Ces données représentent l'énergie mesurée sur un sous-canal à différentes périodes données. Ces opérations de mesure et d'apprentissage s'appliquent à chaque sous-canal disponible.

48	70	50	40	90	46	72	48	39	91	49
71	49	37	88	45	70	51	38	95	47	75
50	36	93	42	76	60	40	98	41	77	55
39	97	42	73	50	38	99	41	76	53	37

TABLE 6.2 – Valeurs d'entrée du module (AA-Module)

A partir de ces échantillons X , on obtient des résultats de prédiction par apprentissage que nous représentons par les courbes de tendance des figures 6.9 et 6.10. Ainsi, la figure 6.9 montre qu'avec un échantillon d'apprentissage satisfaisant, l'algorithme est capable de maîtriser les événements à caractère périodique tels que les instants de forte activité des utilisateurs primaires ainsi que leurs moments de faible présence exploitables par le nœud Radio Cognitive du patient pour un canal donné. Ce comportement stationnaire des utilisateurs primaires aide à l'obtention de meilleurs résultats de prédictions pour les périodes futures. Se basant sur ces distributions ou prédictions futures, le nœud Radio Cognitive anticipe, pour rappel, dans sa prise de décision les opérations de sondage et de changement de fréquence afin de maintenir la connectivité. En effet, l'application du principe de l'équation 7.2, suffira grandement pour estimer la présence ou non d'utilisateurs pour les périodes futures sur les canaux visés.

La figure 6.10 illustre un exemple de scénario particulier permettant de montrer l'intérêt d'un algorithme bien entraîné. En effet, plusieurs facteurs peuvent conduire à une mauvaise exécution des séquences d'entraînement et conduire à des résultats non satisfaisants. Par exemple, la mobilité pourrait engendrer une construction de base de connaissance incomplète pour notre modèle. Aussi, le comportement des utilisateurs primaires pourrait s'avérer aléatoire favorisant un environnement et des motifs (signaux) d'apprentissage difficilement maîtrisables. Les échantillons d'apprentissage devenant par conséquent très peu pertinents. Notre scénario s'intéresse donc à la mobilité et au risque d'apprentissage sur des données non pertinentes ou incomplètes. Dans ces cas, l'objectivité des prédictions est fortement mise en cause avec des écarts ou des erreurs importants aussi bien dans la phase d'apprentissage que celle de prédiction. Les résultats de la figure 6.10 exprime cette tendance avec une mise à disposition de la fonction d'apprentissage de données incomplètes (peu de valeurs) ou de périodicité importantes. Ainsi, à la différence des résultats obtenus sur une quantité de données (44 valeurs) représentés à la figure 6.9, ceux de la figure 6.10 apparaissent moins précis (25 valeurs) et surtout non pertinents pour une quantité de données d'échantillonnage très faible (10 valeurs). L'apprentissage exige donc plus d'attention et la prise en compte de ces différentes contraintes (mobilité) qui pourraient occasionner des délais (phase d'entraînement) supplémentaires. Cela met en évidence la durée non négligeable de la période globale d'apprentissage et la nécessité de sa compensation. Ces résultats révèlent ainsi la pertinence du module GM-Module comme solution alternative de prédiction

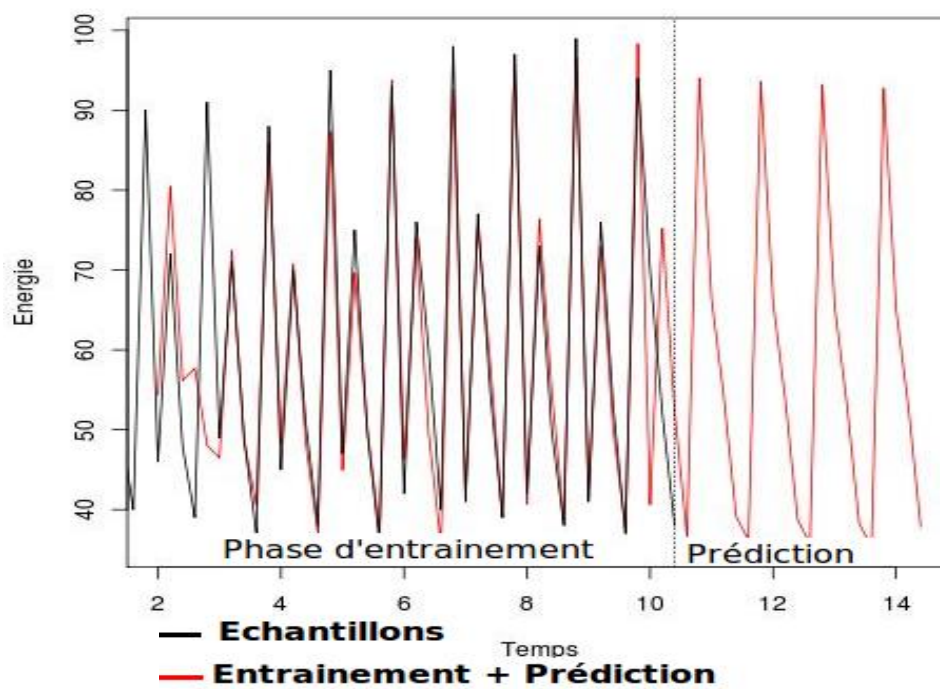


FIGURE 6.9 – Prédiction du module (AA-Module) sur 44 valeurs

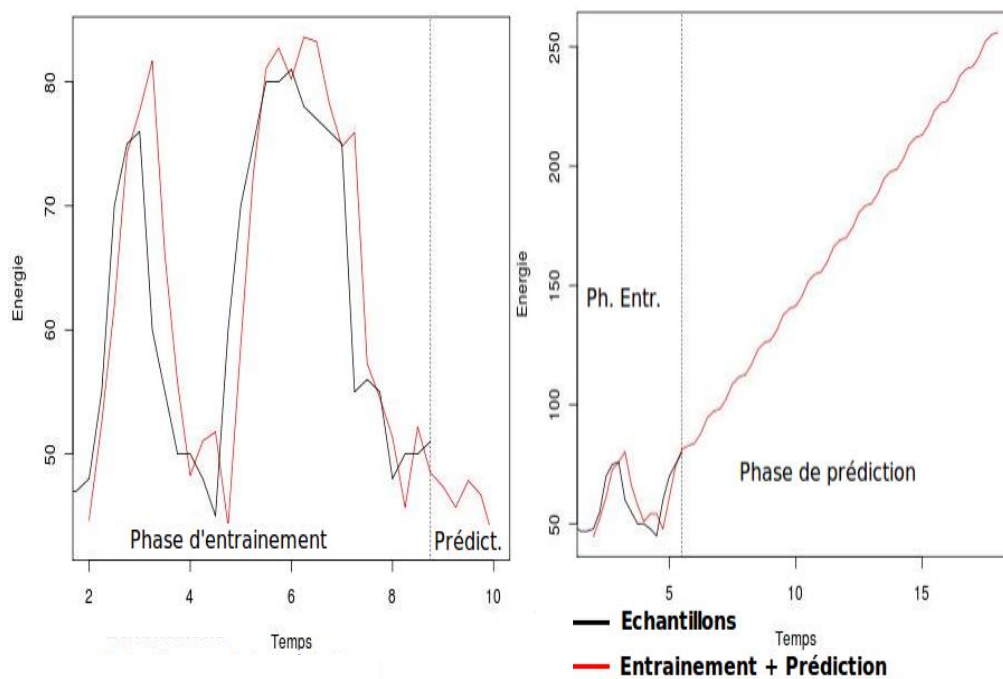


FIGURE 6.10 – Prédiction du module (AA-Module) sur 25 et 10 valeurs

couvrant la période d'entraînement du module AA-Module tel que nous l'avons suggéré. Toutefois, pour rendre cette idée acceptable, il nous semble important d'apporter quelques précisions sur le bien fondé d'une telle association de deux modèles de prédiction en terme de complexité.

Analyse de la complexité de notre approche associant le Grey Model à l'apprentissage artificiel : Par complexité, nous entendons d'une part la difficulté relative à la construction de la base de connaissance pour le module apprentissage et d'autre part le coût de calcul nécessaire à l'exécution des différents algorithmes (Apprentissage et Grey Model). C'est alors une analyse qui débouche sur l'adoption de différents mécanismes ou stratégies permettant de réduire les délais c'est à dire une réduction du temps total consacré à l'apprentissage. Ainsi, si nous partons de l'algorithme d'apprentissage implémenté à la section 6.3.4, l'opération la plus coûteuse est liée au calcul de la distribution des états futurs exprimé par $\Phi^{(t+1)} = \Phi^{(0)} M^i$ correspondant à une multiplication de la matrice M et du vecteur Φ . Pour une matrice carrée d'ordre n , cette opération comporte n multiplications et $n - 1$ additions pour un coût estimé à $n(2n - 1)$ opérations. Cet algorithme a une complexité quadratique par rapport à la taille de la matrice ou encore la taille d'échantillonnage. Cette complexité est exprimée par $O(n^2)$. Pour comprendre dans ce cas précis l'idée de faible coût algorithmique de l'apprentissage par rapport au Grey Model, il nous semble intéressant de faire une analyse comparative de ces deux modèles. Notons alors que la complexité de calcul de la fonction Grey Model est principalement liée à la taille de son échantillon que nous avons fixé à deux (2). Cette valeur minimale correspond au plus faible coût possible lié à cet algorithme. Le calcul des coefficients de la matrice $[a, b]^T$ obtenu par la méthode des moindres carrés avec l'équation 6.11 fait intervenir au moins une multiplication de deux matrices d'ordre m , avec $m = 2$ pour ce cas précis. La complexité de cet algorithme avec les matrices d'ordre m est estimée à $O(m^3)$ au pire des cas. Il est alors évident que pour une distribution de futures valeurs sur cinq périodes réalisée par l'algorithme d'apprentissage (Le cas présent), le coût est largement inférieur au coût des exécutions successives pour cinq périodes futures imposées par la technique du Grey Model. Rappelons en effet que chaque passage de t à $t + 1$ est marqué par une nouvelle exécution de la fonction Grey Model. De plus, un choix approprié des échantillons d'apprentissage pourrait aider à réduire davantage la durée d'entraînement. A cet effet, les échanges entre les modules Grey Model et apprentissage ainsi que les résultats du sondage des canaux constituent des sources de données importantes. Par conséquent, en plus d'être la fonction alternative de prédiction pendant la phase d'entraînement du module apprentissage, le Grey Model avec ses résultats séquentiels et instantanés pourrait aussi renforcer la base de connaissance de la fonction d'apprentissage afin d'accélérer le processus d'entraînement.

Au terme de cette analyse et au vue des résultats de simulation, il est possible de renforcer le module Sondage avec les outils de l'intelligence artificielle (Grey Model et Apprentissage) afin qu'il soit plus efficace. La fonction de prédiction de l'état d'occupation (seuil énergétique) de chaque sous canal que nous proposons, permet alors de réduire le temps lié aux opérations éventuellement multiples de sondage infructueux. Aussi, l'apprentissage et la prédiction de l'état d'occupation des sous canaux sur les futures périodes permet d'anticiper l'opération de sondage et de prévoir l'instant de changement de bande. La maîtrise de ces délais constitue donc un facteur important pour le maintien de la connectivité dans les réseaux Radio Cognitive. Il nous apparaît important au terme de ce chapitre, de signaler que cette approche combinant les techniques de Grey Model et d'apprentissage, avec pour objectif d'anticiper/réduire les problèmes de connectivité, a fait l'objet de quelques communications avec actes. Nous faisons une présentation sommaire de ces articles à la section 6.4.

6.4 Publications relatives à cette partie

L'idée d'une prédiction du spectre développée dans ce chapitre à été d'abord soumise à la conférence NOTERE/CFIP. Cette première contribution a été ensuite renforcée par des résultats complémentaires avant d'être proposée à MobiHealth qui est une conférence plus orientée vers le domaine de la e-santé. Par ailleurs, une version étendue de cet article-❸ a aussi été publiée aux éditions RNTI. Nous énumérons l'ensemble de ces contributions dans les paragraphes ci-dessous :

❶ - Conférence MobiHealth, Novembre 2012 : **Dramane Ouattara, Francine Krief, Mohamed Aymen Chalouf and Omessaad Hamdi** ; *Spectrum Sensing Improvement in Cognitive Radio Networks for Real-Time Patients Monitoring* ; 3rd International Conference on Wireless Mobile Communication and Healthcare, November 2012, Paris, France.

❷ - Journal RNTI, Avril 2013 : **Dramane Ouattara, Francine Krief, Mohamed Aymen Chalouf et Omessaad Hamdi** ; *Un système de prédiction spectrale pour une connectivité permanente dans le cadre du suivi en temps réel de patients* ; Revue des Nouvelles Technologies de l'Information, vol.SM-2 2013, France.

❸ - Conférence NOTERE/CFIP, Octobre 2012 : **Dramane Ouattara, Francine Krief, Mohamed Aymen Chalouf et Omessaad Hamdi** ; *Amélioration de la phase de détection du spectre d'un système radio cognitive pour le suivi temps réel de patients* ; Nouvelles Technologies de la Répartition - Colloque francophone sur l'ingénierie des protocoles, Octobre 2012, Anglet, France.

6.5 Discussion

Nous faisons remarquer à présent que les résultats obtenus par simulation dans ce chapitre apportent un début important de validation de la solution globale de connectivité que nous proposons. Mais cela ne tient que dans un environnement peu perturbé. Les simulations actuelles introduisent le changement de cellule ou la mobilité tout en permettant au module d'apprentissage (AA-Module) de finaliser ses séquences d'apprentissage. Cela constitue pour nous une avancée par rapport aux solutions de prédiction existantes à caractère statique. C'est également une base importante pour les améliorations futures devant tenir compte de ces nouvelles contraintes que constituent la forte mobilité et les perturbations électromagnétiques de grande ampleur. En effet, le bon fonctionnement de cet algorithme n'a pas été démontré ou expérimenté dans un contexte de suivi du patient dans un contexte avec une très forte mobilité. Il est donc essentiel de se poser des questions sur l'éventualité d'une forte mobilité et la présence de facteurs de perturbations afin de se faire une idée plus précise des nouvelles problématiques induites ou encore en suspens.

Quel pourrait-être l'impact d'une forte mobilité du patient sur le résultat des prédictions actuelles ? A l'évidence, dans un environnement fortement mobile, une utilisation récurrente du module Grey Model au dépend des prédictions par apprentissage serait notable et par conséquent cela pourrait augmenter les coûts de traitement. En effet, une mobilité très forte, c'est à dire, une fréquence de changement de cellule radio très élevée, pourrait entraver l'exécution complète des séquences d'entraînement du AA-Module. Il serait alors dans l'impossibilité de prendre le relais des prédictions suivant le fonctionnement de l'algorithme (figure 6.2). Cette situation impacterait fortement la qualité

des résultats mais surtout détériorerait les performances d'ensemble de la fonction de prédiction. Une adaptation de la présente solution pour la prise en compte des contraintes énoncées pourrait être réalisée sur la base de la coopération entre les nœuds Radio Cognitive et surtout l'implémentation de la fonction de prédiction au niveau également des stations de base. Les échanges de connaissance entre les nœuds mobiles et les nœuds fixes de l'architecture e-santé semblent alors devenir une stratégie capable d'apporter des réponses aux contraintes introduites par cette mobilité.

La prédiction serait-elle encore possible dans un environnement électromagnétique fortement perturbé ? Rappelons que notre raisonnement est basé sur le principe de l'équation 7.2, et donc sur le seuil énergétique permettant de déduire la présence future ou non d'un utilisateur prioritaire. Nous notons également à travers le tableau 6.1 que la technique de détection énergétique n'est pas fiable dans un rapport du signal sur le bruit (SNR) très faible. Alors dans ce cas de figure (zone bruitée), le résultat des prédictions pourrait ne pas être pertinent et la fonction d'apprentissage ne saurait se limiter à un simple entraînement sur le niveau d'énergie. Elle devrait également apprendre à maîtriser le comportement et les variations du signal et à s'y adapter pour sa prise de décision (équation 7.2) ou encore dans sa méthode de raisonnement. Cela réduirait certainement les performances espérées, l'opération de prédiction-apprentissage étant devenue plus complexe. Une comparaison entre ce nouveau coût généré par le module AA-Module avec le coût du GM-Module serait intéressante. L'exécution du GM-Module uniquement dans un tel contexte est-elle réaliste ou suffisante ? Quelle serait alors la fréquence des prédictions acceptable pour l'autonomie énergétique des équipements WBAN impliqués dans notre architecture ? Autant de questions qui se profilent dont les réponses seront d'un apport très appréciable. Enfin, pour toutes ces questions, nous préconisons tout comme pour la mobilité, l'idée d'une coopération entre les nœuds mobiles et les stations Radio Cognitive intermédiaires (station de base, point d'accès) plutôt fixes.

6.6 Conclusion

La connectivité en tout lieu est un facteur dont la garantie contribue fortement à la validation de l'un des critères importants de l'architecture e-santé que nous proposons. L'aboutissement du concept WBAN Radio Cognitive se mesure, entre autres, par la capacité de l'infrastructure suggérée à offrir en toute circonstance, ou en mobilité, les ressources réseaux appropriées aux applications afin qu'elles procèdent aux transmissions des données médicales. Pour résoudre le problème de connexion inhérent au défaut de ressources, nous avons proposé dans ce chapitre un mécanisme de prédiction qui améliore les performances des modules de détection et de partage des équipements Radio Cognitive associés. C'est une méthode qui a le mérite d'introduire la mobilité du patient, d'anticiper sur les opérations de sondage et de prévenir les sauts fréquentiels induits. Le modèle de prédiction spectrale, en question, est un assemblage de la technique du Grey Model et des technologies de l'apprentissage artificiel pour garantir un changement de canal sans risque préjudiciable pour la connectivité. Les simulations réalisées dans le but d'évaluer ce prototype qui intègre ou qui prend en compte surtout la mobilité du spectre montrent des résultats encourageants. L'étude de la connectivité en tout lieu et la preuve de son renforcement possible par les techniques de l'intelligence artificielle nous permet de passer à une autre fonctionnalité dont l'évaluation reste également importante pour la validation de notre architecture e-santé. Il s'agit de l'aptitude ou encore les prédispositions des équipements Radio Cognitive impliqués à gérer efficacement les interférences.

Chapitre 7

Gestion des interférences dans les réseaux médicaux Radio Cognitive

“L’innovation, c’est une situation qu’on choisit parce qu’on a une passion brûlante pour quelque chose.”

Steve Jobs

Sommaire

7.1	Introduction	86
7.2	Analyse de la zone de couverture et des interférences	86
7.2.1	Spécification de différentes hypothèses	86
7.2.2	Caractère de la zone de couverture et interférences	90
7.3	Stratégie de déploiement et approche de gestion des interférences	92
7.3.1	Présentation du cadre de déploiement hospitalier proposé	93
7.3.2	Techniques de gestion des interférences	94
7.3.3	Exemples de stratégies	95
7.3.4	Expérimentation et résultats	97
7.4	Publications relatives à cette partie	103
7.5	Discussion	103
7.6	Conclusion	105

Résumé

Nous consacrons ce chapitre à l’analyse de la capacité de l’architecture WBAN Radio Cognitive à gérer efficacement les interférences. L’environnement hospitalier a été choisi pour ses contraintes ou les risques encourus si l’on s’obstine à réaliser des transmissions sans aucune mesure de gestion du bruit, et cela en présence de matériels médicaux sensibles aux ondes. Une étude de ce contexte nous permettra de dégager une politique de déploiement concrète et réaliste permettant d’assurer la coexistence des ondes diverses. A cet effet, nous ébauchons un cadre et présentons les mécanismes permettant à l’équipement du patient de réaliser ses transmissions ou communications tout en évitant les interférences avec le matériel radio médical sensible à proximité.

7.1 Introduction

Les dispositifs radio médicaux dans les hôpitaux adoptent de plus en plus les technologies de communication sans fil afin de faciliter le travail et la mobilité des médecins, des praticiens et du personnel soignant. Les interfaces de communication sans fil deviennent des parties intrinsèques aux récents équipements médicaux tels que la pompe à insuline, le défibrillateur cardiaque ou le pacemaker. Dans ce contexte, le suivi du patient en tout lieu pourrait générer des ondes électromagnétiques perturbatrices si aucun mécanisme n'est prévu pour les circonscrire. Par conséquent, le déploiement de toute architecture devra non seulement répondre aux contraintes de connectivité mais devra être accompagné également d'une politique de contrôle de ces interférences pour être acceptable. Le principal objectif dans ce chapitre, est d'étudier l'aptitude de l'architecture e-santé Radio Cognitive que nous proposons à protéger les équipements médicaux dans un environnement hospitalier. Cela passe avant tout par la recherche/conception d'une stratégie de déploiement appropriée de l'infrastructure. A cet effet, nous procédons par un examen attentif de la zone de couverture à mettre en place. Une fois ces préalables maîtrisés, nous ébauchons un cadre hospitalier de suivi du patient où les équipements médicaux matérialisent les utilisateurs prioritaires (PU) à protéger et les équipements de suivi du patient associé à notre architecture composent naturellement la catégorie d'utilisateurs secondaires (SU). Nous décrivons par la suite quelques politiques de communication projetées par chaque nœud de l'architecture afin d'assurer des transmissions efficaces tout en minimisant les interférences. Dans la suite de ce chapitre, nous faisons une analyse de divers scénarios de chevauchement et les risques d'interférences engendrés à la section 7.2. De cette étude, nous déduisons une stratégie de déploiement et recommandons quelques techniques d'évitement des interférences à la section 7.3. Nous présentons sommairement les actes de conférence en lien avec cette problématique à la section 7.4 avant d'introduire une discussion au sujet des résultats à la section 7.5 et de conclure ce chapitre par la section 7.6.

7.2 Analyse de la zone de couverture et des interférences

L'analyse de la zone de couverture du réseau WBAN Radio Cognitive et de ses caractéristiques constitue le fondement de la prise de décision sur le choix de la politique de déploiement de l'architecture dans le présent contexte. Les différentes relations entre la zone de couverture, l'importance des espaces de chevauchement et les impacts possibles sur les équipements médicaux sont entre autres estimés. Signalons que le périmètre de chevauchement, constitué du disque créé par les ondes du point d'accès Radio Cognitive avec celui de l'utilisateur prioritaire (matériel médical), constitue principalement la zone de vulnérabilité. La caractérisation de ces zones de vulnérabilité afin de déceler les risques d'interférence inhérents pour chaque technologie (WiFi, GSM, etc.) avec les équipements radio de l'infrastructure e-santé constitue une base de connaissance importante dans le choix des stratégies de communication (exemple : sélection de canal). La mise en évidence de ces différentes zones et le décryptage des spécificités liées à chacune d'elles sont fournis à la section 7.2.1.

7.2.1 Spécification de différentes hypothèses

La présente section est une présentation des différents scénarios possibles auxquels l'on pourrait être confronté lors du processus de déploiement des infrastructures radio de l'architecture WBAN Radio Cognitive. Ces scénarios permettent d'élucider les cas de chevauchement les plus plausibles et de suggérer une formule pouvant aider au calcul ou à l'estimation de l'étendue de la zone.

Assomption importante : Avant de passer à l'identification des différents cas de chevauchement, nous assumons que la zone de couverture d'un relai (émetteur-récepteur) ou encore d'un point d'accès forme un cercle parfait dont le centre est égal à sa propre position. Dans la pratique, c'est un cas de figure improbable dans la mesure où la portée d'un émetteur varie en fonction de l'environnement et des obstacles en présence et par conséquent, le rayon de cette portée ne peut être le même pour chaque direction. Toutefois, l'idée de cercle parfait est suffisante et théoriquement acceptable pour la présente analyse. Notons qu'un émetteur-récepteur matérialisé par le disque (cercle) couvre un ensemble d'utilisateurs, primaires pour le disque PU et secondaires pour le disque SU . Aussi, nous considérons qu'un émetteur-récepteur SU est en mesure de générer du trafic sur n'importe quelle bande (technologie), tandis que les utilisateurs primaires se partagent les diverses technologies disponibles. Toutefois, pour les besoins de simplification des simulations, nous retiendrons le WiFi comme étant la technologie dont les canaux sont partagés par les SU et les PU . Nous donnons la signification des notations utilisées dans les formules d'estimation des différentes zones à travers le tableau 8.1.

Symboles	Description
$O_P(x_P, y_P)$	Origine et coordonnées du point d'accès prioritaire (PU)
$O_C(x_C, y_C)$	Origine et coordonnées du point d'accès Radio Cognitive (SU)
R_P	Rayon caractérisant la portée du PU
R_C	Rayon caractérisant la portée du SU
d	Distance séparant les points, origines des transceivers PU et SU
θ_P	Angle de la zone crée par les ondes du PU
θ_C	Angle de la zone crée par les ondes du SU
$A(x_A, y_A); B(x_B, y_B)$	Points d'intersection entre les zones créées par PU et SU
$G(x_G, y_G)$	La partie de l'onde du PU formant l'arc de chevauchement
$W(x_W, y_W)$	La partie de l'onde du SU formant l'arc de chevauchement

TABLE 7.1 – Annotation des symboles utilisés

Pour rappel, l'observation des zones schématisées aux paragraphes suivants permettra d'avoir une perception plus affinée des impacts possibles du déploiement de notre architecture dans le contexte hospitalier et les différents cas de figure évalués, nous orienterons dans le choix des stratégies d'implémentation. Soulignons également que nous réalisons cette analyse sur la base d'un émetteur-récepteur par technologie.

Les disques de couverture du SU et du PU ne se chevauchent pas : De toute évidence, l'absence de chevauchement exprimée par la figure 7.1 constitue le scénario parfait de déploiement. Cette figure affiche une planification réussie qui annihile tout risque d'interférence.

Il faut noter que c'est un scénario très improbable en pratique. En effet, une couverture totale et parfaite éliminant les zones de chevauchement reste une opération impossible à réaliser avec la technologie Radio Cognitive.

La zone de couverture du SU se trouve à l'intérieur de celle du PU : A l'analyse de ce schéma, le constat qui se dégage est que la puissance de transmission de l'émetteur-récepteur Radio Cognitive est inférieure à celle de l'émetteur-récepteur primaire ou prioritaire. Ce cas de figure désigne le fait que les équipements secondaires dédiés à la e-santé peuvent se retrouver à l'intérieur d'une zone totalement

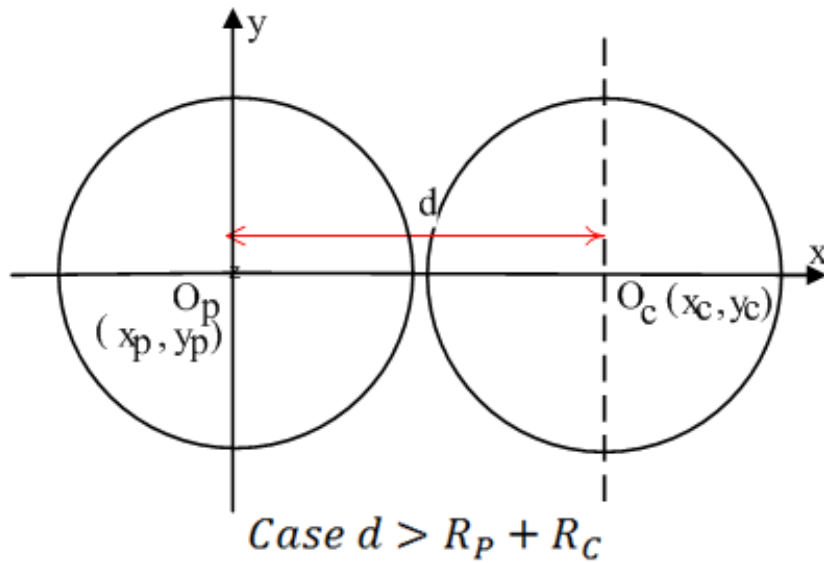


FIGURE 7.1 – Pas de chevauchement entre les zones SU et PU

couverte par une technologie donnée. Cela semble probable, par exemple, pour un émetteur-récepteur Radio Cognitive (e-santé) à proximité d'un émetteur-récepteur GSM de portée plus grande.

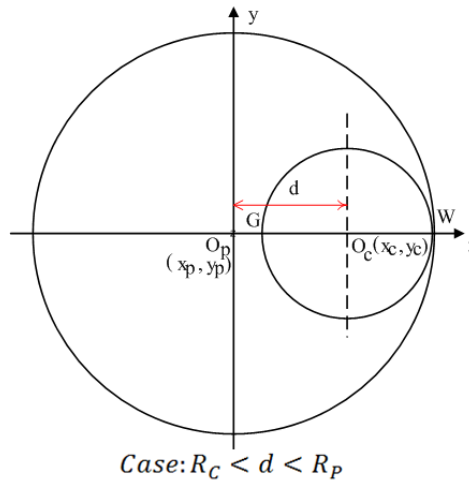


FIGURE 7.2 – Zone du SU à l'intérieur de celle du PU

La zone de vulnérabilité dans ce cas comprend tout l'espace de couverture visible à la figure 7.2 du point d'accès secondaire. Le calcul de cette surface est théoriquement donné par le produit de π avec la longueur du rayon R_C du cercle au carré.

La zone de couverture du PU se trouve à l'intérieur de celle du SU : Cette nouvelle configuration présentée à la figure 7.3 est l'inverse du précédent cadre (figure 7.2). En effet, la portée de l'émetteur-récepteur e-santé est plus grande que celle de l'émetteur-récepteur PU. La zone de vulnérabilité concerne ici l'aire de couverture du PU calculable cette fois avec R_P comme rayon du cercle à élever au carré.

C'est un cas de figure très probable avec le déploiement des émetteurs-récepteurs secondaires aux

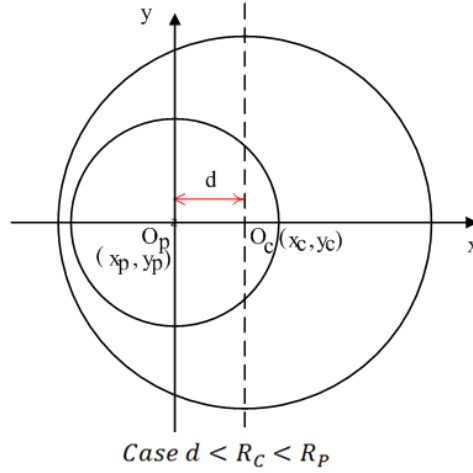


FIGURE 7.3 – Zone du PU à l'intérieur de celle du SU

environs de points d'accès WiFi par exemple. Signalons d'ailleurs que l'on pourrait être confronté dans ce cas précis à une portée de l'équipement Radio Cognitive couvrant conjointement plusieurs points d'accès primaires et par conséquent une diversité plus large de matériels à protéger des interférences.

Les disques de couverture du SU et du PU se chevauchent, donnant lieu à une zone de vulnérabilité : C'est l'un des scénarios les plus probables et les plus réalistes dans le contexte du déploiement de l'architecture proposée dans un cadre hospitalier. En effet, divers points d'accès ou différents réseaux d'accès, avec des caractéristiques (portée) spécifiques, composent sans doute ce contexte. Une grande majorité de ces technologies pourrait former des espaces de chevauchement avec les émetteurs-récepteurs Radio Cognitive déployés tel que cela est affiché à la figure 7.4.

Cette configuration générale est obtenue lorsque les conditions fixées par l'équation 7.1 sont satisfaites.

$$d < R_P + R_C, \text{ avec } d > R_P \text{ et } d > R_C \quad (7.1)$$

A l'aide des coordonnées géométriques, nous donnons à travers l'équation 7.2 une idée du calcul de la région potentiellement exposée aux ondes perturbatrices que nous désignons par le terme "Overlap".

$$Overlap = \frac{\theta_C}{2} R_C^2 - R_C^2 |\cos \beta| \cos \frac{\theta_C}{2} + \frac{\theta_P}{2} R_P^2 - R_C^2 |\cos \beta| R_P \cos \frac{\theta_P}{2} \quad (7.2)$$

θ_C et θ_P représentant respectivement les angles formés par O_C et O_P avec les points A et B, β caractérisant une variable intermédiaire du calcul et obtenue grâce aux équations 7.3, 7.4 et 7.5.

$$\sin \beta = \frac{R_P^2 - (R_C^2 + x_C^2 + y_C^2)}{2 * R_C * \sqrt{x_C^2 + y_C^2}} \quad (7.3)$$

$$\sin \frac{\theta_C}{2} = \frac{R_C}{R_P} * |\cos \beta| \quad (7.4)$$

$$\sin \frac{\theta_P}{2} = |\cos \beta| \quad (7.5)$$

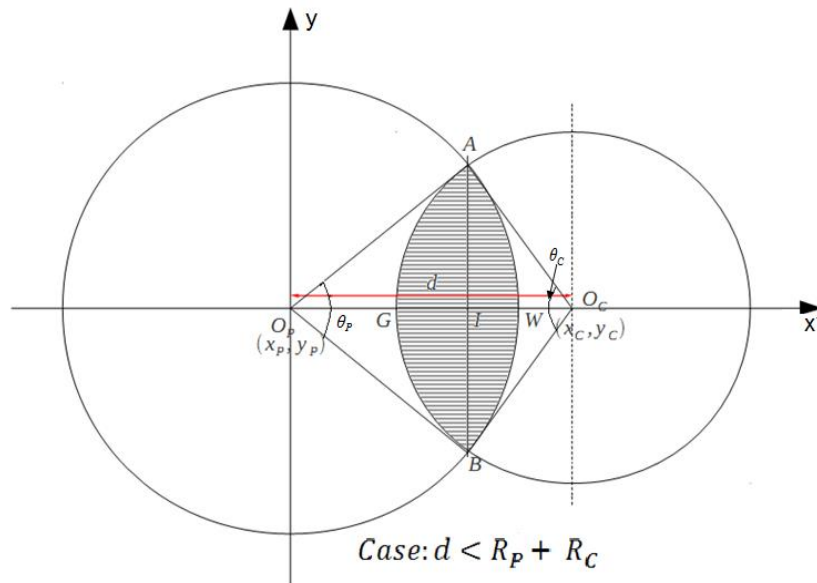


FIGURE 7.4 – Zone de chevauchement entre PU et SU

Cette introduction non exhaustive des différents cas de figure a le mérite de montrer l'importance des études préalables de l'environnement radio afin d'avoir un aperçu général des équipements propriétaires en présence. Elle peut conduire à un choix plus raisonné de l'emplacement des équipements fixes et guider en pratique le processus de définition des paramètres de transmission les plus adaptés. Le choix raisonné de l'emplacement sous-entend, l'adoption possible de stratégie de déploiement réduisant au mieux les écarts de sensibilité des équipements médicaux d'une même zone. Il pourrait s'agir aussi d'éviter les concentrations de matériels sensibles dans une même zone et de réaliser au mieux une distribution équitable à travers cette stratégie de déploiement. Toutefois, l'éventualité de la mobilité dans une telle planification ne devrait pas être ignorée. Elle pourrait être prise en compte avec les possibilités d'adaptation dynamique des paramètres de transmission. L'impact de l'arrivée ou du départ d'un équipement sur les stratégies des cellules concernées pourra être évalué et les ajustements nécessaires seront apportés. Pour avoir une idée plus précise sur le choix de ces paramètres de communication dans le cadre hospitalier, nous procédons par des simulations mettant en jeu une distribution des deux catégories d'utilisateurs (PU et SU) dans des surfaces de taille variable. Il est important de préciser que le paramètre pris en compte à ce stade est lié à la portée de l'émetteur-récepteur (point d'accès fixe) et, par conséquent, à la puissance de transmission de ce dernier qui reflète la dimension de la zone de couverture.

7.2.2 Caractère de la zone de couverture et interférences

Pour avoir une idée de l'ampleur (exemple : nombre de nœuds impactés) des interférences, auxquelles les équipements médicaux seraient exposés en cas de déploiement de l'infrastructure/architecture de communication e-santé proposée sans aucune étude préalable, nous utilisons le simulateur réseau OMNeT++ [OMNeT] afin de simuler le contexte. La simulation a été réalisée sur une surface de 3000 m^2 avec une distribution du matériel médical sensible doté d'interfaces WiFi. Cette distribution a été faite autour d'un point d'accès fixe prioritaire utilisant la norme 802.11b dont la puissance

de transmission maximum a été fixée à $110mW$, correspondant à une portée de $475,8m$. La bande WiFi a été choisie pour sa simplicité mais la généralisation des résultats obtenus à d'autres bandes de fréquences n'entraînerait aucune incohérence. Quant au transcepteur Radio Cognitive, sa puissance de transmission a été limitée à $55,11mW$ pour une portée estimée à $377,77m$. Cette portée est calculée en tenant compte de l'affaiblissement de la propagation (path loss) défini par défaut à 3,5 avec OMNeT++. Pour information, une distribution du matériel radio mobile du patient est réalisée autour d'un point d'accès Radio Cognitive fixe représentant les nœuds perturbateurs. A noter que toutes ces distributions suivent la loi de Poisson, les équipements en question étant ceux dans la pratique concernés par les émissions et les effets des ondes.

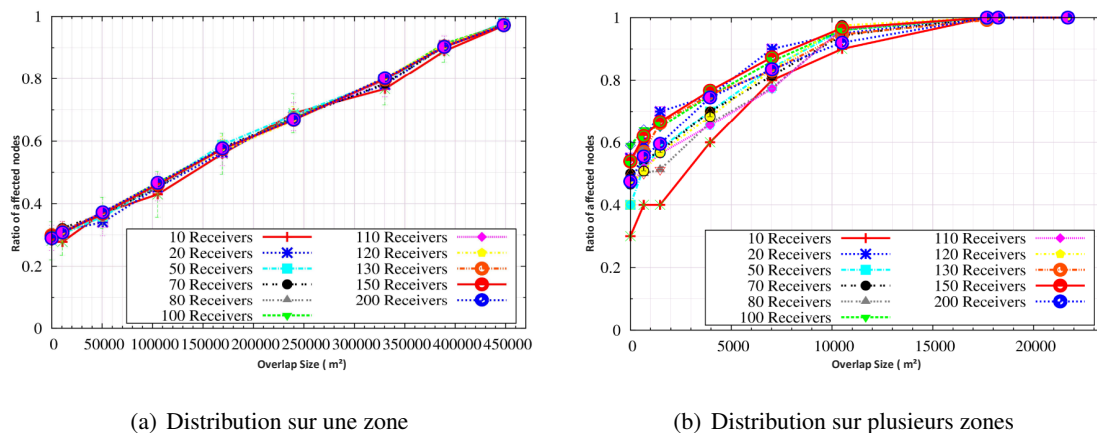


FIGURE 7.5 – Impact des ondes en fonction de la dimension de la zone de chevauchement

La figure 7.5 présente les résultats obtenus en faisant varier les portées des différents émetteurs-récepteurs et, par conséquent, la taille de la zone de chevauchement. L'effet d'une variation du nombre de zones de vulnérabilité a également été testé. Précisons par ailleurs que la multiplication des zones de chevauchement est liée à l'augmentation de la quantité de transcepteurs. Ainsi, la figure 7.5(a) simulant une seule zone de chevauchement montre que le nombre d'équipements sensibles impactés est strictement lié à la taille de la zone. Plus celle-ci est grande, plus la quantité d'équipements probablement exposés est élevée. Même si ces résultats ne permettent pas de mesurer avec précision le degré des interférences subies en terme de puissance de l'onde reçue, ils ont le mérite d'attirer l'attention sur l'importance de la quantité de matériel pouvant potentiellement être victime. Les résultats de la figure 7.5(b) viennent renforcer cette idée avec l'augmentation du nombre de zones de chevauchement qui amplifie davantage la probabilité de nœuds sensibles affectés.

Il est important de préciser que ces analyses et simulations ont pour principal objet de permettre de dégager des stratégies de déploiement de l'infrastructure Radio Cognitive que nous proposons dans un environnement hospitalier tout en tenant compte des contraintes d'interférences. A cet effet, l'analyse des résultats susmentionnée a fortement permis de relever toute la complexité de ce déploiement conjoint et du partage des fréquences par les différentes catégories d'utilisateurs (PU et SU). Ainsi, la difficulté notée à travers les différents cas de figures ne comprenant qu'un émetteur-récepteur serait encore plus complexe avec plusieurs émetteurs-récepteurs selon les résultats (figure 7.5(b)). Toute la complexité du choix de déploiement de l'infrastructure Radio Cognitive e-santé dans le contexte de l'hôpital est ainsi mise en évidence. Toutefois, deux choix de déploiement possible se dégagent pour la couverture du cadre hospitalier avec l'architecture que nous proposons et au regard de la présente

analyse. D'une part, il y a le choix d'une puissance de transmission permettant au nœud émetteur-récepteur Radio Cognitive de couvrir toute l'aire de l'hôpital, créant ainsi dans le cas extrême une vaste zone de chevauchement et minimisant le nombre de ces espaces. D'autre part, il y a la possibilité de créer un nombre important de zones de chevauchement exigües avec l'augmentation du nombre de points d'accès Radio Cognitive. Cependant, ni une large zone de chevauchement, ni la création d'un nombre important de ces zones à risque ne permet de réduire l'impact des ondes tel que cela a été révélé par les résultats (figure 7.5). Nous suggérons alors une planification des points d'accès Radio Cognitive dans l'espace hospitalier basée sur une segmentation des cellules minimisant au mieux la couverture de chacun. En adoptant la stratégie de cellules minuscules, l'on augmente la chance de diminution des aires de chevauchement pour une technologie donnée et un point d'accès Radio Cognitive. L'intérêt des cellules minuscules peut être également la réduction de l'espace et du nombre de matériels sensibles couverts par chaque émetteur-récepteur de l'infrastructure à déployer. De plus, la prise de décision locale (au niveau de chaque point d'accès) et les politiques de gestion des interférences à associer nécessairement à chaque point d'accès pourraient être simplifiées et plus facile à contrôler car ne concernant qu'un nombre limité/acceptable de matériels à protéger. La section 8.3 permettra de mieux élucider cette assertion et d'avoir une meilleure compréhension de tout son intérêt.

7.3 Stratégie de déploiement et approche de gestion des interférences

La figure 7.6 matérialise le contexte de déploiement avec d'une part le réseau d'accès existant de l'hôpital (figure 7.6-**a**) et d'autre part la planification envisagée de l'infrastructure Radio Cognitive (figure 7.6-**b**).

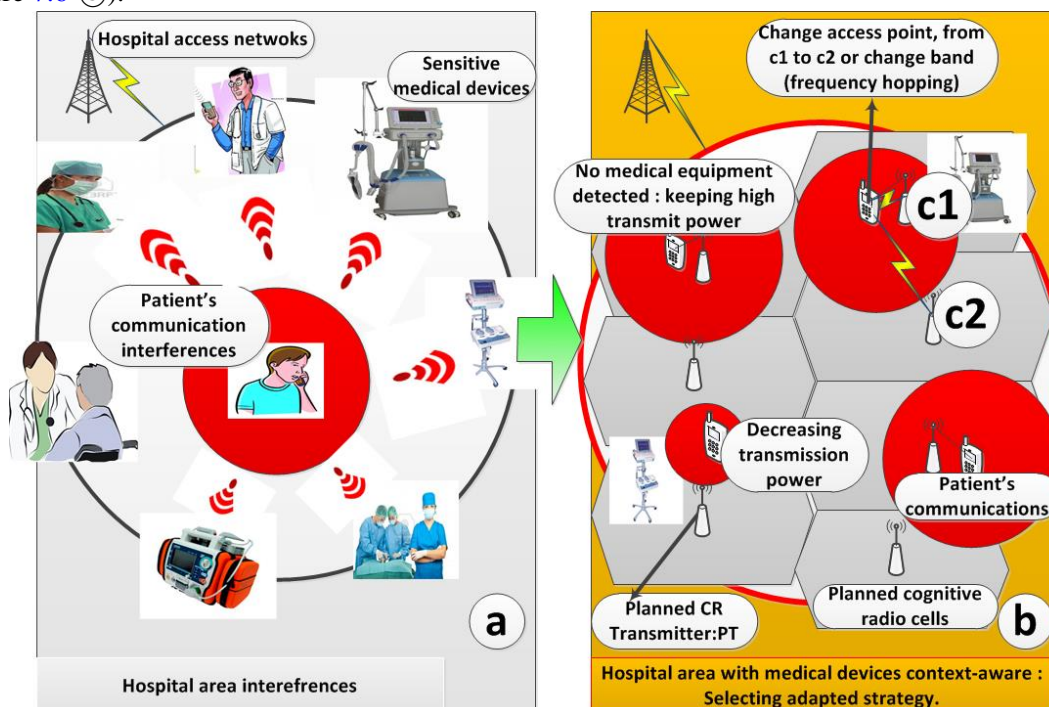


FIGURE 7.6 – Stratégie de déploiement dans un contexte hospitalier

On observe, à travers cette figure (figure 7.6-**a**), une spécification des ondes perturbatrices que pourraient générer les communications de l'équipement du patient suivi, si aucun mécanisme de

contrôle des interférences n'est enclenché. Les équipements médicaux sensibles (Sensitive medical devices) se retrouvent ainsi exposés et cela pourrait nuire de toute évidence à leur bon fonctionnement. La démarche proposée à travers la figure 7.6-ⓑ) aura donc pour but d'assurer la coexistence dudit matériel avec les transmissions du patient, garantissant le moindre risque préjudiciable. La section 7.3.1 renferme la description détaillée des nouveaux équipements introduits (figure 7.6-ⓑ)), assortie de l'examen de leurs fonctions qui permettra de comprendre cette nouvelle démarche.

7.3.1 Présentation du cadre de déploiement hospitalier proposé

Avant toute présentation de cette configuration favorisant la coexistence des ondes diverses, il est essentiel de situer le présent cadre (figure 7.6-ⓑ)) dans la montée des travaux de recherche sur la gestion des interférences en milieu hospitalier. A cet effet, tel que nous l'énonçons dans la partie état de l'art [Phun 10][Mamo 14], la plupart des mécanismes de gestion des interférences proposés dans le contexte de l'hôpital se limitent à une architecture centralisée gérant l'ensemble des communications. Contrairement à ces approches, le cadre proposé à la figure 7.6 se veut une solution de prise de décision Radio Cognitive distribuée, avec des stratégies de gestion des interférences à exécuter localement ou au niveau de chacun des points d'accès déployés. C'est donc une approche plus robuste favorisant le passage à l'échelle et plus efficace en terme de modélisation/perception de l'environnement radio. Symbolisé par la figure 7.6-ⓑ), ce nouvel environnement repose sur une couverture pluricellulaire. Chaque cellule désignant un point d'accès Radio Cognitive associé à une aire restreinte définie par la puissance de transmission et la circonscription ou la portion de surface de l'hôpital à couvrir. Le choix de ces portions de surface ou de la portée peut être lié, par exemple, au seuil de sensibilité aux ondes du matériel de proximité. Dans ce cas précis, une couverture par compatibilité ou par niveau de seuil du matériel médical n'est pas à exclure. Une fois cette planification achevée, nous aboutissons à un contexte où chaque point d'accès Radio Cognitive offre des services réseaux sur la base de conditions précises et distinctes à respecter pour chaque cellule. La phase suivante concerne les conditions de transmission des équipements, surtout mobiles, de suivi du patient. En effet, les communications du patient peuvent être de deux ordres. Les émissions d'ondes sont ainsi générées soit pour accomplir des besoins personnels n'ayant aucun lien avec la santé, soit pour la nécessité de transmettre des données issues des dispositifs WBAN de suivi des signes vitaux. Le nœud mobile sert dans ce dernier cas de contrôleur tel que décrit dans l'architecture de suivi du patient proposée et plus précisément dans sa partie réseau corporel. La figure 7.6-ⓑ) illustre parfaitement l'idée d'une telle planification où le nœud mobile se charge des transmissions des données du patient. Les points d'accès Radio Cognitive (Planned transmitter : PT) accomplissent la fonction de relais réseau pour ces équipements mobiles. Il est fondamental de noter la présence dans ce contexte d'un réseau d'accès (Hospital access network) pouvant comprendre diverses technologies (WiFi, GSM, ZigBee, etc.) et offrant des liens de raccordement aux équipements de communication non Radio Cognitive et au matériel médical. L'idée de cette planification va consister alors en une exploration/partage de manière opportuniste des technologies sous-jacentes tout en évitant les interférences. Pour ce faire, les équipements Radio Cognitive devront périodiquement scanner et mesurer, grâce à leur module Sondage, le niveau des interférences sur un canal donné afin d'adapter dynamiquement leurs paramètres de transmission en conséquence. A l'évidence, un processus de contrôle du niveau du bruit comparé au seuil acceptable devra être mis en place. Une base de connaissance décrivant les caractéristiques et retraçant certains paramètres de l'environnement radio est également nécessaire. Par exemple, pour un canal ou une technologie donnée et pour chaque cellule ou zone prise indépendamment est associé un seuil I_L ou une limite d'interférence, sur la base des équipements médicaux en présence. Ces données peuvent alors être disponibles sur un fichier ou une base de données. Les interférences en question sur le canal

élu se composent de la somme du bruit occasionné par l'ensemble des signaux affectant celui-ci. Il devient alors possible de faire une estimation du degré des interférences susceptibles d'être générées par les émissions de signaux des équipements Radio Cognitive du patient. Cette estimation est donnée selon Phunchongharn et al. par l'équation 7.6 [Phun 10].

$$I_{tr}(f_c, W) = \frac{P_m(f_c, W)}{KW} \quad (7.6)$$

Où I_{tr} désigne une transmission du nœud Radio Cognitive du patient, sur la bande W ayant pour fréquence centrale f_c . La variable $P_m(f_c, W)$ décrit la puissance de transmission moyenne, K étant la constante de Boltzmann en Joules ($K = 1,38.10^{-23}$).

A partir de cette estimation des interférences, chaque cellule symbolisée par un point d'accès sur la figure 7.6⑥ est alors capable d'assurer une surveillance du niveau du bruit acceptable sur chaque canal selon le principe exprimé par l'équation 7.7.

$$I_{tr}(f_i, W_i) + \frac{M_i P_m(f_i, W_i)}{KW_i} \leq I_L(f_i) \quad (7.7)$$

Le seuil des interférences acceptable étant spécifié dans cette équation, par la valeur de I_L pour chaque bande de fréquence i , comprise entre $[1, n]$. Signalons de même que le paramètre M_i contient la valeur approximative du facteur d'atténuation du signal entre l'émetteur Radio Cognitive du patient et le récepteur symbolisé par le matériel médical sensible. L'organisation et le fonctionnement général de l'ensemble du processus introduit, sont détaillés à la section 7.3.2 qui résume l'essentiel des actions entreprises au niveau de chaque nœud ou point d'accès dans le but d'atténuer les effets des ondes, à travers un plan de gestion des interférences.

7.3.2 Techniques de gestion des interférences

La figure 7.7 donne un aperçu du plan de gestion des interférences implémenté par chaque point d'accès Radio Cognitive (Planned CR transmitter) déployé dans le cadre hospitalier (figure 7.6). Les fonctions *Measure*, *Evaluation*, *Update* ont pour rôle, de contrôler les paramètres tels que la puissance de transmission, la technologie ou la fréquence centrale, la largeur de bande et la technique de modulation à titre d'exemples. De plus, elles calculent et renseignent sur la distance ou la localisation du nœud mobile du patient. Les données acquises ou calculées permettent à l'émetteur-récepteur visé, d'avoir une vision de la zone de vulnérabilité (chevauchement) ainsi que la limite des interférences inhérentes. Signalons que les informations mesurées sont contenues dans un fichier ou une base de données (Database). Par ailleurs, la localisation du nœud mobile constitue l'opération la moins évidente compte tenu de la mobilité et surtout du niveau de précision exigé dans la détermination de la position. De plus, le suivi du patient à l'hôpital se faisant en grande partie à l'intérieur des bâtiments, alors les instruments traditionnels de calcul de la position du patient (nœud mobile) tel que le *GPS* se révèlent inefficaces voir inexplorables. Le calcul de la position devient alors une question importante dans le cadre de l'architecture que nous proposons et sera élucidé plus loin dans ce chapitre. Cette position du nœud mobile une fois calculée, compose avec la puissance de transmission et les informations sur l'installation d'un nouvel équipement médical, les échantillons d'information partagée entre les émetteurs-récepteurs. Sur la base de ces données et des mesures réalisées, chaque émetteur-récepteur recalcule/réévalue ses paramètres de transmission et adapte ou met à jour ses stratégies. La fonction de dissémination (*ExternalDissemination*, *InternalDissemination*), pour le besoin de réduction au maximum du volume des échanges, est exécutée exclusivement à la faveur de l'apparition d'un nouvel évènement, tel que l'arrivée (*Initiation d'une connexion*) d'un nœud mobile du patient. A cet

effet, la dissémination externe (ExternalDissemination) concerne les échanges entre les nœuds radios mobiles et les point d'accès planifiés, tandis que la dissémination interne (InternalDissemination) se rapporte au partage de connaissance entre les nœuds relais (Planned CR transmitter).

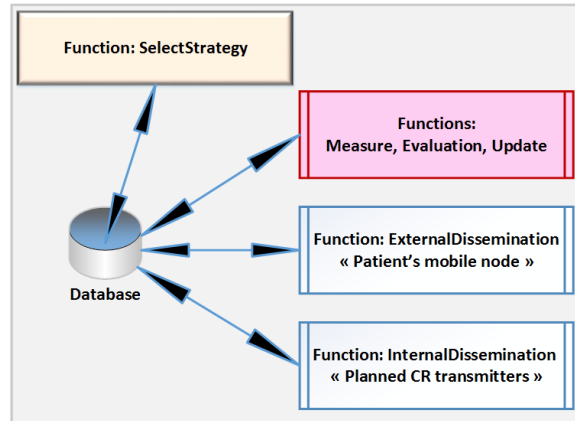


FIGURE 7.7 – Plan de gestion des interférences

Précisons que la technologie Radio Cognitive implémente divers mécanismes de signalisation, à l'image de celui proposé par Gavrilovska et al. [Gavr 14], qui facilitent les émissions de signaux de synchronisation ou d'information. Ainsi, le protocole de signalisation proposé par Chih-Shun et al. [Chih 10] constitue un exemple pertinent, pouvant intégrer dans ses messages (Beacon frame), les données du plan de gestion à propager. Une fois l'étape du partage de connaissance effective, les variations de paramètres constatées et les changements apportés à l'environnement radio sont pris en compte par la fonction *SelectStrategy* (figure 7.7). Un ensemble de politiques édictées afin d'éviter les interférences ou afin de prendre en compte les exigences de l'environnement radio composent cette fonction. Ainsi, le changement de canal ou de technologie, l'ajustement de la puissance de transmission (augmenter ou réduire), l'arrêt de toute émission sur un canal donné forment des exemples de stratégies que pourrait implémenter cette fonction-stratégie. Aussi, les deux règles fixant les stratégies d'adaptation de puissance et de changement de fréquence que nous donnons à la section 7.3.3, explicitent davantage la mise en œuvre technique de ces politiques de gestion des interférences.

7.3.3 Exemples de stratégies

Une stratégie se compose d'un ensemble de conditions à satisfaire et d'actions à exécuter. Pour des raisons de simplicité et dans l'objet d'une plus facile adaptation aux algorithmes d'apprentissage artificiel, nous choisissons de formuler les stratégies sous la forme de règles de la logique formelle. Ces règles décrivent les liens entre les variables et rendent plus visibles les actions à entreprendre. L'action désigne dans ce cas, les opérations à réaliser dans le but de changer l'état d'un ou de plusieurs paramètres du nœud radio. Par conséquent, la matérialisation des stratégies se fait par une association à chaque *Action*, d'un ensemble de préconditions (*REQUIRED*) et de postconditions (*ENSURE*). Les préconditions décrivent les règles à satisfaire tandis que les postconditions affichent les modifications apportées à l'état d'une stratégie. Afin d'être encore plus illustratif, nous donnons à titre d'exemples deux stratégies exprimées par les algorithmes 7.1 et 7.2.

Cette première stratégie décrit la politique d'adaptation (diminution) de la puissance de transmission devant être en concordance avec la limite des interférences acceptables (*threshold*). L'énergie mesurée sur le canal (*channelEnergy*) constitue la variable de jugement ou la valeur à comparer

```

1:  $initFreq \leftarrow F_c; bandwidth \leftarrow W_i; threshold \leftarrow \lambda_i; channelEnerg \leftarrow E_i;$ 
    $minPowerAccept \leftarrow P_{min}; transmitPower \leftarrow P_i; newTransmitPower \leftarrow P_j.$ 
2: while  $channelEnerg(E_i) > threshold(\lambda_i)$  do
3:   if  $(P_i) > (P_{min})$  then
Require:    $(E_i \leq \lambda_i) \wedge P_j > P_{min}$ 
Ensure:    $\neg(P_i) \wedge (W_i) \wedge (P_j)$ 
4:      $(W_i) \wedge (P_j)$ 
5:   else
6:      $Action :: MoveToBand(W_j)$ 
7:   end if
8: end while

```

ALG 7.1: Adaptation de la puissance de transmission (P_i, W_i, F_c, P_j)

dans le processus de prise de décision. La configuration la plus notable dans cette règle (ALG 7.1), concerne les contraintes fixées par les prédicats *REQUIRE*. Pendant que le prédicat *REQUIRE* impose les critères, avec l'énergie ($channelEnerg(E_i)$) devant être inférieure ou égale au seuil ($threshold(\lambda_i)$) et la nouvelle puissance de transmission (P_j) répondant à un minimum de qualité (P_{min}) acceptable, *ENSURE* affiche les états obtenus avec l'association de la nouvelle puissance à la bande (W_i). L'ancienne puissance de transmission (P_i) peut alors subir différentes modifications (choix au niveau du prédicat *REQUIRE*) jusqu'à ce que les conditions posées soient satisfaites. Pour ce faire, si l'on considère la variable P_{max} comme étant la valeur de la puissance d'émission maximale raisonnable sur un canal donné, le choix de P_j s'opère alors dans l'intervalle $[P_{min}; P_{max}]$. Pour optimiser le nombre d'itérations nécessaires au choix de P_j , le principe de sélection de valeur par dichotomie est largement suffisant même si d'autres mécanismes tel que le parcours séquentiel de l'intervalle n'est pas à exclure a priori. Ce dernier pouvant être plus efficace pour les intervalles de puissance de transmission de petite taille. A noter alors que le plus important dans le processus de fixation de ces règles, est de parvenir à opérer les choix de puissance qui s'accordent avec le prédicat *REQUIRE*.

```

1:  $initFreq \leftarrow F_i; initBand \leftarrow W_i; newFreq \leftarrow F_j; threshold \leftarrow$ 
    $\lambda_i; channelEnerg \leftarrow E_i; transmitPower \leftarrow P_j; numbDevice \leftarrow N;$ 
    $newBandwidth \leftarrow W_j; tvDeviceSensitivity \leftarrow S_i.$ 
2: if  $E_i \geq \lambda_i$  then
Require:    $\forall_i \in N, notOverlap(F_j, W_j, P_j, S_i)$ 
Ensure:    $\neg(W_i \wedge F_i) \wedge W_j \wedge F_j$ 
3:    $W_j \wedge F_j$ 
4: end if

```

ALG 7.2: Changement de bande ou canal (F_i, W_i, F_j, W_j)

La seconde stratégie (ALG 7.2) met en évidence l'action de changement de canal ou de bande de fréquence lorsque les conditions imposées par le prédicat *REQUIRE* ne sont plus satisfaites sur la bande initiale W_i . Ce prédicat dans ce cas précis, astreint pour le choix de la nouvelle bande W_j , à une puissance P_j ne générant pas d'onde qui soit nuisible au matériel médical de proximité ($notOverlap(F_j, W_j, P_j, S_i)$). Une fois la nouvelle bande libre identifiée (W_j), ayant pour fréquence centrale F_j , le prédicat *ENSURE* permet d'afficher le résultat obtenu et qui valide l'opération de

changement de bande de fréquence.

Une liste de stratégies, à l'image de celles-ci, est construite pour ainsi alimenter le module ou la fonction *SelectStrategy* du plan de gestion et une idée de leur mise en œuvre dans la pratique, sur les équipements de l'architecture e-santé Radio Cognitive est donnée à la section 7.3.4.

7.3.4 Expérimentation et résultats

Par l'entremise de cette section, nous détaillons la manière dont ces différentes stratégies pourront être implémentées dans la pratique au niveau des nœuds Radio Cognitive ou des dispositifs relais du cadre hospitalier proposé. Rappelons à cet effet que les stratégies sont élaborées avec les valeurs ou variables renseignées dans la base de connaissance désignée dans le plan de gestion par le terme *Database*. Les mesures réalisées par les équipements et les calculs préalable de certaines variables telle que la distance ou la position du nœud mobile constituent des tables importantes dont le remplissage précède toute exécution de stratégie. En effet, les interférences ne peuvent être évitées si l'on ne maîtrise pas la position géographique du nœud et si l'on n'a pas une vision précise de sa zone à risque (chevauchement). Le calcul de la position étant l'un des facteurs les plus complexes à modéliser parmi les différentes variables tel que nous l'énoncions précédemment, nous consacrons une partie de la mise en œuvre des stratégies à l'approfondissement de son étude déjà évoquée à la section 7.2.1. L'apport d'une vision claire sur le processus permettant d'obtenir les valeurs/variables et plus particulièrement la valeur de la distance utilisée, renforcera et facilitera la compréhension de notre travail d'expérimentation sur la mise en œuvre pratique d'un exemple de stratégie avec un équipement Radio Cognitive. Pour en avoir un aperçu plus clair, il suffit d'observer que la stratégie de changement de fréquence (*ALG 7.2*) n'est exécutable que si une réponse est apportée à la variable $notOverlap(F_j, W_j, P_j, S_i)$. Le calcul de la zone de chevauchement ou de la région concernée par la présence de l'utilisateur/patient mobile susceptible d'occasionner les interférences devra permettre aux points relais de fixer les limites des paramètres de transmission ($[P_{min}; P_{max}]$) en fonction des équipements sensibles avoisinants. Nous nous appuyons sur l'équation 7.2 pour les besoins de cette estimation. Toutefois, il est important de préciser que la distance utilisée dans ce calcul sera déduite des indications données par la fonction Grey Model afin de prendre en compte les incertitudes liées à l'environnement (Bâtiments, intérieur, extérieur etc.). La modélisation au chapitre précédent du module Grey Model présente ainsi un double intérêt avec l'estimation supplémentaire de la variable *distance*, donnée d'entrée de l'équation 7.2.

Estimation de la distance avec le Grey Model : Selon Ekram et al. [Ekra 09], il existe une relation entre la puissance de transmission et la puissance de réception et ce rapport est exprimé par l'équation 7.8.

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L} \quad (7.8)$$

Où P_r et P_t décrivent respectivement les puissances de réception et de transmission, G_r et G_t dénotent des gains d'antenne du récepteur et de l'émetteur, la variable L représente le facteur de pertes du système qui peuvent être dues au filtrage, liées à l'antenne ou au trajet, à l'absorption du milieu entre autres. La longueur d'onde en mètre, l'équivalent spatial de la période temporelle est alors exprimée par λ . De cette équation, est de toute évidence déductible la distance d séparant l'émetteur du récepteur. Dans le calcul de la distance ou de la position de l'utilisateur sur la base de cette équation, l'on suppose que le signal est périodiquement invariable. Le travail de comparaison des algorithmes de géolocalisation à l'intérieur de bâtiments proposé par Hatami et al. [Hata 06], basé sur les mesures

de la puissance reçue d'un signal radio ou le RSSI (Received Signal Strength Indication), valide cette assumption selon laquelle, la puissance du signal est stationnaire et gaussienne. Cependant, cette prédisposition semble être très approximative dans le contexte de la Radio Cognitive où la puissance du signal est assurément non stationnaire avec la politique d'adaptation automatique qu'il induit. La modélisation de la fonction Grey Model, cette fois se fait avec une prise en compte des pertes du système ainsi que des incertitudes liées à la forme du signal. Un aperçu des étapes importantes de cette modélisation, tenant compte de l'affaiblissement de propagation en espace libre (Path loss) est donné ci-dessous :

1. Expression simple de l'affaiblissement du signal :

$$L = 10 * n * \log_{10}(d) + C \quad (7.9)$$

Avec C , la constante qui représente les pertes du système.

2. Modélisation du signal reçu en tenant compte de cet affaiblissement :

$$RSS_0(i) = transmitRss - 10 * n * \log_{10}(d(i)/d_0) - C \quad (7.10)$$

Cette équation permet d'obtenir la première indication du signal (RSSI) à l'étape t_1 et la somme des signaux, pour matérialiser les réceptions successives ou la multiplication des échantillons de test en t_0 est exprimée par :

$$RSS_1(i) = \sum_{i=0}^n RSS_0(i) \quad (7.11)$$

Avec la variable n qui décrit le nombre total d'échantillons (réception) mesurés, dont la moyenne permet d'obtenir la valeur du $RSSI$ que nous désignerons par "Original RSSI" lors de nos simulations.

3. Une fois ces valeurs déterminées, l'on passe à l'étape de prédiction/estimation avec le Grey Model, afin de prendre en compte également d'autres incertitudes connues ou inconnues. On génère à cet effet, les facteurs de la matrice B , avec $B(i, 2) = 1$ et ensuite pour $i = 1$ à $(n - 1)$ on obtient :

$$B(i, 1) = -1/2 * (RSS_1(i) + RSS_1(i + 1)) \quad (7.12)$$

On génère un nombre de vecteurs y_n tel que pour $j = 1$ à $(n - 1)$ l'on ait :

$$y_n(j) = RSS_0(j + 1) \quad (7.13)$$

Ces vecteurs permettent de déterminer la tendance de prédiction et de prendre en compte le coefficient d'incertitude.

4. Si l'on note par $BT = B'$, la transposée de la matrice, la solution de la matrice dévient alors :

$$v = inv(B' * B) * B' * y_n \quad (7.14)$$

Avec les variables a et b que l'on peut maintenant déterminer par $a = v(1)$ et $b = v(2)$.

5. Le calcul ou l'estimation de la puissance du signal ($RSSI_{prédit}$) en tenant compte des différents facteurs de perte est réalisé pour l'ensemble des signaux reçus comme suit :

$$predictRss_1(i) = RSS_1(i) \quad (7.15)$$

$$predictRss_1(i + 1) = (RSS_0(i) - b/a) * exp(-a * n) + (b/a) \quad (7.16)$$

Sur la base de ce calcul de la puissance du signal reçu, avec la prise en compte de diverses incertitudes, l'on génère aléatoirement des variables distance par $d = x + (y - x) * rand(1, n)$ qui sont ensuite triées avec ($d = sort(d)$) puis utilisées à travers les différentes étapes de cette modélisation afin de visualiser les estimations/prédictions du signal reçu. Le fonctionnement de cette procédure a été testé à travers une série de simulations sous Octave, la version libre de Matlab-Simulink. Les signaux initiaux ont été générés grâce à la fonction $randn(n)$, qui permet d'ajouter du bruit gaussien (*AWGN*) perçu comme la variation de la puissance du signal émis. La génération de ce signal d'émission que l'on introduit dans l'équation 7.10 a permis d'obtenir une première version de la puissance de réception ($RSSI_{général}$) en fonction de la distance. Cette équation (équation 7.10) prend en compte le paramètre distance (d), généré aléatoirement et trié par ordre croissant. L'ajout de cette variable *distance* permet de respecter les exigences du scénario de simulation devant être constitué d'une puissance d'émission à laquelle l'on applique une distance pour obtenir la puissance de réception. Ensuite, le bruit généré par la fonction $randn(n)$ reflétant le signal original émis auquel l'on applique l'effet des pertes et des incertitudes afin d'aboutir au signal reçu ($RSSI_{général}$) tel que visible à la figure 7.8 et correspondant à une distance donnée. Se basant sur les premiers échantillons calculés, la fonction Grey Model produit de nouvelles estimations/prédictions du signal ($RSSI_{prédit}$) en fonction de la distance en s'appuyant sur l'effet de tendance et en prenant en compte les incertitudes supplémentaires non connues exprimées par sa variable b . Cette nouvelle prédiction/estimation du signal est représentée à la figure 7.8 par la courbe $RSSI_{prédit}$. Le RSSI prédit par le Grey Model pour une distance donnée et le RSSI effectivement calculé par l'équation 7.10, semblent être deux signaux sensiblement identiques. Cependant, des écarts pourraient être notables en pratique et dans un environnement intérieur et le Grey Model dans ce cas modéliserait mieux les incertitudes. A noter que l'intérêt du présent travail de simulation a été avant tout d'avoir réussi à démontrer le bon fonctionnement de cette technique dans un environnement maîtrisable (*free space path loss*) et d'avoir mis en exergue les prédispositions du Grey Model à modéliser parfaitement les incertitudes éventuelles qui ne manqueront pas dans le contexte du suivi de patient en milieu hospitalier.

Par ailleurs, cette figure démontre la relation existant entre la puissance du signal effectivement reçue et la distance séparant l'émetteur du récepteur. Ce résultat rend ainsi possible le calcul ou l'estimation de la position du nœud patient mobile dans l'architecture proposée et pourrait faciliter la caractérisation de la zone de chevauchement, représentative de la partie exposée au risque d'interférence. Ces résultats pourraient également constituer une base de connaissance importante dans la prise de décision sur la limitation de la puissance de transmission. Cette décision étant prise pour rappel, sur la base de la sensibilité du matériel médical de proximité et en fonction de la distance les séparant de l'émetteur mobile. Il est important de signaler qu'un mécanisme de renseignement ou d'identification du matériel médical en présence dans chaque zone devra être mis en œuvre. Une base de données renseignée manuellement ou automatiquement avec des radio-étiquettes (Tags RFID) associées à chaque équipement contribuera à l'enrichissement de la base de connaissance et facilitera la prise de décision. La variable *distance* ainsi calculée, la zone de chevauchement par la suite estimée et le caractère des équipements médicaux inhérents une fois connu, permet au module de prise de décision Radio Cognitive d'imposer la stratégie de communication adaptée afin d'éviter les interférences. Nous décrivons au paragraphe ci-dessous, l'une de ces stratégies possibles à titre d'exemple.

Expérimentation de la stratégie de saut fréquentiel : Le choix d'une stratégie est lié à différents facteurs tels que la qualité de service, les performances du réseau, les contraintes internes ou externes à l'environnement radio. Parmi les stratégies possibles, l'adaptation automatique de la puis-

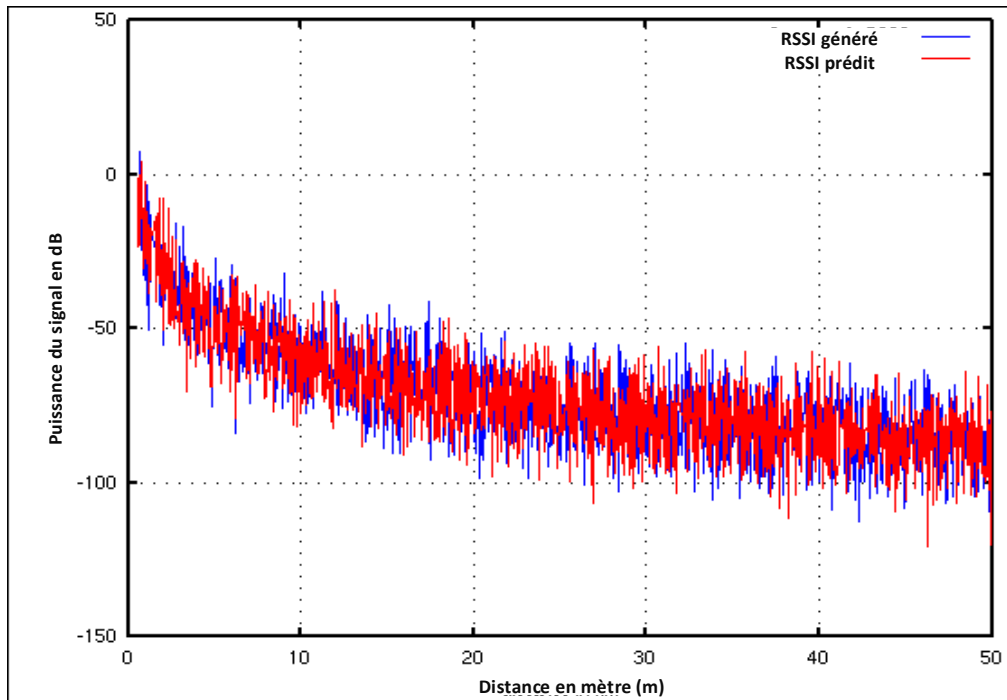


FIGURE 7.8 – Prédiction de la distance

sance de transmission et les sauts de fréquences nous paraissent assez intéressantes à expérimenter afin de mieux illustrer le plan de gestion des interférences. Toutefois, la modélisation du contrôle et de l'adaptation de la puissance de transmission pourrait fortement s'inspirer du calcul de la distance en fonction de la puissance que venons de réaliser (paragraphe précédent). En effet, le choix d'ajustement de la puissance d'émission rime avec les principes de distance entre l'émetteur mobile et le matériel médical sensible, le respect du seuil des interférences défini sur la base des caractéristiques de la zone de chevauchement entre autres. Ainsi, pour apporter une plus grande visibilité sur la faisabilité du plan de gestion, nous optons pour l'expérimentation ou le test d'une fonctionnalité supplémentaire, distincte du calcul de puissance d'émission ou de réception précédent. Le saut de fréquence est alors retenu dans le cadre de cette expérience et réalisé sur notre plateforme Radio Cognitive. Pour ce faire, nous avons utilisé deux nœuds, un récepteur et un émetteur s'échangeant des signaux de communication. Afin de visualiser les échanges, le récepteur exécute la fonction du sondage sur la bande cible tandis que l'émetteur transmet des signaux tout en changeant automatiquement de canal ou de fréquence centrale dès lors que le seuil acceptable des interférences est excédé. Les extraits de code suivants fournissent quelques détails sur les modifications apportées à la configuration des nœuds dans le cadre de ces tests.

L'extrait ci-dessous permet de définir certains paramètres tels que la source du signal, la fréquence d'échantillonnage ou encore le gain.

```
# The graph and some parameters definition
self.u = usrp.source_c(fusb_block_size=options.fusb_block_size,
fusb_nblocks=options.fusb_nblocks)
self.fft_size = options.fft_size
self.src_freq = src_freq = 900 #signal source frequency
```

```
self.samp_rate = samp_rate = 64000
```

```
self.interpolation = interpolation = 16
self.gain = gain = 10
self.amp = amp = 10
```

Par la suite, il est important de noter les valeurs des convertisseurs analogique-numérique ou numérique-analogique ainsi que la fréquence de décimation ou de sous-échantillonnage permettant de réduire la quantité de données voir la taille des échantillons de signaux originaux.

```
adc_rate = self.u.adc_rate() # 64 MS/s
usrp_decim = options.decim # 16 MHz;
self.u.set_decim_rate(usrp_decim)
self.freq_step = usrp_rate = adc_rate/usrp_decim # 16 MHz;
```

L'une des modifications les plus importantes dans ces tests de saut de fréquence, c'est la définition des sous-canaux. Par sous-canaux, nous entendons la subdivision d'une bande de fréquence plus large en plusieurs sous bandes avec pour chacune, une nouvelle fréquence centrale. Comme on peut le constater, nous avons choisi de subdiviser la bande de 16 MHz (900 MHz à 916 MHz) en 8 sous-bandes de 2 MHz chacune. Le choix d'une telle subdivision est beaucoup plus lié à la nécessité de visualisation (image) des différents sauts de fréquence, qu'à une question de performances. Cette subdivision étant parfaitement réalisable avec des sous-bandes plus larges et en fonction des besoins des applications en bande passante.

```
#Channels definition
self.min_freq = eng_notation.str_to_num(args[0])
self.max_freq = self.min_freq + 2e6
#Channels list
if self.min_freq == 902e6: self.band = 0 # 2 MHz of bandwidth
elif self.min_freq == 904e6: self.band = 1
elif self.min_freq == 906e6: self.band = 2
elif self.min_freq == 908e6: self.band = 3
elif self.min_freq == 910e6: self.band = 4
.
.
.
elif self.min_freq == 916e6: self.band = 7
```

Une fois le choix de la subdivision des bandes achevé, l'émetteur choisit de manière aléatoire son canal de transmission parmi ceux libres. Pour rappel, ce changement a lieu lorsque le seuil des interférences est franchi sur la bande précédemment occupée. Notons qu'en lieu et place d'un choix aléatoire, il est possible de faire une classification des bandes en fonction de leurs caractéristiques (largeurs, qualité etc.).

```
def hop_to_new_band(self):
    x = random.randint(0,7)
    while x == self.band:
        x = random.randint(0,7)
    self.min_center_freq = 900e6 + x*2e6 + self.freq_step/2
```

Les différents canaux peuvent en effet présenter des caractéristiques différentes, le plus important restant de renseigner de manière statique ou dynamique les contours de ces différentes sous-bandes et leurs fréquences centrales respectives.

```
self.max_center_freq = self.min_center_freq + 1e6
self.next_freq = self.min_center_freq
self.band = x # current TX channel, between 0 and 7
self.set_new_random_tx_freq()
self.set_amp()
```

Enfin le dernier extrait présente la fonction *AWGN* employée pour générer le bruit sur le canal en cours d'utilisation. Cette fonction permet d'amplifier le signal sur le canal et d'accélérer le débordement du seuil autorisé. Une fois le seuil excédé, le mécanisme de changement de fréquence est enclenché et les résultats affichés à la figure 7.9, illustrent parfaitement le fonctionnement.

```

tb.set_new_random_tx_freq()

y = 0
y = awgn(x,10,'measured'); % Add white Gaussian noise
avg_energy = y/tb.fft_size
if avg_energy > tb.threshold:
    print "change channel %0.1f is > %d" %(avg_energy, tb.threshold)
    tb.hop_to_new_band()

```

La figure 7.9 présente les résultats d'expérimentation du saut fréquentiel. La transmission débute sur l'une des sous-bandes (sous-canal) qui subit simultanément les effets du bruit généré. Une fois le seuil fixé atteint, la transmission bascule automatiquement de la bande ayant pour fréquence centrale f_1 au temps t_1 vers une nouvelle bande définie par la fréquence centrale f_2 , au temps t_2 à titre d'exemple. Il est important de préciser que les nœuds impliqués dans la mise en place d'un tel mécanisme de saut de fréquence, s'accordent sur la sélection d'un canal de signalisation. Ce canal permet des échanges qui facilitent la synchronisation des communications en conformité avec les sauts opérés. Le choix du canal de signalisation dans la littérature se fait soit de manière statique [Nath 14], soit de manière dynamique [Doer 08][Htik 12]. Pour ce qui concerne les résultats actuels, le sous-canal que nous dénommons *signaling* ($self.min_freq == 900e6 : self.band = signaling$) a été désigné pour accomplir cette tâche.

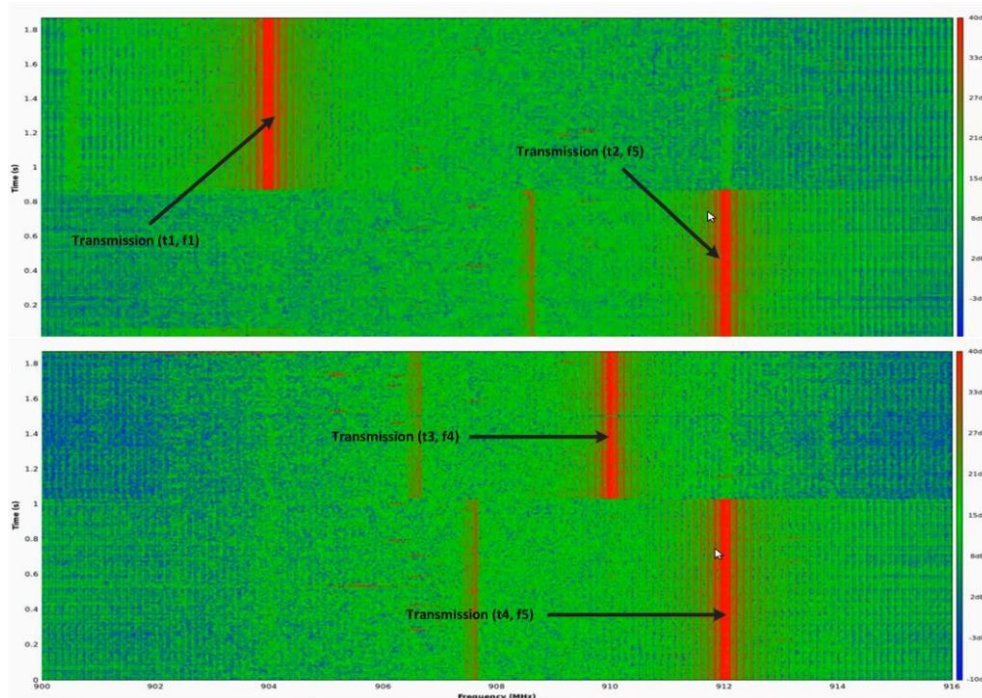


FIGURE 7.9 – Résultat d'expérimentation du saut de fréquence

L'approche ainsi proposée pour la gestion des interférences, se résume en deux actions princi-

pales. La première action concerne le calcul et la maîtrise de la zone de chevauchement. Elle a été étudiée en détail en collaboration avec Thao-② qui poursuit son travail de thèse sur cette thématique. Signalons au passage que cette collaboration a donné lieu à deux publications-①-② sur la problématique de gestion des interférences. La seconde se focalise sur un cadre que nous avons nommé plan de gestion, regroupant l'ensemble des stratégies à mettre en œuvre et devant servir de base, pour la prise de décision face au contexte de vulnérabilité des équipements médicaux (hôpital) aux ondes électromagnétiques (transmission des nœuds mobiles). Par ailleurs, il nous paraît important de mentionner que ce contexte de transmission hospitalier ainsi que les dispositions associées constituent des parties intégrantes du travail de collaboration avec Thao et sont inclus dans les actes de conférences précédemment évoqués. Nous donnons un bref aperçu de ces deux publications à la section 7.4.

7.4 Publications relatives à cette partie

Les deux publications relatives à ce chapitre reflètent les deux phases ayant marquées ce travail. La première phase qui se rapporte à l'article ②, concerne l'étape d'analyse des zones de chevauchement et les simulations ayant permis d'évaluer l'impact des transmissions en fonction de leurs tailles. La seconde phase qui est en liaison avec la publication ①, relève du cadre hospitalier ainsi que du plan de gestion proposé pour la réduction des interférences sur le matériel médical sensible.

① - Conférence IEEE Healthcom, October 2013 : **Dramane Ouattara, Thao Quach, Francine Krief and Mohamed Aymen Chalouf**; *Mitigating the Hospital Area Communication's Interference Using Cognitive Radio Networks*; 15th IEEE International Conference on e-Health Networking, Application & Services (IEEE Healthcom 2013), Lisbon, Portugal, 5 pages.

② - Conférence IEEE ICUFN, July 2013 : **Thao Quach, Dramane Ouattara, Francine Krief, Hicham Khalife and Mohamed Aymen Chalouf**; *Overlap Regions and Grey Model-Based Approach for Interference Avoidance in Cognitive Radio Networks*; The Fifth International Conference on Ubiquitous and Future Networks, IEEE ICUFN, Da Nang, Vietnam, July 2013, 5 pages.

Ces actes et communications scientifiques qui constituent pour nous un début de résultat intéressant, témoignent aussi de l'importance de la question des interférences en milieu hospitalier. Nous devons toutefois admettre après cette étude, qu'il subsiste de nombreux défis à relever, assortis de diverses questions auxquelles des réponses devront être trouvées. Nous énonçons quelques unes de ces questions dans la section 7.5, afin de permettre à chacun de s'en faire une idée plus précise.

7.5 Discussion

Les résultats obtenus soulèvent deux questions fondamentales qui concernent notre travail préliminaire de calcul de la variable distance, qui est une valeur très significative dans l'adoption et la mise en œuvre de stratégies telle que l'adaptation des paramètres de transmission. La première se rapporte à la précision dans le calcul de la position géographique du nœud mobile et la seconde s'intéresse à l'opportunité de la technique utilisée pour ce calcul, à savoir le Grey Model.

La fonction de calcul de la distance évoquée est-elle suffisante dans la détermination des coordonnées géographiques du nœud mobile ? De toute évidence, la connaissance de la distance séparant le point relais Radio Cognitive au nœud mobile du patient n'est pas suffisante pour connaître avec exactitude la position de ce nœud mobile dans la cellule radio. Nous illustrons cette assertion par la figure 7.10, où le nœud *A* dont la couverture ou la cellule est matérialisée par le cercle, à équidistance de chacun des nœuds mobiles *B*, *C*, *D* et *E*, ne saurait faire la distinction entre ces nœuds et leurs positions respectives. Plus précisément, sur la base de la distance, les nœuds *B*, *C*, *D* et *E* occupent une même position pour l'émetteur *A*.

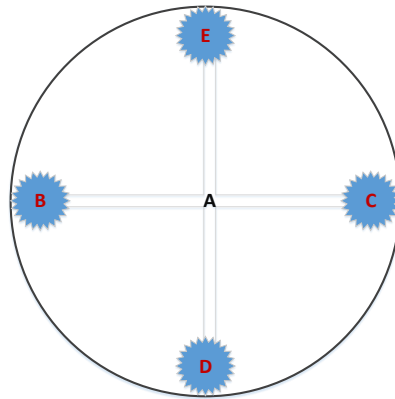


FIGURE 7.10 – Complexité dans la détermination de la position du nœud mobile

Ce problème selon nous, trouve une solution dans la coopération entre les nœuds à travers la fonction du plan de gestion dénommée *ExternalDissemination*. En effet, les échanges d'information (*distance*) entre au minimum trois nœuds adjacents permet de localiser avec précision la position du nœud concerné, suivant le principe de l'algorithme de triangulation dynamique (DTA : Dynamic Triangular Algorithm) [Wang 08] par exemple. Au calcul de la distance, devra alors être associée une fonction similaire (TDA), afin de déterminer efficacement le périmètre concerné dans la cellule.

Un algorithme d'apprentissage associé ou non au Grey Model ne serait-il pas un choix plus logique pour le calcul de la distance ? La question du choix d'un algorithme d'apprentissage en lieu et place du Grey Model ou encore leur association dans le calcul de la distance apparaît triviale. D'abord parce que le contexte semble favorable à l'apprentissage, avec des cellules restreintes donc plus facilement modélisables, ensuite parce que les dispositifs relais sont fixes. Pour rappel, le calcul de la distance incombe aux émetteurs-récepteurs déployés/planifiés dans l'environnement hospitalier. Par conséquent, les changements fréquents de zone étant exclus, l'on pourrait à priori parler d'un environnement stable et facile à apprendre. Toutefois, il faudra noter que l'absence de mobilité ne concerne pas le nœud attaché au patient. Alors ces émetteurs-récepteurs fixes auront à gérer un minimum de mobilité. De plus, il faudra tenir compte de la diversité des signaux à apprendre liée aux technologies en présence. En effet, avec l'adaptation dynamique de puissance, chaque émission engendrerait une forme de signal singulière. L'algorithme d'apprentissage devra alors s'entraîner sur une pluralité de vecteurs de puissance c'est à dire des échantillons ou des motifs associant chaque puissance de signal à une forme d'onde donnée. Nous avons donc fait le choix du Grey Model pour des raisons de simplicité, néanmoins, les techniques d'apprentissage ne sont pas à exclure si l'on est en mesure d'alimenter la base de connaissance en échantillons d'apprentissage assez représentatifs.

Les communications Radio Cognitive dans le contexte hospitalier peuvent-elles être autorisées ?

Les réticences vis-à-vis des ondes électromagnétiques en milieu hospitalier peuvent amener à se poser la question légitime de l'acceptation du principe que nous proposons dans ce chapitre. Cependant, force est de constater que les propositions de solutions (entreprise Globule, les solutions ekahau, Aerohive Networks, aptilo networks, CB Networks, etc.) sans fil pour l'environnement hospitalier se multiplient. De plus, le matériel médical communique de plus en plus en sans fil. Cette tendance qui procure plus de confort, aussi bien au patient qu'aux personnels soignants dans leurs activités devrait se poursuivre. Toutes ces raisons, soutiennent donc notre optimisme quant à l'acceptation d'une technologie capable de gérer efficacement les problèmes d'interférence (ondes électromagnétiques) telle que la Radio Cognitive en milieu hospitalier.

La détermination des coordonnées géographiques ne conduit-elle pas à plus de calculs, d'échanges d'information et donc d'interférences ?

Dans le cadre de cette proposition, il est indéniable que le mécanisme de localisation (distance) que nous proposons apporte plus de calculs et nécessite des échanges importants entre les nœud concernés. Toutefois, comme les équipements supportant ce calcul sont fixes, cette opération nous semble supportable. De plus, la possibilité d'utilisation d'un canal différent des canaux de communication, offerte par le mécanisme de signalisation, permet de se préoccuper très peu de la question des interférences liées auxdits échanges.

7.6 Conclusion

Dans ce chapitre, l'analyse de quelques scénarios de chevauchement entre les émetteurs-récepteurs Radio Cognitive et les réseaux d'accès, nous a permis de proposer un contexte approprié à la coexistence entre le matériel médical sensible et les transmissions dans le cadre du suivi de patient en milieu hospitalier. Nous avons ainsi introduit le principe de planification des nœuds Radio Cognitive, capables d'adapter automatiquement leurs paramètres de transmission en fonction des risques d'interférence mesurés. Les résultats obtenus, aussi bien pour le calcul de la distance et de l'estimation de la zone de chevauchement que pour la stratégie de saut de fréquence, démontrent que l'introduction des réseaux intelligents dans le domaine de la santé offre cette opportunité d'aboutir à des communications avec un niveau de perturbation acceptable. Par la présente étude, nous avons donc illustré les prédispositions de notre architecture de communication e-santé Radio Cognitive à gérer efficacement les interférences. Toutefois, nous devons admettre que certaines stratégies adoptées pour l'atteinte de cet objectif, plus particulièrement la stratégie de changement de fréquences, pourrait nuire gravement aux performances d'ensemble. Le prochain chapitre permettra d'étudier en détail la question et d'apporter des réponses aux nouveaux défis que celle-ci soulève.

Chapitre 8

Amélioration des performances des réseaux médicaux Radio Cognitive

“La science serait bien moins avancée si les désirs passionnés des individus de voir confirmer leurs propres croyances n’étaient pas rentrés en ligne de compte.”

William James

Sommaire

8.1	Introduction	108
8.2	Analyse de la problématique de performances	108
8.2.1	Présentation du contexte	109
8.2.2	Analyse des délais et défis à relever	110
8.3	Approche et solution proposée	112
8.3.1	Description du mécanisme d’anticipation	112
8.3.2	Modélisation du mécanisme avec le modèle de contrôle prédictif (MPC)	114
8.3.3	Implémentation, tests et résultats	116
8.4	Cadre d’application : Transmission de données multimédia	120
8.4.1	Présentation du cadre des transmissions	121
8.4.2	Modélisation du contrôle de la QoS et résultats	122
8.5	Publications relatives à cette partie	128
8.6	Discussion	129
8.7	Conclusion	130

Résumé

L’analyse des performances en terme de qualité de service (QoS), est le principal objectif de ce chapitre. Nous y détaillons les facteurs de perte de temps pouvant être préjudiciables pour certaines catégories d’applications médicales telles que les transmissions en temps réel de données multimédia. A cet effet, nous proposons un mécanisme de réservation de ressources et une technique de maintien de la QoS pouvant garantir un niveau de performance substantiel aux communications générées dans le cadre de notre architecture e-santé Radio Cognitive.

8.1 Introduction

Les technologies d'assistance, de diagnostic et de soins à distance des personnes âgées ainsi que la surveillance des maladies chroniques des patients sont des services contribuant à l'augmentation des échanges de données médicales de toute sorte. Cette diversité de contenu est supportée par une variété d'applications allant des plus exigeantes au moins contraignantes. En effet, pendant que certaines transmissions telles que la télé-assistance ou encore le télé-diagnostic sont à caractère temps-réel, sensibles à la latence et gourmandes en bande passante, d'autres se contentant des mises à jour par exemple, sont très peu affectées par les délais. La question des performances pourrait alors faire penser à une interpellation sur la disponibilité des canaux de fréquences et la suffisance de leur bandes passantes face à la demande grandissante des applications médicales. Une partie importante de la réponse a déjà été apportée à cette préoccupation à travers nos travaux d'expérimentation sur la plateforme Radio Cognitive, relatifs au sondage du spectre qui a démontré la sous-utilisation des fréquences et confirmé la présence de bandes libres. De plus, au chapitre sur la connectivité, nous avons illustré la capacité du nœud radio à détecter les canaux appropriés pour la réalisation de ses communications. Par conséquent, nous nous intéressons plus particulièrement aux dégradations de performances imposées par l'adoption de stratégies Radio Cognitive tel que le saut de fréquences. Ainsi, nous analysons les facteurs intrinsèques au fonctionnement de la technologie Radio Cognitive, pouvant constituer un frein à l'efficacité des communications, avant d'exposer quelques techniques de renforcement possible des modules cognitifs, pouvant palier aux insuffisances constatées. Pour ce faire, nous commençons par une analyse à la section 8.2, des questions de performances dans un contexte dominé par les changements de bandes de fréquences. Ensuite, nous suggérons l'approche de réservation à la volée de ressources, associée à un mécanisme de contrôle des paramètres de transmission devant assurer un niveau de qualité de service satisfaisant à la section 8.3. Un cadre de transmission de contenu multimédia, retenue comme scénario d'application est présenté à la section 8.4, suivi des sections 8.5 et 8.6, consacrées respectivement à la présentation sommaire des publications liées à cette partie et à l'ouverture d'une discussion sur les questions pendantes. La section 8.7 permet enfin de conclure ce chapitre consacré à l'analyse des performances.

8.2 Analyse de la problématique de performances

Pour mieux comprendre la problématique de performances dans les réseaux Radio Cognitive en général et dans l'architecture e-santé proposée en particulier, nous représentons le processus de réalisation des communications à travers la figure 8.1. A noter que nous avons retenu les modules les plus touchés par le problème, à savoir le module sondage et celui du partage du spectre.

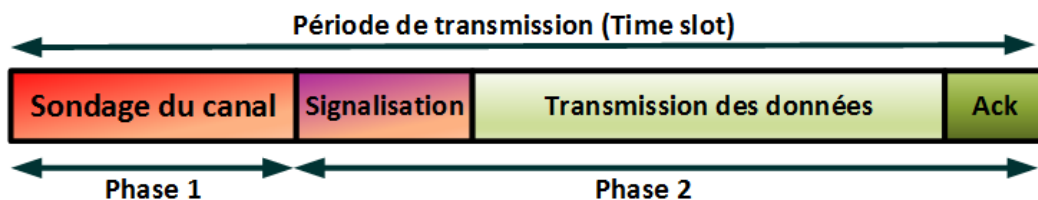


FIGURE 8.1 – Processus conduisant à la réalisation des communications

Le principe de transmission opportuniste ainsi que les contraintes de gestion des interférences, imposent au nœuds Radio Cognitive l'adoption d'un plan de communication périodique qu'il semble important de clarifier. En effet, l'accès au canal et le partage du spectre de manière générale se fait

selon une distribution de périodes (Time slot) entre les différents nœuds Radio Cognitive. Chaque période est alors marquée par une phase initiale (Phase 1) de sondage permettant de vérifier l'état éventuel d'occupation du canal par un utilisateur prioritaire. C'est une disposition prise, qui rentre dans le cadre de la prévention des interférences. La seconde phase (Phase 2) renferme l'action des protocoles de signalisation, les opérations de transmission des données et les séquences d'acquittement (ACK). Il est important de préciser qu'une communication dans ce contexte est constituée d'un ou de plusieurs Time slots. Ainsi, pour une même communication, chaque opération de sondage marque le début d'un nouveau Time slot. L'interruption éventuelle d'un Time slot (absence de Ack) conduit à une retransmission (au Time slot suivant) de la donnée associée (phase transmission des données) au Time slot inachevé et cela pour la communication inhérente. Le processus est donc marqué par divers traitements pouvant occasionner des délais significatifs pour certaines catégories d'applications. Pour en avoir une idée plus précise, nous schématisons un contexte qui étale le cheminement des données et permet d'appréhender les défis à relever à la sous-section 8.2.1.

8.2.1 Présentation du contexte

Rappelons que la phase de détection ou le sondage est très importante non seulement pour la découverte des bandes libres, mais aussi pour le contrôle du niveau des interférences. Le temps d'exécution du module Sondage est une valeur incompressible et plus cette fonction est exécutée, plus l'on augmente les chances d'obtention de meilleurs résultats (découverte de bandes libres). La signalisation est une opération nécessaire à l'initiation d'une session de communication et à la réduction de la probabilité des collisions de paquets. Aussi, un temps significatif devra être réservé aux transmissions de données suivies d'un délai accordé aux acquittements. Si nous désignons par « TempsMis », le temps de transfert des données correspondant à la séquence d'octets transmise par l'application avant de recevoir un accusé de réception (Ack), alors nous pouvons l'exprimer par l'équation 8.1.

$$TempsMis = T_{sondage} + T_{signalisation} + T_{transmisDonnees} + T_{ack} \quad (8.1)$$

Considérons à présent que nous ayons à transmettre des données du domicile d'un patient ou encore d'une ambulance vers un centre hospitalier tel que matérialisé par la figure 8.2.

La latence devient alors fonction du nombre de stations de base (CBS) ou de relais parcourus de l'émission à la réception finale. Plus le nombre de nœuds intermédiaires augmente, plus le délai entre l'émetteur et le récepteur est grand, chaque nœud étant tenu au respect des deux phases énoncées à la figure 8.1. Ce délai pourrait paraître acceptable s'il était limité à la phase 2, qui semble être le reflet du processus de transmission des réseaux traditionnels. Ainsi pour la transmission d'une séquence d'octets, le délai suit une variation calculée par l'équation 8.2.

$$Delai = \sum_{i=1}^{n-1} TempsMis(i) \quad (8.2)$$

Avec n désignant le nombre total de nœuds séparant l'émetteur du récepteur Radio Cognitive. Pour une infrastructure et des nœuds Radio Cognitive déployés à grande échelle, ce délai explose et il pourrait affecter la qualité des transmissions à caractère temps-réel. C'est une contre-performance dont l'origine est sans aucun doute liée à la récurrence du sondage (Phase 1), mais qui pourrait aussi trouver son explication dans la politique de partage des canaux tel que cela sera relevé à la section 8.2.2.

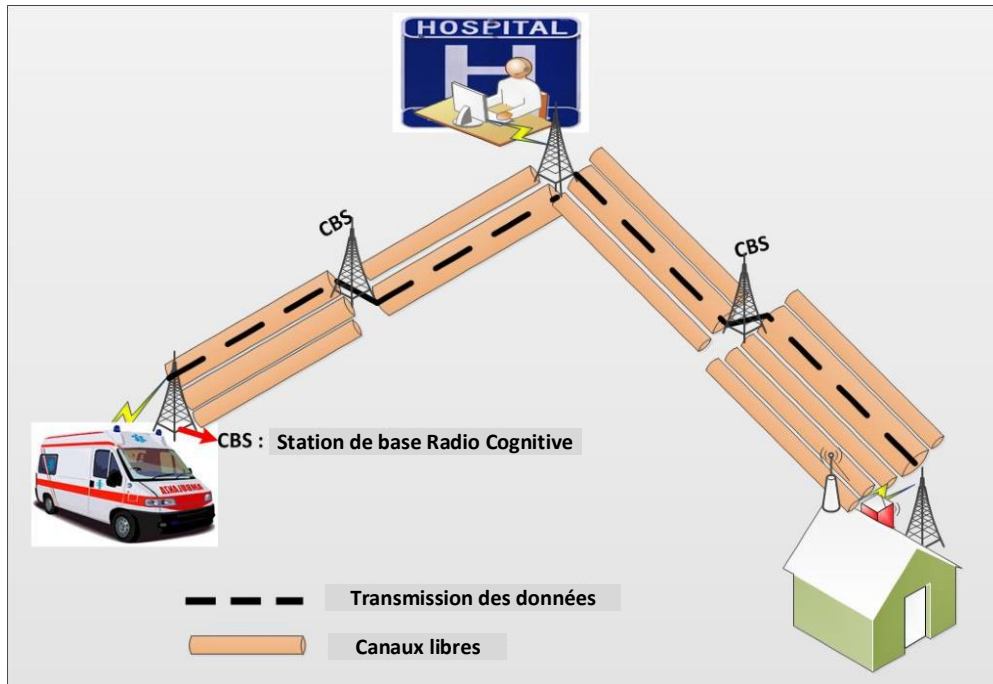


FIGURE 8.2 – Scénario des transmissions de données

8.2.2 Analyse des délais et défis à relever

Pour mieux expliquer la question des délais additionnels, qui sont engendrés par le partage des bandes de fréquence entre les utilisateurs secondaires, nous avons réalisé des simulations dont les résultats sont affichés à la figure 8.3. Nous partons de la configuration la plus optimisée à notre connaissance dans l'état actuel de la littérature. Cette configuration consiste à ériger les contenus en classe de priorité tel que suggéré par Hsien-Po et al. [Hsie 08] ou encore Jingfang et al. [Jing 11]. Ainsi, les contenus à caractère temps-réel composent l'une des classes et une priorité très élevée lui est affectée en général. Pour mieux comprendre le principe, nous identifions les priorités ou queues de priorité à une pile de données de communication pour laquelle, les dépôts sont triés par ordre (priorité) et dont les prélèvements se font en tête de liste. Les classes de trafic ayant une priorité forte, se retrouve au sommet de cette liste et accèdent ainsi au canal avant celles créditées d'une faible priorité. L'accès au canal est symbolisé par l'affectation de « Time slot » aux différentes queues de données. Un « Time slot » s'exécute entièrement avant que la fonction d'ordonnancement ne recalcule la priorité et n'autorise l'accès au canal à une nouvelle queue présentant une priorité nécessairement plus élevée. En d'autres termes, la préemption en cours de « Time slot » est exclue, elle ne peut avoir lieu qu'à la fin du « Time slot » en cours. Pour simuler l'ensemble de ce principe, nous avons défini une fonction chargée de l'exécution de dix queues de données avec une priorité assignée à chacune. La classification des queues respecte l'ordre croissant avec la queue 0 qui détient la plus forte priorité et la queue 9 héritant de la plus faible. La durée d'un « Time slot » a été fixée à dix secondes et la figure 8.3 donne un aperçu du résultat d'exécution de la fonction de simulation. Sur cette figure, la queue en cours d'exécution est marquée par la couleur rouge tandis que la couleur bleue est réservée aux queues en attente. Le fait le plus significatif est de constater par exemple que la queue 3 est en cours d'exécution pendant que la queue 0, avec sa forte priorité est en attente au « Time slot » 7. Ce n'est qu'une fois les dix secondes

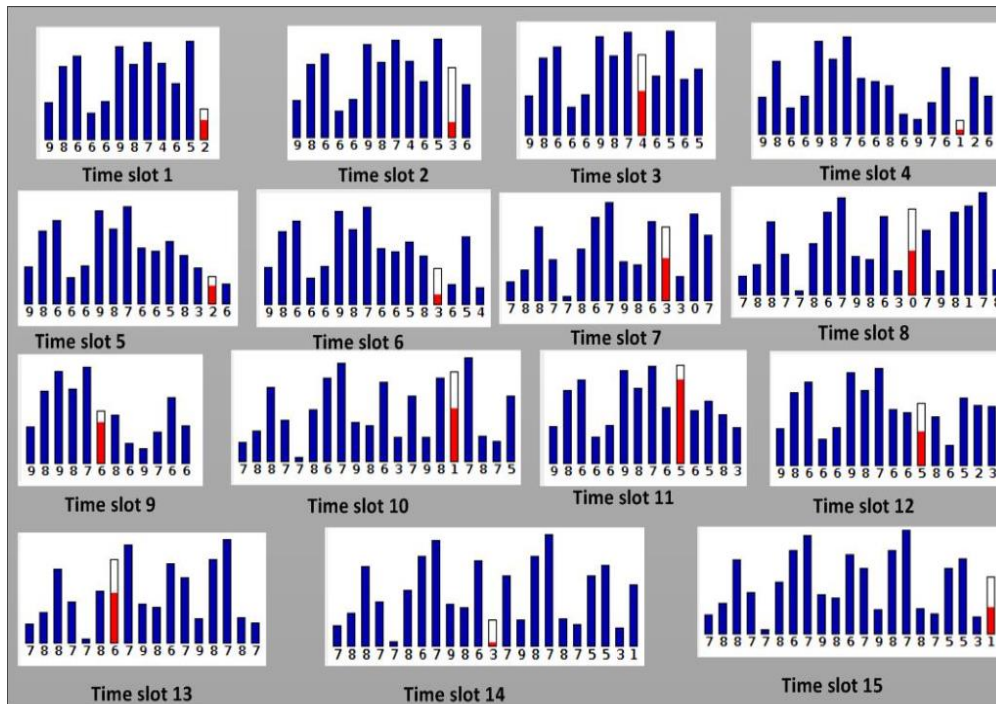


FIGURE 8.3 – Fonctionnement du partage des canaux et délais

du « Time slot » 7 achevées, que la queue 0 se retrouve privilégiée sur la base de sa forte priorité au « Time slot » 8. Cela démontre parfaitement le fonctionnement du mécanisme de priorisation des accès au canal entre les utilisateurs et met en exergue une attente latente. Ainsi, la probabilité d'attente est réelle et son degré dépend de l'instant d'arrivée ou d'apparition du flux prioritaire. Plus la queue de données prioritaires survient en début de « Time slot », plus l'attente dévient longue. Cette tendance est bien exprimée par la figure 8.4 où le ratio du temps d'arrivée sur le temps d'attente est retracé.

La figure 8.4 symbolise le temps perdu dans l'attente de la terminaison d'un « Time slot ». La multiplication de ces délais, éventuellement dictée par l'augmentation du nombre d'utilisateurs partageant les canaux, associée au nombre de nœuds relais pourrait affecter la qualité des transmissions. Il ressort également de ces résultats que pour différents flux (queues) ayant la même priorité, le temps d'attente pourrait subir un accroissement significatif d'un ordre supérieur à la durée du « Time slot ».

Au-delà de cette latence engendrée par le partage des canaux entre les utilisateurs secondaires, il existe un évènement plus préoccupant dont la survenue altère davantage les performances. Il s'agit de l'apparition d'un utilisateur primaire (licencié) sur le canal en cours d'utilisation qui impose par conséquent un saut de fréquence afin d'éviter les interférences et qui active les phases 1 et 2 de la figure 8.2. En effet, chaque changement de fréquence condamne le nœud Radio Cognitive à un nouvel accomplissement de l'opération de détection (Phase 1) encore plus longue. Ainsi, la récurrence des sauts fréquentiels qui constituent les actions les plus probables, pourrait sérieusement dégrader les performances de communication. L'ensemble des délais et les différentes contraintes ainsi exprimés méritent d'être pris en compte pour une architecture e-santé Radio Cognitive efficace et surtout pour permettre à cette dernière de supporter les communications de nature temps-réel. Afin de répondre à ces exigences de qualité des transmissions, nous suggérons une nouvelle approche de partage des

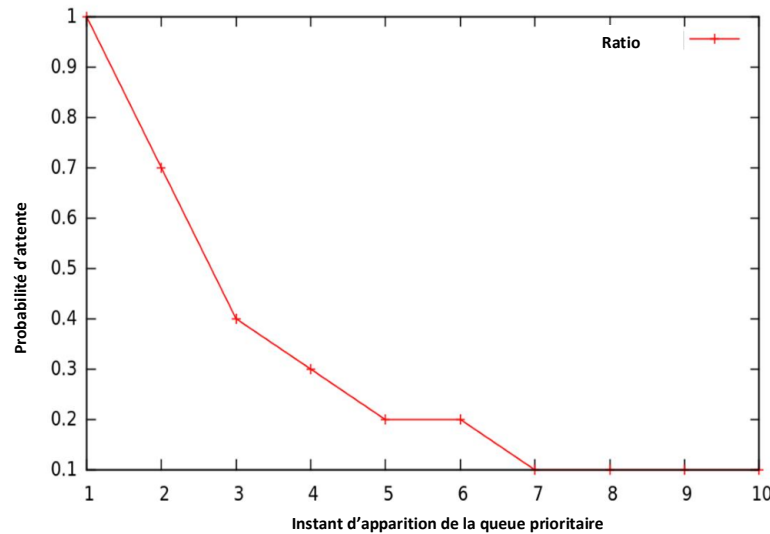


FIGURE 8.4 – Expression de la probabilité d'attente

canaux présentée à la section 8.3.

8.3 Approche et solution proposée

L'analyse des délais nous a permis de relever différents facteurs pouvant contribuer à la détérioration des performances du réseau e-santé Radio Cognitive. Parmi ces facteurs, les changements de fréquences semblent les plus inquiétants et à l'origine de ces insuffisances, car ils conduisent inévitablement à l'accomplissement de manière régulière de la phase de détection (Phase 1). De plus, les sauts fréquents augmentent la probabilité des attentes, car ils favorisent l'apparition de nouvelles queues souvent prioritaires, mais n'échappant pas aux pertes de temps liées à l'obligation d'achèvement du « Time slot » courant. L'approche proposée à cet effet consiste à maintenir les transmissions sous une contrainte de saut de fréquences. Il s'agit de procéder par une anticipation des changements de fréquences, pour aboutir à une réduction des délais liés au sondage du spectre et une prévention des attentes relatives à la politique de distribution des « Time slots ». L'illustration du fonctionnement dudit mécanisme est apportée à la section 8.3.1.

8.3.1 Description du mécanisme d'anticipation

Pour maintenir une communication en cours en réduisant les délais liés au sondage du spectre et les attentes relevant de la politique de partage des bandes de fréquence, nous proposons un mécanisme de réservation à la volée de bandes libres et un contrôle de l'état du canal à l'avance afin d'anticiper le processus de saut de fréquence. Ce mécanisme exprimé par la figure 8.5, intègre un nouveau processus (*P2*) implémentant la fonction de contrôle et réservation. Par ailleurs, notons que le processus *P1* matérialise la fonction de partage par priorité évoquée à la section 8.2.2 et qui symbolise aussi une pratique assez courante dans la littérature. La figure 8.5 exprime ainsi une partie du fonctionnement du nœud Radio Cognitive face à la problématique des délais. Ainsi, l'équipement radio maintient une liste de canaux libres obtenue grâce au module Sondage. Sur la base du type de contenu à transmettre ou des exigences des applications, le module Partage du spectre active, soit le sous-processus *P1*, soit

le sous-processus *P2*. Rappelons que l'ajout du sous-processus *P2* a pour principal objet de renforcer les performances de l'architecture e-santé Radio Cognitive que nous proposons et cela afin de lui permettre de transmettre efficacement des données d'urgence ou des contenus sensibles à la latence. Les actions du sous-processus *P2* se déclinent en deux états. Ce processus une fois sollicité à travers la signalisation qui spécifie l'urgence ou le caractère du contenu, alloue (attribution) une première bande de fréquence ou canal et se prépare à passer au second état. Le second état se contente d'une opération de réservation au besoin, qui débouche sur le changement de canal. En effet, un ou plusieurs canaux sont réservés à l'avance et au besoin pour faire face à une probable indisponibilité du canal en cours d'utilisation. L'indisponibilité du canal est indiquée soit par la détection (module sondage) ou l'activité d'un utilisateur licencié, soit par la dégradation de la qualité des communications. Précisons qu'au minimum deux canaux libres sont nécessaires au fonctionnement de cet algorithme de partage-réservation. Le principe de réservation à la volée adopté dans ce cadre, vise à réduire les cas de monopolisation de canaux et à prévenir la sous-exploitation des ressources disponibles. Plus précisément, le processus de réservation se déclenche exclusivement lorsque cela est jugé nécessaire. Cette prise de décision est rendue possible grâce à une fonction de contrôle des paramètres, associée au sous-processus *P2*. Précisons que toute action de réservation à la volée enclenche parallèlement le sondage sur ledit canal et cette anticipation permet de réduire les pertes de temps liées aux activités qui précèdent la transmission des données (figure 8.1).

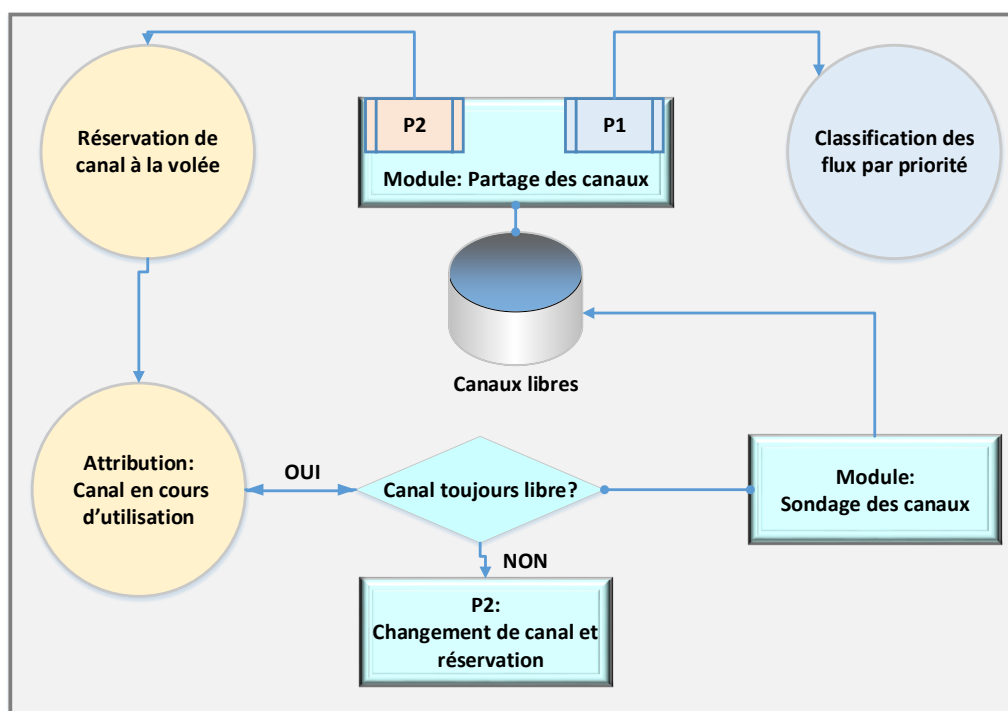


FIGURE 8.5 – Partage des canaux libres et mécanisme de réservation

Ainsi, pour une meilleure utilisation des ressources (canaux), réduisant la probabilité de réservation sans finalement accéder au canal, nous intégrons au processus *P2* une fonction reproduisant la technique du modèle de contrôle prédictif (MPC : Model Predictive Control) [Akpa 10] [Zhan 12] et qui devient la base de la prise de décision (Réserver ou non). Le choix de ce modèle se justifie par son aptitude à surveiller plusieurs paramètres et surtout sa capacité à créer une dynamique autour de ces

variables. En effet, c'est un modèle où le principe d'équilibrage est fondamental, de tel sorte que le changement de la valeur d'un paramètre n'entraîne pas forcément le passage à un nouvel état tant que l'équilibre général du système est préservé. De plus, le modèle *MPC* présente un avantage supplémentaire lié à son faible coût de calcul algorithmique [Jian 01]. En effet, contrairement à la majorité des modèles de prédiction statistique basée sur l'apprentissage d'un historique, le MPC réalise ses calculs et ses prévisions sur la base du « Time slots » courant. Les principales étapes de la modélisation de cette prise de décision sont fournies à la section 8.3.2.

8.3.2 Modélisation du mécanisme avec le modèle de contrôle prédictif (MPC)

Le modèle de contrôle prédictif se résume en une technique capable de s'adapter à la dynamique d'un processus grâce à son contrôleur temps-réel et de prédire le comportement futur dudit processus. Nous intégrons alors ce mécanisme à la fonction de partage des ressources afin de contrôler les paramètres radio et d'optimiser la gestion des canaux. Il s'agira de modéliser un système capable de faire le choix de la meilleure option entre, rester sur le canal sans en réserver un autre et changer de canal avec une réservation préalable, le tout en fonction des contraintes de l'environnement radio et des applications. Pour une meilleure compréhension de la suite de ce travail sur la modélisation du mécanisme de prise de décision relative à la réservation des canaux avec le *MPC*, nous livrons ci-dessous un résumé des étapes essentielles.

1. **Évaluation des paramètres de transmission :** Cette première étape est dédiée à l'acquisition ou à la mesure des valeurs permettant d'apprécier la qualité de la transmission et l'état du canal. Ces variables concernent entre autres le débit, la perte de paquets, la latence et peuvent être obtenues grâce à l'emploi d'outils de mesure des statistiques du réseaux ou de la QoS en temps-réel à l'image de « QoS Metrology » (QoSMet¹). Signalons également que pour ce qui relève des indications sur l'état d'occupation du canal, elles sont fournies par le module Sondage du spectre.
2. **Prise de décision :** Cette seconde étape se décompose en tests et hypothèses à vérifier. Le test est réalisé au « Time slots » t , où la fonction/module *MPC* calcule et prédit les conditions ou la variation des paramètres de transmission du « Time slots » $t + 1$. Il se dégage à partir de ce test deux hypothèses :

Hypothèse 1 : Les perspectives de communication sont bonnes au « Time slots » $t + 1$, alors on ne procède à aucune réservation de canal. Cette hypothèse marque une forte probabilité de maintien de la qualité des transmissions au prochain « Time slots » obtenue des résultats du *MPC*. Le risque de voir apparaître un utilisateur prioritaire sur le canal cible est également très faible.

Hypothèse 2 : Les perspectives de communication sont mauvaises au « Time slots » $t + 1$, alors un message est diffusé sur le canal de signalisation, indiquant la réservation d'un canal θ . Cette hypothèse, à l'inverse de la première, suppose une dégradation prévue de la QoS ou une indisponibilité du canal qui deviendrait occupé (par un PU) à partir du « Time slots » $t + 1$. Rappelons que la réservation est un évènement qui déclenche le sondage (Phase 1) et qui permet de réaliser un gain de temps sur cette phase et le début de la seconde phase (signalisation) éventuellement.

L'idée de base et le fonctionnement de la technique *MPC* sont introduits par la figure 8.6, où le vecteur r contient les valeurs de référence des paramètres de transmission.

1. <http://michaut.valerie.free.fr/qosmet/>

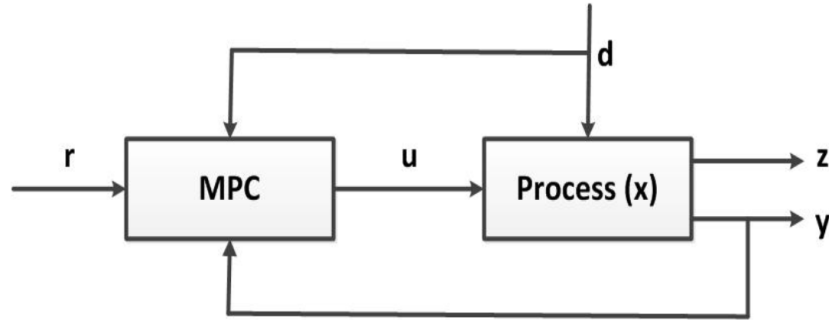


FIGURE 8.6 – Fonctionnement du modèle MPC

Sur la base des ces valeurs ou variables de référence, le contrôleur (la fonction *MPC*) manipule/adapte dynamiquement les variables d'entrée u . Le traitement réalisé par la fonction « *Process(x)* » sur ces variables, qui tient compte des perturbations (d) éventuelles, permet de prédire le comportement futur de celles-ci (« Time slots » $t + 1$). Le vecteur z représentant le résultat des estimations de ces variables, est par la suite comparé au vecteur y qui caractérise les valeurs réelles obtenues ou mesurées une fois la période $t + 1$ atteinte, afin de prendre en compte les erreurs de prédiction. Les perturbations décrites par la variable d dans le cadre de la présente modélisation, pourraient être liées au signal d'un utilisateur primaire et à tout autre bruit pouvant occasionner une dégradation de la qualité des transmissions. En somme, le principe consiste à surveiller les fluctuations possibles des paramètres de communications sur les futures périodes, afin de prendre des décisions en conformité avec les contraintes ou critères fixés par r . Pour ce faire, le modèle se base sur une fonction de transfert $T(x)$, exprimant la relation entre chaque variable d'entrée u et sa valeur de sortie z , formulée à travers l'équation 8.3.

$$T(x) = \frac{Z(x)}{U(x)} \quad (8.3)$$

Sur la base de cette relation, la formulation de ce problème d'optimisation ou la fonction objectif à minimiser est donnée par l'équation 8.4.

$$\phi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N w_{z_i} \|z_i - r_i\|^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N-1} w_{u_i} \|\Delta u_i\|^2 \quad (8.4)$$

C'est avec cette fonction d'optimisation que l'on arrive à estimer le comportement futur des variables. Ainsi, pour une modélisation avec une quantité de paramètres n à contrôler (valeurs de sortie) et un total de m variables à manipuler (valeurs d'entrée), la fonction d'optimisation correspondante est détaillée par l'équation 8.5.

$$\phi = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^{j=N_{z_i}} w_{z_i} \|z_i(t+j) - r_i(t+j)\|^2 \right) + \sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^{j=N_{u_i}} w_{u_i} \|\Delta u_i(t+j-1)\|^2 \right) \quad (8.5)$$

Dans ces équations, les coefficients w_{z_i} et w_{u_i} désignent des poids affectés aux paramètres afin de marquer l'importance de certaines de ces variables par rapport aux autres. Aussi, rappelons que dans sa modélisation du processus de prédiction, le *MPC* offre la possibilité de prise en compte de matrices de contraintes tel que détaillé par l'équation 8.6.

$$Px_{i+1} = Ax_i + Bu_i + Ed_i \quad (8.6)$$

Pour $i = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ ainsi que pour les valeurs de z et u suivantes :

$$Z_i = Cx_i, \text{ pour } i = 0, 1, 2, \dots, N$$

$$u_{min} \leq u_i \leq u_{max}, \text{ pour } i = 0, 1, 2, \dots, N - 1$$

$$\Delta u_{min} \leq \Delta u_i \leq \Delta u_{max}, \text{ pour } i = 0, 1, 2, \dots, N - 1$$

$$z_{min} \leq z_i \leq z_{max}, \text{ pour } i = 0, 1, 2, \dots, N$$

Il est notable que si l'on ne tient pas compte de la période t_0 , les contraintes pour chaque valeur prédite s'expriment alors par l'équation 8.7.

$$z_{min} \leq z_i \leq z_{max} \quad (8.7)$$

Cette formule est équivalente à la relation fixée entre les matrices de contraintes suivantes :

$$\begin{bmatrix} z_{min} \\ z_{min} \\ \cdot \\ \cdot \\ z_{min} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ z_N \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} z_{max} \\ z_{max} \\ \cdot \\ \cdot \\ z_{max} \end{bmatrix}$$

Une fois ces contraintes déterminées, leur respect pour les futures périodes traduit le comportement normal ou souhaité, tandis que toute déviation impose l'adoption d'une action alternative. Plus précisément et dans le cadre de l'emploi de cette technique afin d'anticiper les sauts fréquentiels, tant que les contraintes décrites seront respectées (avec des valeurs correspondant à ce contexte), aucun canal ne sera réservé. L'application de ces règles sur des exemples de données de transmission à la section 8.3.3, permettra de mieux comprendre le mécanisme.

8.3.3 Implémentation, tests et résultats

Pour les besoins de l'implémentation du mécanisme de réservation des canaux, en prenant comme base, les prédictions réalisées par la technique *MPC*, nous nous sommes appuyés sur l'environnement de calcul Matlab. Les paramètres tels que la latence, le débit, la largeur de bande, la puissance de transmission, composent les variables de simulation. Aussi, le tableau 8.1 donne une description plus détaillée des symboles utilisés dans le cadre de cette modélisation.

Paramètres	Description
N	Horizon de prédiction
u_{min}	Limite inférieure de chaque variable de transmission ou variable d'entrée
u_{max}	Limite supérieure de chaque variable de transmission ou variable d'entrée
Δu_{min}	Fréquence des changements ou variation liée au paramètre u_{min}
Δu_{max}	Fréquence des changements ou variation liée au paramètre u_{max}
z_{min}	Limite inférieure pour chaque paramètre prédit
z_{max}	Limite supérieure pour chaque paramètre prédit
x_0, u_0	Valeurs initiales attribuées au début de la simulation
w	Matrice de poids reflétant l'importance de chaque paramètre

TABLE 8.1 – Annotation des symboles utilisés

Les limites dans ce tableau, reflètent l'ensemble des contraintes à respecter pour une transmission, afin d'éviter les sauts de fréquences. Ainsi, le nœud Radio Cognitive concerné par ladite transmission ne procédera à une réservation à la volée d'un nouveau canal que lorsque ces instructions (tableau 8.1) sont transgressées. Cette disposition permet alors de réduire les risques de réservation d'un canal sans jamais l'exploiter par la suite. Elle apporte ainsi une meilleure gestion des ressources réseaux, par rapport à la pratique de réservation de ressources radios, courante dans la littérature [Miho 11]. La figure 8.7 présente un exemple pratique de définition de paramètres du modèle dans un codage Matlab. Nous nous sommes inspirés pour le choix de valeurs des différents paramètres, des recommandations du guide méthodologique pour l'expression des besoins en infrastructures à haut et très haut débit pour le déploiement des projets de télé-médecine en France².

```

Ts=3; %Sampling time
model=c2d(model,Ts); %Convert to discrete time
model.InputName={'Energy/sensitivity';...
'TransmitPower';'FreqBandwidth'};
model.OutputName={'Throughput';'delay';'packetLoss'};
model.InputUnit ={'dBm'; 'mW'; 'MHz'};
model.OutputUnit ={'Mbps'; 'ms';'percent'};
clear InputSpecs OutputSpecs
InputSpecs(0)=struct('Min',-150,'Max',-65,'RateMin',...
-1000,'Ratemax',Inf);
InputSpecs(1)=struct('Min',35,'Max',2000,'RateMin'...
,-1000,'Ratemax',Inf);
InputSpecs(2)=struct('Min',0,'Max',0.02,.....
'RateMin',1000,'Ratemax',Inf);
OutputSpecs(0)=struct('Min',10,'Max',300);
OutputSpecs(1)=struct('Min',0,'Max',15);
OutputSpecs(2)=struct('Min',0,'Max',50);
p=5; m=1;
MPCobj=mpc(model,Ts,p,m,Weights,InputSpecs,OutputSpecs);
Tfinal=12;

```

FIGURE 8.7 – Formulation des contraintes pour les simulations avec Matlab

Selon les études réalisées dans le cadre de ce guide, la latence acceptable pour les applications de télé-médecine diffusant des données en temps-réel ne doit pas excéder quinze millisecondes. De plus, le débit minimum permettant d'assurer une meilleure qualité de service est de dix mégabits par seconde tandis que le guide fixe la perte de paquets maximale pour une séquence de données de 100 octets à 0.2(%). Il est important de préciser que les contraintes fixées à la figure 8.7, sont dynamiques c'est-à-dire qu'elles évoluent en fonction de l'environnement et de la technologie radio utilisée. Le code Matlab affiche les limites que nous avons fixées pour les différents paramètres de transmission/simulation (*InputSpecs*, *OutputSpecs*). On peut s'apercevoir de la fréquence des changements liés à chaque variable, spécifiée par les valeurs des paramètres *RateMin* et *RateMax*. Aussi, la notation *p* est utilisée pour désigner l'horizon de prédiction. Avant d'apporter une description aux résultats obtenus, il est important de préciser que sous Matlab, une boîte à outils dénommée « Model Predictive Control Toolbox » et ses fonctions dérivées (*autosc*, *scal* et *wrtreg*) permettent de redéfinir

2. www.datar.gouv.fr

l'ensemble des valeurs liées aux paramètres, dans un même ordre de grandeur. Les estimations et les valeurs prédites sont par conséquent exprimées dans cet ordre de grandeur. La fonction objectif ou encore la commande consiste alors à minimiser un critère quadratique basé sur les erreurs de prédiction. Plus précisément, il s'agit de minimiser les écarts entre les valeurs prédites et les valeurs réelles obtenues ou mesurées et cela, en conformité avec les variables de référence r . Les résultats décrivent ainsi les vecteurs d'erreurs liés aux futures prédictions sur un horizon p . Cette commande au meilleur des cas, permet d'aboutir à une stabilité qui dénote de la création d'une dynamique entre les variables et reflète la bonne marche du mécanisme. Dans le cadre de ce travail de simulation, nous avons testé différents scénarios envisageables. Pour le premier, nous avons fixé les contraintes ou les limites aux variables d'entrée ainsi qu'aux variables de sortie. Une fois ces limites déterminées, les paramètres d'entrée subissent des ajustements dynamiques dans la limite des contraintes fixées. Pour le second scénario, les limites fixées ne concernent que les valeurs de sortie. Les variables d'entrée subissent tout de même l'effet des ajustements automatiques. Enfin pour le dernier scénario, nous imposons les limites, exclusivement aux variables d'entrée afin d'observer le comportement des variables de sortie. La figure 8.8 symbolise l'idée d'ajustement automatique des variables d'entrée. Les valeurs de la largeur de bande et de la puissance de transmission sont choisies et adaptées à l'intérieur de l'intervalle suggéré (limites), tandis que l'énergie sur le canal est mesurée et ne devrait pas excéder les limites fixées à son effet.

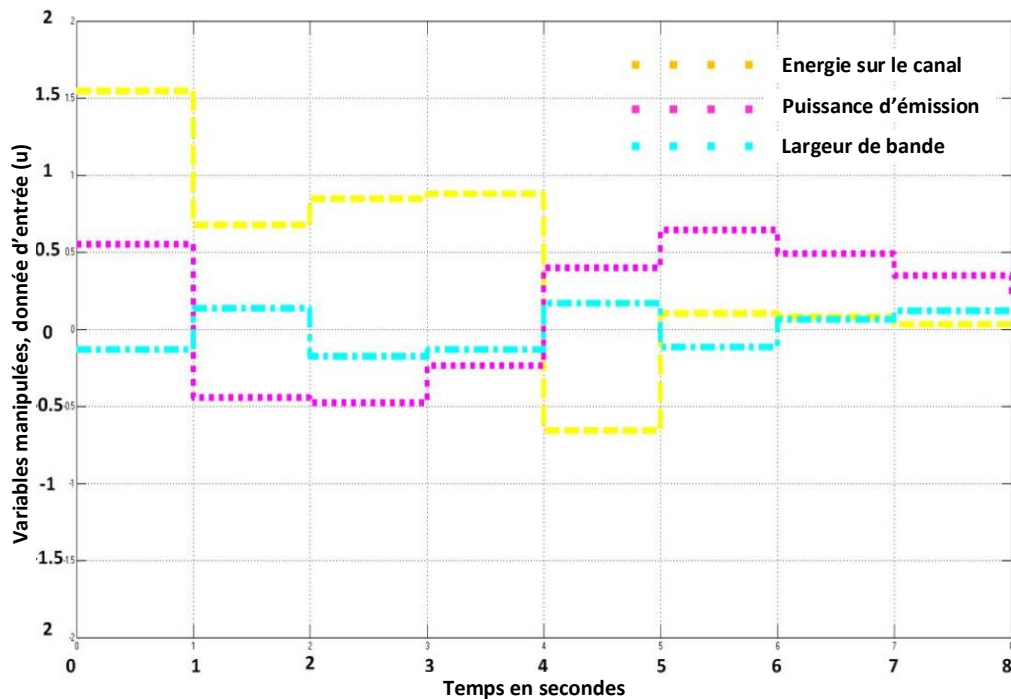


FIGURE 8.8 – Variation des paramètres d'entrée

Les différentes simulations ont permis de constater que le second et le troisième scénarios, aboutissent pratiquement à un résultat identique. Le système rencontre des difficultés c'est-à-dire qu'il a du mal à se stabiliser. Cette situation qui résulte d'un mauvais paramétrage et par conséquent d'une attribution non appropriée de valeurs aux variables d'entrée est dépeinte par la figure 8.9, où les valeurs prédites (variables de sortie) ne suivent aucunement la dynamique souhaitée. Le meilleur scénario de

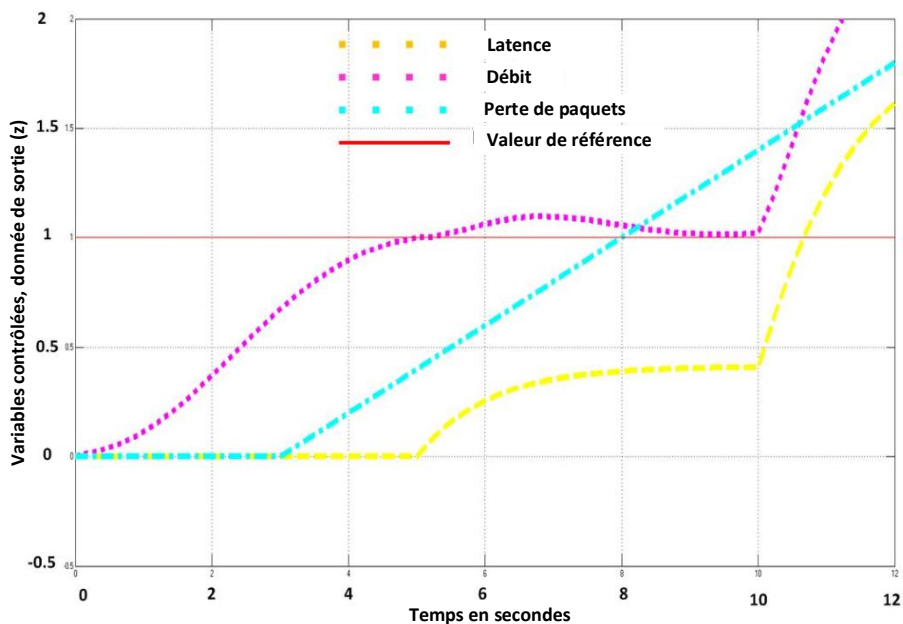


FIGURE 8.9 – Variation des paramètres de sortie, le cas sans équilibre

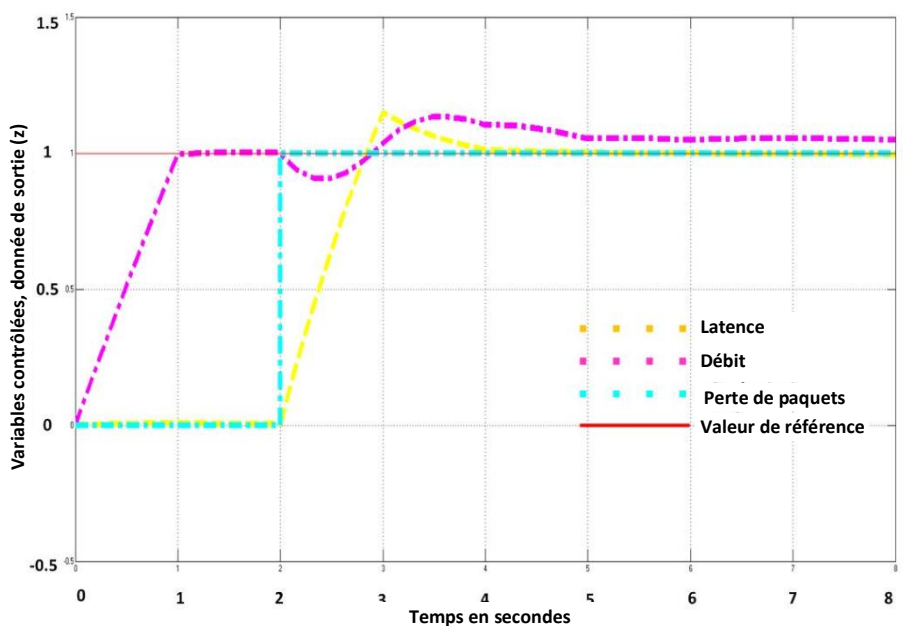


FIGURE 8.10 – Variation des paramètres de sortie, le cas avec équilibre

test consiste donc à fixer les contraintes, aussi bien pour les variables d'entrée que pour celles de sortie. Ce scénario correspondant au premier énoncé, permet d'obtenir très rapidement une situation de stabilité du système tel que visible à la figure 8.10. Cette figure reflète le comportement attendu où les contraintes imposées aux variables d'entrée sont respectées et les valeurs de sortie restent conformes à la tendance normale. Il faut signaler que toute déviation de cette tendance normale, crée une situa-

tion de déséquilibre semblable aux résultats de la figure 8.9. De manière plus concrète, les résultats affichés à la figure 8.10 désignent le fait que le nœud choisira ses valeurs de transmission dans l'intervalle proposé, la valeur de l'énergie mesurée ou prédite sera normale ou encore le seuil d'interférence ne sera pas excédé et enfin les conditions d'une bonne qualité des transmissions pour la future période ($TimeSlot = t + 1$) seront probablement garanties. Par conséquent, aucun canal n'est réservé pour cette future période. Ainsi, tout autre résultat différent (figure 8.9) engendre une exécution du processus de réservation.

L'un des avantages importants de ce travail, est d'avoir permis de montrer que dans un environnement très contraignant (interférences, QoS), un tel mécanisme associé au module de partage des ressources est capable d'encadrer parfaitement la technique d'adaptation dynamique des paramètres qui est un principe naturel des nœuds Radio Cognitive. La technique du modèle de contrôle prédictif se révèle alors très intéressante pour le renforcement des modules de Partage et de prise de Décision Radio Cognitive. Son implémentation pourrait devenir un gage supplémentaire de bonne qualité des communications de données de santé, surtout celles sensibles aux délais ou à la latence. Ce mécanisme de contrôle des paramètres de transmission nous semble alors fortement recommandable dans un contexte médical véhiculant de plus en plus de données multimédia. Par ailleurs, à cette technique de réservation à la volée des canaux ou des ressources, l'on pourrait rajouter de nouveaux critères permettant de contrôler également la qualité de service dans les échanges de contenus de type multimédia. A la section 8.4, nous donnons quelques détails sur la possibilité d'implémentation d'un tel cas de figure.

8.4 Cadre d'application : Transmission de données multimédia

L'efficacité des transmissions sans fil de données médicales multimédia, est assurément liée aux choix des techniques de compression des données et à la capacité de l'infrastructure réseau à offrir les ressources (bande passante) appropriées, pour un accès à internet à haut débit. A cet égard, les systèmes de compression de données efficaces sont largement étudiés dans la littérature et nous pouvons nous appuyer dans le cadre de notre architecture e-santé Radio Cognitive sur les normes d'encodage existantes tel que le MPEG et le H.264/AVC [Lope 13]. Quelques analyses sur les techniques d'encodage et les méthodes de résolution vidéo qui tendent à adapter les données multimédia aux paramètres de transmission des réseaux sans fil, réalisées par Jingfang et al. [Jing 11] ou encore Mingjing et al. [Ming 07] sont consultables pour plus de précisions. Nous soulignons que pour ce qui concerne les techniques d'encodage, l'adaptation aux paramètres de transmission suppose un choix pertinent du modèle de compression offrant une meilleur qualité du diagnostic, associé à la sélection d'une méthode de contrôle d'erreurs efficace tel que schématisé à la figure 8.11. Par conséquent, notre analyse dans cette section se concentre plutôt sur les aspects réseaux et s'oriente vers la négociation de proche en proche d'un niveau de qualité de service pouvant faciliter le travail des cliniciens hospitaliers. A cet effet, nous étendons pour rappel le mécanisme de réservation/attribution de ressources à la volée étudié à la section précédente, par l'ajout de critères de QoS, à la fonction de contrôle prédictif. Ce renforcement de l'outil *MPC* permettra d'apporter une politique d'adaptation dynamique des paramètres de transmission qui répondent aux exigences de QoS des applications médicales multimédia, additionnelle au rôle d'anticipation des sauts fréquentiels déjà évoqués (section 8.3). Nous nous intéresserons ici aux paramètres de QoS, du point de vue réseau. Il s'agit de la latence, de la gigue, des pertes de paquets et du débit. La description du cadre réseau de communication de données multimédia présenté à la section 8.4.1 permettra de mieux cerner le niveau d'implémentation d'un tel mécanisme de contrôle.

8.4.1 Présentation du cadre des transmissions

Dans le contexte de l'architecture de communication e-santé Radio Cognitive que nous proposons, les paramètres de transmission de données et les engagements de qualité de service pour rappel, se négocient entre les équipements radios de proche en proche à travers le protocole de signalisation. Rappelons que le protocole de signalisation désigne dans ce cas, un accord de partage d'un canal (libre) unique ou de plusieurs canaux (libres) désignés pour les échanges d'information de synchronisation et de gestion entre les utilisateurs Radio Cognitive. Compte tenu du caractère imprévisible de l'état des canaux avec la Radio Cognitive, de plus en plus de travaux de recherche proposent le passage du modèle à canal de signalisation fixe vers celui à canaux de signalisation dynamiques [Rong 11]. C'est un principe essentiel qui devra être appliqué dans toute sa dimension, dans ce contexte où le contenu à transmettre reste fortement sensible aux délais et tolère difficilement un taux de perte de paquets élevé. La figure 8.11 présente les différentes étapes qui composent le processus de transmission de contenu multimédia. Le processus débute avec l'acquisition des données et les différents encodages qui débouchent sur la sélection du canal de transmission approprié (section 8.3). Ce processus prend fin avec des données parcourant plusieurs nœuds pour atteindre la destination. Il est important de préciser que la négociation des paramètres et le contrôle de la qualité de service grâce au MPC concernent cette dernière phase de traversée des nœuds Radio Cognitive. Toutefois, pour les besoins de compréhension du processus général, nous faisons une description sommaire de ces différentes étapes qui sont illustrées par la figure 8.11.

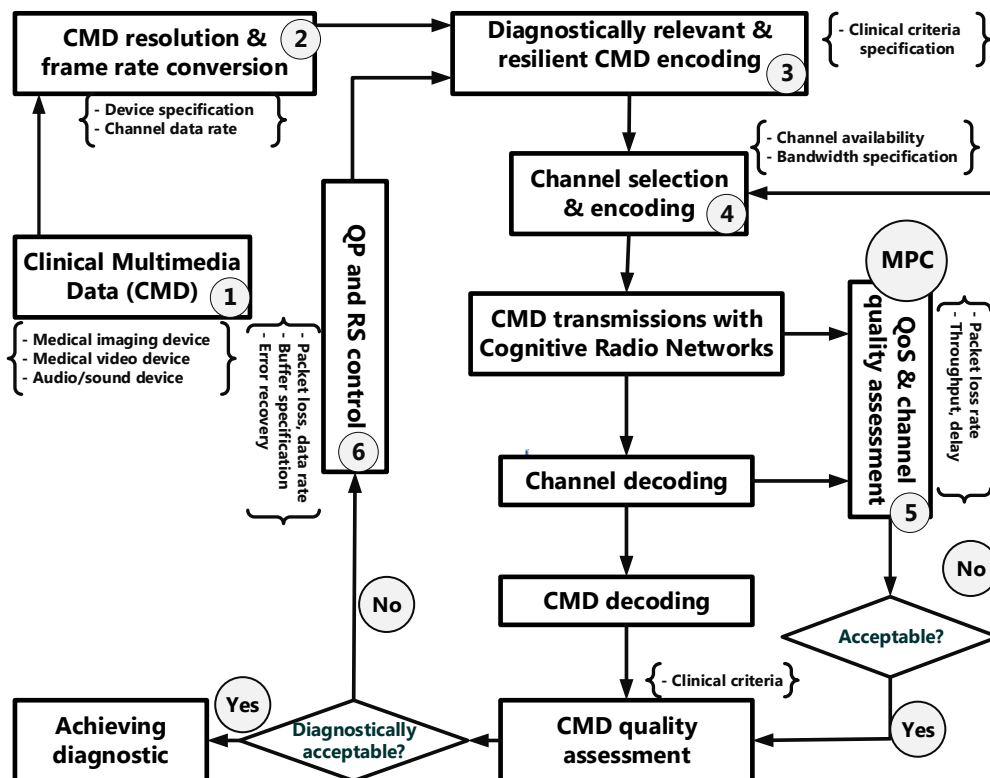


FIGURE 8.11 – Présentation du cadre des transmissions multimédia

1. **La phase d'encodage** : Elle désigne les étapes ① à ④ marquées par l'acquisition des données multimédia et leurs compressions ou encodages successifs. Les ultrasons, les endoscopes, les

appareils intra-buccaux, des microscopes chirurgicaux ou encore les capteurs constituent des exemples de dispositifs fournissant divers types de données médicales. Cette fonction de traitement ou d'acquisition de l'information, pour rappel non traitée dans ce travail de thèse aboutit au choix des spécifications ou de la résolution adaptée aux équipements. Signalons que l'étape ④ principalement, marque le début de la spécification des critères réseaux. En effet, c'est à ce niveau que s'opère la sélection de la bande (largeur) de fréquence qui répond au mieux aux critères de qualité de service liés à chaque type d'application. Il est important de mentionner que le mécanisme de réservation et d'attribution de ressources énoncé à la section 8.3 est mis à contribution au niveau de la présente étape pour le renforcement du processus de sélection de canal.

2. **La phase de transmission** : Cette étape notée ⑤, est ponctuée par l'acheminement des données qui devront traverser plusieurs nœuds avant d'atteindre le nœud terminal. Chacun des nœuds parcourus implémente l'algorithme de réservation (section 8.3), auquel est associé la fonction de contrôle de la qualité de service que nous modélisons avec la technique du *MPC* à la section 8.4.2.
3. **La phase de vérification** : Une fois la connexion établie et le démarrage des opérations de transmission effectif, le reste de la démarche consiste à mesurer la qualité de ces transmissions ou les performances du réseau dans sa totalité. Il faut signaler que les outils tels que *iperf*, *SJitter* ou encore *Wireshark* permettent d'obtenir des statistiques du réseau et lorsque ces statistiques affichent une mauvaise qualité de réception, les critères/paramètres de transmission sont réadaptés. Ces ajustements concernent aussi bien la négociation des paramètres réseaux contrôlés par le *MPC* à l'étape ⑤ que l'adaptation du tampon d'émission et les corrections d'erreur que nous symbolisons par l'étape ⑥. Les procédés de codage des échantillons ou de codage de paramètre de quantification (QP) flexibles tel que celui décrit par Hai-Miao et al. [[HaiM 12](#)] ainsi que les codes correcteurs à l'image du code de Reed-Solomon (RS) [[Ming 10](#)] nécessaires pour les ajustements à l'étape ⑥ pourraient être utiles. Le mécanisme de contrôle de la QoS que nous développons dans la suite de ce travail vient en effet renforcer ces techniques existantes (étape ⑥) et qui sont déterminantes dans l'amélioration de la qualité des transmissions de données multimédia.

8.4.2 Modélisation du contrôle de la QoS et résultats

Dans le processus exposé à l'étape ⑤ de la figure 8.11, l'évaluation de la qualité des transmissions ou des performances implique une estimation de valeurs telles que la perte de paquets, le débit et la latence. Ainsi, les critères et les conditions de transmission sont analysés grâce à la fonction *MPC* qui permet de juger de l'opportunité d'un changement de fréquence ou d'une adaptation de paramètres. En effet, la modélisation du principe de contrôle de la QoS avec la technique du *MPC* favorise l'adaptation automatique des paramètres du réseau sur la base de contraintes des applications (QoS) imposées par le MPC-module. La fonction de contrôle de la QoS permet alors d'atténuer la latence et de réduire les pertes de paquets qui affectent de manière significative la qualité des transmissions et par conséquent, les performances du réseau. A travers cette fonction-MPC, le nœud Radio Cognitive émetteur prend donc la décision optimale entre rester sur le canal courant ou passer sur une autre bande de fréquence, changer de technologie (WiFi, GSM, etc.) en fonction des contraintes et des perturbations. Le choix des contraintes fixées dans cette modélisation permettant de garantir la QoS pour les contenus médicaux multimédia est basé sur un ensemble de critères que nous détaillons au paragraphe suivant.

Les critères de qualité de service selon le guide DATAR : La Délégation interministérielle à l'Aménagement du territoire et à l'Attractivité Régionale (DATAR) a publié en 2013, un guide qui exprime les besoins en infrastructure à haut et très haut débit visant le déploiement des projets de télé-médecine en France. Ce document qui fait des recommandations sur les spécifications techniques permettant de répondre aux besoins des acteurs de projets de télé-médecine (les agences régionales de santé, les centres hospitaliers universitaires, etc.), constitue une base importante de données qui a guidé notre choix de critères de qualité de service et de performances du réseau. Le travail ayant conduit à la production de ce guide, a consisté à réaliser des expériences dans huit régions pilotes, puis à comparer les besoins et les obstacles identifiés, selon les opérateurs. Les analyses et les expériences de ce projet ont montré que les variables les plus importantes pour la QoS et les performances du réseau, se résument en terme de débit, de latence, de gigue et de pertes de paquets. Ces expériences et mesures ont permis d'obtenir des indications substantielles sur les valeurs telle que la latence subie, en fonction de la bande passante et du type de donnée. Les tableaux 8.2 et 8.3 présentent quelques résultats relatifs au temps de transfert d'images entre un établissement de santé et un serveur central, mesuré lors des expérimentations dans le cadre de ce projet. Ces deux tableaux montrent que les délais varient en fonction de la bande passante, du contexte (mobile ou fixe), du type de contenu et de la distance séparant l'émetteur du récepteur.

Débit ligne Type image	SDSL 2Méga	SDSL 4Méga	SDSL 8Méga
Crane non injecté(60 images)	49 sec	24,5 sec	12 sec
Abdomen injecté (600 images)	8 min	4 min	2 min
TAP urgence (1000 images)	13 min 20 sec	6 min 40 sec	3 min 20 sec
Radio 4 incidences	37 sec	18 sec	9 sec

TABLE 8.2 – Durée des transmissions entre le centre hospitalier et un serveur fixe [DATA 13]

Signalons que le Symmetric Digital Subscriber Line (SDSL) est une technologie garantissant en principe un très haut débit de communication avec une portée pouvant atteindre 2,4 kilomètres. Quant à la technique ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line), elle permet de transmettre des données à haut débit de manière asymétrique.

Débit ligne Type image	ADSL 1Méga	ADSL 6Méga	SDSL 2Méga	SDSL 8Méga
Crane non injecté(60 images)	31 sec	5 sec	15 sec	4 sec
Abdomen injecté (600 images)	5 min 07 sec	51 sec	2 min 34 sec	38 sec
TAP urgence (1000 images)	8 min 32 sec	1 min 25 sec	4 min 16 sec	1 min 04 sec
Radio 4 incidences	32 sec	5 sec	16 sec	4 sec

TABLE 8.3 – Durée des transmissions entre le serveur et un poste de radiologie nomade [DATA 13]

Notons que les variations de paramètres de QoS constatées avec les technologies (ADSL, SDSL) utilisées dans le cadre de ces expérimentations (projet DATAR), pourraient s'accroître davantage avec la technique Radio Cognitive. En effet, les délais notés avec les technologies filaires (ADSL, SDSL) utilisées dans ce projet (DATAR), seront probablement plus importants avec la Radio Cognitive qui assemble diverses technologies sans fil, si évidemment aucune mesure n'est prise pour garantir la qua-

lité de service. L'objectif de la présente contribution pour rappel, consiste alors à encadrer/contraindre la sélection des paramètres de communication (bande passante, puissance de transmission, etc.), afin de répondre efficacement à cette demande de QoS. Le principe de modélisation de cette approche garantissant la QoS, est expliqué au prochain paragraphe. Rappelons que l'avantage de la technologie Radio Cognitive dans ce contexte médical par rapport aux technologies suscitées (ADSL, SDSL), est lié à son caractère non invasif (sans fil) et au faible coût d'exploitation des fréquences. En effet, avec l'exploration de bandes libres, cette technique scrute (sondage) une large gamme de fréquences afin de trouver la ressource (bande passante) adaptée aux exigences de l'application et cette pratique à l'avantage d'être moins coûteuse.

Modélisation des critères : Le tableau 8.4 présente un exemple de catégorisation des contenus par classe de services. Le principe de modélisation dans le cadre de cette expérimentation, repose sur les critères retenus pour la première classe de service. Nous assumons par conséquent, que le contenu médical intègre la classe prioritaire au vu de son caractère très souvent urgent. Nous nous inspirons alors des critères de QoS suggérés par le guide (DATAR) des recommandations afin de fixer les contraintes du modèle. Selon ces recommandations, la latence acceptable lors des transmissions de données multimédia en temps-réel se situe entre dix (10) et vingt (20) millisecondes pour un paquet de cent (100) octets. L'intervalle [10, 20] retenu et marquant la variation de l'indice temporel, prend en compte les spécificités de la zone géographique (Rural, urbain, lointain, proche, etc.) et les caractéristiques du canal utilisé.

Classe	Priorité	Type de services
1	++++	Temps-réel (Voix sur IP)
2	+++	Télé-diagnostic, télé-médecine
3	++	Suivi de patient
4	+	Le "best-effort" (Web, mail)
5	-	Service non prioritaire (Mis à jour, FTP)

TABLE 8.4 – Exemple de classification des contenus

Le guide recommande également une perte de paquet n'excédant pas 0,2% et une variation de la latence au fil du temps (gigue) inférieure à cinq (5) millisecondes pour un datagramme de cent (100) octets. Le débit minimum permettant de garantir la qualité de service est estimé à 10 Mbps. A cet effet, le choix de la largeur de bande est déterminant pour l'atteinte de cet objectif (débit de 10 Mbps). Sur la base de ces directives données par le guide, nous fixons les contraintes du modèle de contrôle (MPC). Un aperçu du cadrage des valeurs, réalisé sous Matlab dans le cadre des simulations est donné à la figure 8.12. Les variables retenues comme paramètres d'entrée du modèle se composent de la puissance de transmission, de la taille des paquets et de la largeur de bande attribuée. Les variables contrôlées à la sortie comprennent la latence, la gigue et les pertes de paquets.

Le principe de cette modélisation n'étant pas fondamentalement différent de celui du contrôle du mécanisme de réservation à la volée de ressources détaillé à la section 8.3.2, nous nous contentons alors d'une description en deux étapes du fonctionnement du contrôle de la QoS.

1. **Évaluation des paramètres de transmission :** Les valeurs de la latence, de la perte de paquets et du débit sont mesurées à chaque "time slot" et au niveau de chaque nœud Radio Cognitive impliqué dans les transmissions. Les informations relatives aux caractéristiques du canal, sa disponibilité sont obtenues grâce au module Sondage du spectre. Afin de parer à tous risques de

```

Ts=3; %Sampling time
model=c2d(model,Ts); %Convert to discrete time
model.InputName={'PacketSize';...
'TransmitPower';'FreqBandwidth'};
model.OutputName={'Jitter';'delay';'packetLoss'};
model.InputUnit ={'bytes'; 'mW'; 'MHz'};
model.OutputUnit ={'ms'; 'ms';'percent'};
clear InputSpecs OutputSpecs
InputSpecs(0)=struct('Min',128,'Max',65536,'RateMin',...
-1000,'RateMax',Inf);
InputSpecs(1)=struct('Min',35,'Max',2000,'RateMin'...
,-1000,'RateMax',Inf);
InputSpecs(2)=struct('Min',8,'Max',1000,.....
'RateMin',1000,'RateMax',Inf);
OutputSpecs(0)=struct('Min',0,'Max',5);
OutputSpecs(1)=struct('Min',0,'Max',10);
OutputSpecs(2)=struct('Min',0,'Max',0.02);
p=2; m=1;
MPCobj=mpc(model,Ts,p,m,Weights,InputSpecs,.....
OutputSpecs);
Tfinal=12;

```

FIGURE 8.12 – Fixation des contraintes de QoS

déconnexion, le système devra assurer une haute disponibilité du canal au moins égale à 99,99% pendant toute la durée de la transmission. Cette question est prise en compte par le mécanisme de réservation construit à la section 8.3.2. Une fois ces différentes évaluations ou mesures effectuées, le système procède à une comparaison/confrontation entre ces valeurs et les limites ou contraintes fixées (algorithme du *MPC*) afin de prendre la décision la plus appropriée pour le time-slot suivant. La confrontation dans ce contexte sous-entend, une analyse des variations de la valeur de chaque paramètre et une prédiction des futures tendances (valeurs/variations).

2. **Prise de décision :** Deux cas de figures pourraient se présenter, une fois que le module *MPC* finalise le calcul de variations et la déduction des futures tendances (time-slot $t + 1$) au time-slot t . Soit les conditions pour une bonne qualité de service répondant aux exigences du contenu multimédia et aux contraintes temps-réel seront probablement assurées au time-slot $t + 1$. Dans ce cas, aucune action n'est à entreprendre et la communication se poursuit sans une modification majeure des paramètres de transmission. Soit le risque d'une dégradation de la qualité de service pour le futur time-slot est élevé, alors une adaptation des paramètres de transmissions s'impose. Cette adaptation des paramètres se fait pour rappel dans la limite des contraintes fixées.

Notons que le respect des contraintes est matérialisé par la stabilité du système avec une point de convergence tel que cela sera présenté au paragraphe suivant. De même, l'absence de stabilité dénote d'un choix de paramètres inapproprié ou d'un canal devenu inadapté, voir indisponible. Cette instabilité du système oblige le système à adopter une nouvelle stratégie telle que le saut de fréquence ou encore le changement de technologie, le tout, sous la supervision du mécanisme de réservation à la volée pour plus d'efficacité.

Présentation des résultats du contrôle des paramètres de QoS : La figure 8.13 présente les variations subies par les paramètres d'entrées afin d'être en adéquation avec les contraintes fixées.

La dynamique créée par le modèle (*MPC*) entre les paramètres d'entrée et de sortie, guide cette adaptation dynamique jusqu'à l'accession de la sortie, à une valeur de convergence ou encore à un état de stabilité au meilleur des cas. La figure 8.14 reflète le pire des scénarios où les paramètres d'entrée

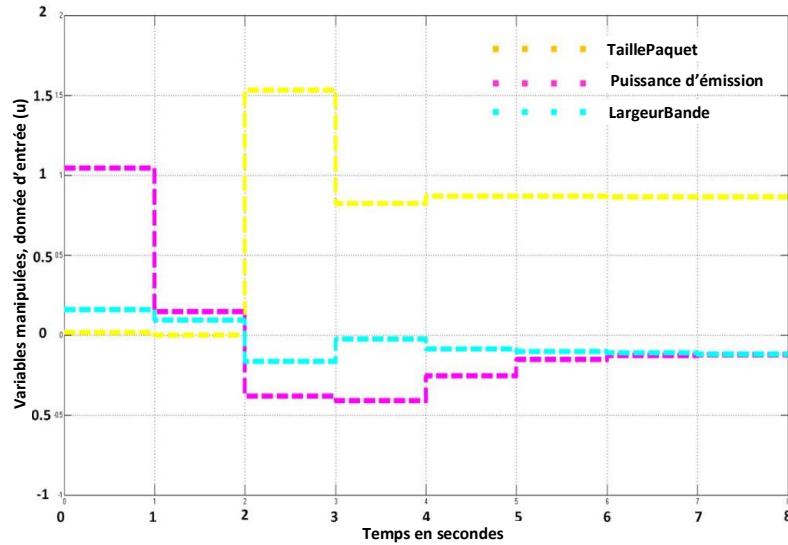


FIGURE 8.13 – Variation des paramètres d'entrée

choisis ne concordent pas avec les contraintes fixées. Le système ne parvient donc pas à se stabiliser. Cela dénote de l'impossibilité du système, et par conséquent de l'équipement implémentant celui-ci, à offrir la qualité de service désirée par l'application médicale multimédia.

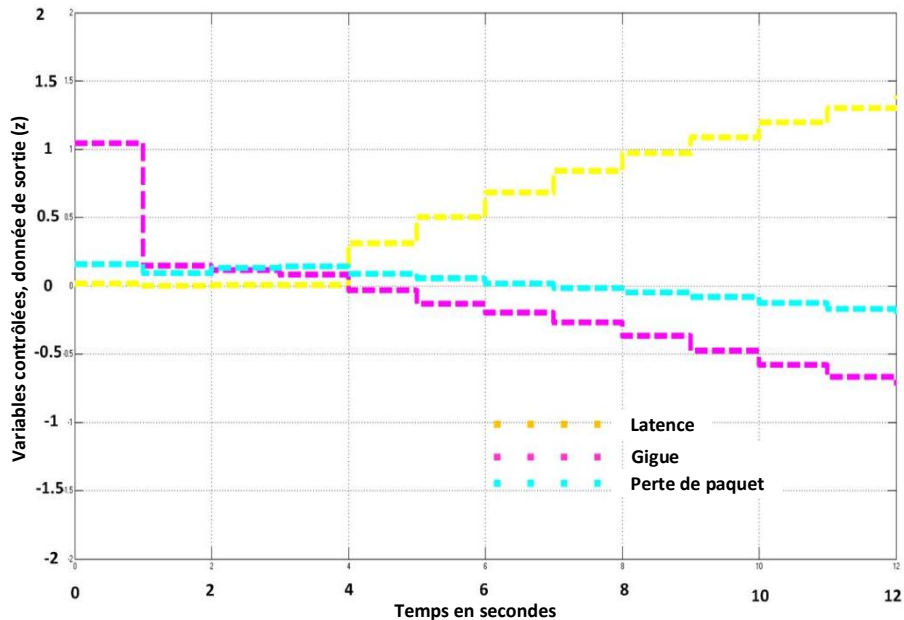


FIGURE 8.14 – Variation des paramètres de sortie, le cas sans équilibre

Dans le cadre de ces simulations, nous avons fait varier l'horizon de prédiction p , afin de mesurer l'impact de la fluctuation sur la stabilité du système. Signalons que l'intérêt d'avoir un horizon de prédiction élevé, est de parvenir à réduire la fréquence d'exécution de la fonction MPC avec pour avantage, la minimisation du coût de calcul. La figure 8.15 avec une valeur de $p = 5$ démontre

que l'augmentation de la valeur de l'horizon de prédiction ne favorise pas une stabilisation rapide du système. On observe avec cette valeur de p , que le système se stabilise après six (6) secondes. De plus, cette stabilité n'est pas totale, indiquant par conséquent des imprécisions de prédiction/estimation. Pour une fonction de contrôle de QoS à implémenter sur des équipements sensibles à la consommation énergétique tels que les nœuds mobiles des patients, il faudra alors trouver un compromis entre la précision des estimations et l'autonomie énergétique. Cette problématique intéressante n'a pas été traitée dans le cadre de ce travail et pourrait faire l'objet d'une prochaine contribution. Toutefois, les résultats obtenus permettent de s'apercevoir qu'avec une valeur de $p = 2$, la stabilité est très vite atteinte et le système réalise des estimations/prédictions avec beaucoup plus de précision. Cette configuration que nous jugeons excellente pour la présente étude, est matérialisée par la figure 8.16, où l'état de stabilité est atteint au bout de deux (2) secondes. La configuration idéale dans le cadre de la modélisation du contrôle de la qualité de service, exprimée par la figure 8.16 marque la capacité du système à assurer des transmissions sous contrainte de la QoS. En somme, la singularité du cadre de transmission de données médicales multimédia que nous proposons est d'avoir montré l'efficacité probable de l'architecture de communication e-santé Radio Cognitive, à supporter et véhiculer des contenus sensibles au délai ainsi qu'aux pertes de paquets.

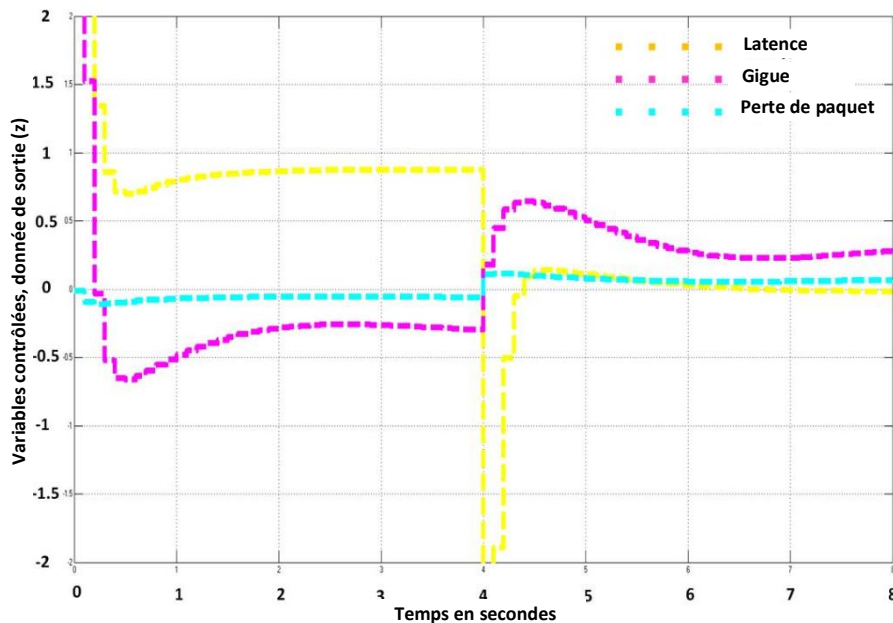


FIGURE 8.15 – Variation des paramètres de sortie, le cas avec équilibre ($p = 5$)

De plus, cette technique de contrôle de la QoS, intégrée au mécanisme de réservation à la volée de ressources étudié précédemment pourrait constituer un complément important des techniques de compression vidéo qui détériorent inévitablement la qualité des images transmises aux cliniciens. En effet, le ratio de compression pourrait être limité avec la flexibilité des équipements qui offrent la possibilité d'une sélection de bandes appropriées et la coordination (adéquation entre la bande passante, le débit souhaité et la taille/compression des paquets) des opérations d'encodage/compression, au vu des interactions possibles entre les différentes fonctions exprimées à travers la figure 8.11. La technique de contrôle de la QoS ainsi proposée en complément du mécanisme de réservation de ressources à la volée vient donc renforcer l'idée de la capacité de l'architecture Radio Cognitive à supporter tous les types de contenus véhiculés par les applications médicales. Il est aussi essentiel de relever que ces

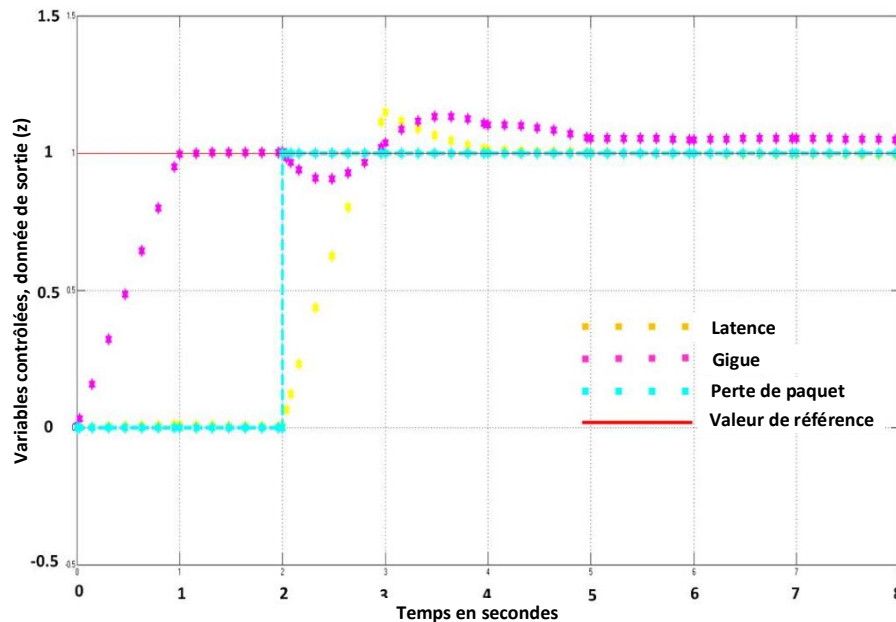


FIGURE 8.16 – Variation des paramètres de sortie, le cas avec équilibre ($p = 2$)

deux approches (contrôle de QoS et réservation à la volée) peuvent être facilement combinées dans une fonction MPC unique. Pour ce faire, il suffit d'unifier aussi bien les différentes variables que les contraintes inhérentes. Notons pour finir que ces deux principales études de performances, à savoir, la disponibilité de la ressource réseau et la garantie de la qualité de service, ont fait l'objet chacune, d'une participation et d'un exposé à des conférences que nous évoquons brièvement à la section 8.5.

8.5 Publications relatives à cette partie

Notre première contribution qui est consacrée à l'analyse des performances et à l'adoption du mécanisme de réservation de ressources à la volée à aboutit à la rédaction de l'article ❶. Le travail complémentaire réalisé par la suite, avec l'évaluation de la qualité de service et la proposition de la technique de contrôle des paramètres de QoS a donné lieu à la publication ❷.

❶ - Conférence IEEE WTS, Avril 2014 : **Dramane Ouattara, Mohamed Aymen Chalouf, Omesaad Hamdi and Francine Krief**; *Multimedia Content Delivery for Remote Patient Monitoring using Cognitive Radio Networks*; 13th annual Wireless Telecommunication Symposium (WTS 2014), New York City, USA, 8 pages.

❷ - Conférence IEEE ISCC, Juin 2014 : **Dramane Ouattara, Mohamed Aymen Chalouf, Omesaad Hamdi and Francine Krief**; *A QoS-control Framework for Medical Multimedia Data Transmission in CRN Environment*; The nineteenth IEEE Symposium on Computers and Communication-Sign Ups (ISCC 2014), Madeira, Portugal, 7 pages.

Nous retiendrons que l'analyse des performances nous a permis de déceler les insuffisances en terme de partage de ressources réseau (canaux), pouvant occasionner des délais dans les transmissions de données avec notre architecture de communication e-santé Radio Cognitive. Sachant que ces latences pourraient être préjudiciables pour certaines catégories de contenu médicales sensibles tel que le multimédia, nous avons proposé une fonction de contrôle prédictif des paramètres de transmission afin de garantir la qualité de service. Cette fonction vient donc renforcer le mécanisme d'allocation de ressources aux applications médicales sensibles aux délais et encadre le choix des paramètres de transmission suivant les exigences de qualité de service. Toutefois, nous devons admettre qu'il subsiste encore au vu des résultats obtenus, des questions à examiner dans cette problématique de performances. L'une des premières interrogations pourrait concerner le coût de cette approche d'amélioration des performances proposées avec le modèle *MPC* pour les équipements radios utilisés. Cette préoccupation essentielle exige non seulement une justification plus approfondie du choix de ce modèle, mais elle pose également la question de l'opportunité d'une utilisation du *MPC* par rapport aux autres modèles de prédiction/estimation tel que le Grey Model. Nous consacrons la section 8.6 à l'analyse de ces différentes préoccupations afin de mieux élucider notre démarche.

8.6 Discussion

Le coût de calcul de cette approche est-il raisonnable ? L'opération de construction d'une dynamique qui caractérise la relation entre les variables d'entrée et de sortie du model *MPC*, à elle seule est sans conteste plus coûteuse que l'ensemble des opérations exécutées par la fonction du Grey Model. Pour s'en convaincre, nous exprimons la relation entre la matrice de variables manipulées en entrée (U) et les vecteurs contrôlés ou observés en sortie (y) par l'équation 8.8.

$$y = Uh + d \quad (8.8)$$

Dans cette équation, le vecteur d symbolise le facteur perturbateur tandis que le vecteur h caractérise la partie de l'information non connue obtenue par la méthode des moindres carrés et exprimée par l'équation 8.9.

$$\hat{h} = (U^T U)^{-1} U^T y \quad (8.9)$$

L'équation 8.9 fait appel à plusieurs multiplications de matrices dont la complexité temporelle est estimée à $O(n^3)$. Cette équation confirme donc la supériorité du nombre des opérations de l'algorithme du *MPC* comparativement au Grey Model. Toutefois, nous devons signaler que cette comparaison se limite à la version à variable unique du Grey Model. Le *GM(1, 1)* étant inadapté dans ce contexte où l'on modélise le contrôle de plusieurs variables, sa version multi-variables *MGM(1, n)* pouvait alors être envisagée. Le coût de cette alternative (*MGM*) ne devrait pas être inférieur au coût actuel du *MPC*, au vu du nombre de variables à prendre en compte. De plus, nous pensons avoir fait le meilleur choix par rapport aux autres modèles de prédiction/estimation, y compris le Grey Model au vu de la capacité du *MPC* à instaurer une dynamique entre l'ensemble des variables tel que cela a été illustré par les résultats obtenus. Notons également que le coût de l'approche face à la faiblesse en autonomie énergétique et en puissance de calcul des équipements, ne constitue pas un facteur impactant de manière considérable son fonctionnement ou sa mise en œuvre. En effet, le mécanisme de contrôle de paramètres proposé, est à implémenter principalement au niveau des nœuds fixes de l'architecture e-santé Radio Cognitive (nœuds relais), qui en général sont moins affectés par le problème d'autonomie en énergie ou celui de puissance de calcul.

La technique de réservation proposée dans cette approche peut-elle supporter un accroissement du trafic ? Le mécanisme de réservation de ressources et d'affectation de priorités au trafic que nous proposons dans ce manuscrit, répond à un besoin ponctuel de communication de données de santé à caractère urgent. Le passage à l'échelle de cette solution ne pouvait donc pas être assuré.

8.7 Conclusion

Nous étions conscient du fait que le critère de performances constituait l'un des plus importants facteurs à prendre en compte dans notre proposition d'une architecture de communication e-santé Radio Cognitive. Ainsi, après avoir étudié les questions liées à la connectivité et à la gestion des interférences de cette architecture e-santé aux chapitres précédents, nous avons consacré le présent chapitre à l'analyse de la célérité des transmissions et à une illustration de réponses pouvant être apportées aux contraintes de qualité de service. Pour ce faire, nous avons mis en évidence les délais engendrés par la politique de partage des ressources propre aux réseaux Radio Cognitive et pouvant affecter les transmissions médicales d'urgence. Pour réduire ces pertes de temps, nous avons alors proposé une fonction de réservation à la volée de canaux de communication, basée sur le modèle de commande prédictive (*MPC*). Pour finir, nous avons démontré que cette fonction pouvait être renforcée par une intégration de nouveaux paramètres permettant de contrôler ou d'assurer la qualité de service exigée par les applications médicales de type multimédia.

Chapitre 9

Conclusion générale et perspectives

“La santé dépend plus des précautions que des médecins.”

Jacques-Bénigne Bossuet

Sommaire

9.1 Contributions	132
9.1.1 Renforcement du module « Sondage » et connectivité	132
9.1.2 Renforcement du module « prise de Décision » et gestion des interférences	132
9.1.3 Renforcement du module « Partage » et allocation des ressources	133
9.2 Travaux en cours et perspectives	133
9.2.1 Les travaux en cours	133
9.2.2 Les perspectives et discussion	134
9.2.2.1 Perspectives	134
9.2.2.2 Discussion	135

La rareté des ressources réseaux qui est de plus en plus accentuée par l’explosion des objets communicants et la mauvaise gestion des fréquences radios est un problème qui inquiète la communauté des chercheurs du domaine. L’intérêt autour du développement de la norme 802.22 qui affiche parmi ses objectifs l’occupation des bandes résiduelles de la télévision (bandes blanches) permet de s’en convaincre. En effet, l’une des particularités de cette norme consiste en l’utilisation de bandes de fréquences libérées grâce au passage de la télévision, de l’analogique au numérique. De plus, la hausse de l’espérance de vie et l’accroissement de la population imposent la nécessité de trouver des solutions technologiques innovantes et pérennes pour les services de santé déjà débordés. Ces dernières années, l’on a pu alors assister à une arrivée massive des techniques de l’informatique dans le domaine de la santé avec des disciplines émergentes telles que la télé-médecine, la télé-radiologie, la télé-assistance, entre autres, regroupées sous le vocable E-santé. Toutefois, les architectures de communication appropriées, répondant aux besoins spécifiques de ces nouvelles applications médicales, font défaut. Parlant de besoins spécifiques, nous insistons sur le caractère particulièrement sensible et très souvent urgent des données médicales qui ne devraient pas être traitées au même titre qu’une information web ordinaire. Par ailleurs, avec la constante augmentation de la quantité de données échangées qu’engendre le suivi permanent du patient, les technologies traditionnelles proposées par les fournisseurs d’accès à Internet ne semblent plus adaptées, surtout au vu des coûts à supporter. Dans ce travail de thèse, nous avons donc proposé une architecture de communication e-santé basée sur la technologie Radio Cognitive. Cette approche de communication que nous suggérons apporte une flexibilité dans l’usage des ressources réseaux et, par conséquent, favorise la recherche/sélection de la ressource appropriée

aux différents types d'applications médicales. En effet, pour réaliser ses transmissions, la technique Radio Cognitive exploite de manière opportuniste les technologies radios existantes. Dans le but d'appuyer cette idée d'infrastructure e-santé Radio Cognitive flexible, notre démarche a consisté à étudier différents critères de performances inhérents à l'architecture proposée et que nous résumons en trois paragraphes.

Connectivité : L'examen de ce critère nous a permis de mettre en évidence la capacité des nœuds Radio Cognitive et, par conséquent, de notre architecture à fournir un accès au réseau en tous lieux pour les besoins du suivi de patient.

Gestion des interférences : Le contexte de suivi de patient favorisant une génération d'ondes diverses, il nous paraissait essentiel d'analyser les prédispositions du modèle de communication, que nous proposons, à gérer efficacement les interférences.

Analyse des performances : Enfin, compte tenu des contenus médicaux souvent urgents et de la qualité des transmissions exigée pour certaines catégories de service de santé telles que la télé-assistance ou la télé-chirurgie, il était important pour nous de faire une observation plus détaillée des facteurs pouvant affecter les performances de l'infrastructure proposée.

Nous faisons, dans la suite de cette conclusion, une présentation sommaire de nos contributions les plus importantes qui se résument en l'amélioration de chacun des critères énumérés à la section 9.1. Nous terminons par une introduction de nos travaux en cours ou en perspective à la section 9.2.

9.1 Contributions

Dans la conduite de ce travail de thèse, et pour consolider l'idée d'infrastructure e-santé Radio Cognitive, nous avons contribué au renforcement de quelques modules de la cognition à travers la proposition de fonctions, pour la plupart inspirées du domaine de l'intelligence artificielle. Nous faisons une description de ces différentes fonctions aux sous-sections 9.1.1, 9.1.2 et 9.1.3.

9.1.1 Renforcement du module « Sondage » et connectivité

Nous avons proposé un mécanisme de prédiction spectrale basé sur les techniques du Grey Model et de l'apprentissage artificiel. L'algorithme combine les avantages des deux techniques à savoir la célérité de l'une et le faible coût de calcul de l'autre. En effet, pendant que la fonction d'apprentissage exécute ses séquences d'entraînement, le Grey Model prédit l'état des canaux afin de favoriser le choix raisonné du canal à sonder en priorité. Signalons que ce raisonnement repose sur une affectation de probabilités liées à l'état du canal (occupé ou libre). Le canal présentant la plus forte probabilité d'être libre étant privilégié. L'intérêt de cette proposition est alors, d'une part, lié à la réduction des coûts de calcul avec la diminution de la fréquence du sondage. D'autre part, cette fonction qui permet de donner des indications sur les fréquences probablement libres renforce la connectivité avec la détection plus rapide de canaux exploitables par les équipements. Les résultats obtenus à travers les simulations, en nous appuyant sur les données d'énergie mesurée sur les canaux avec notre plateforme Radio Cognitive, démontrent une pertinence des prédictions qui consolide l'idée.

9.1.2 Renforcement du module « prise de Décision » et gestion des interférences

Pour ce module, nous avons proposé un plan de gestion devant coordonner l'ensemble des stratégies à mettre en œuvre afin de réduire les interférences. A titre d'exemple, nous avons énuméré quelques stratégies telles que l'adaptation automatique des paramètres de transmission et le saut de

fréquence. Plus précisément, nous avons démontré, à travers un algorithme et des résultats de simulation de la puissance de transmission en fonction de la distance, la faisabilité de la stratégie consistant à réduire dynamiquement la puissance d'émission d'un équipement. En effet, avec ce calcul de la distance en fonction de la puissance du signal reçue, l'on pourrait contraindre l'équipement à choisir la puissance de transmission en fonction de la distance minimum qui sépare ce dernier des équipements vulnérables aux ondes. De plus, nous avons expérimenté la stratégie de saut fréquentiel en nous appuyant sur notre plateforme Radio Cognitive. Le principal intérêt du travail que nous avons mené sur le critère d'interférence est d'avoir mis en évidence la capacité de notre architecture e-santé et des équipements radios utilisés à s'adapter à l'environnement. Le contexte hospitalier choisi comme cadre d'expérimentation a ainsi eu pour objectif de réaffirmer cette aptitude des équipements Radio Cognitive à émettre, sans un effet très dommageable, dans des environnements assez sensibles aux ondes.

9.1.3 Renforcement du module « Partage » et allocation des ressources

Pour le besoin d'un approfondissement de notre analyse des critères de performance de l'architecture e-santé Radio Cognitive, nous avons examiné les délais engendrés par le module « Partage » de ressources. Ensuite, nous avons proposé un processus d'allocation/réservation de ressources à la volée qui permet de réduire les pertes de temps. Enfin, pour répondre aux besoins de qualité de service, nous avons suggéré une fonction de contrôle prédictif permettant de surveiller le choix des paramètres de communication. L'intérêt de cette contribution est d'avoir mis en exergue les potentialités de notre architecture et de ses équipements à adopter, de manière dynamique, des stratégies d'allocation de ressources (canaux) qui satisfont les exigences des applications médicales. Cet avantage étant surtout soutenu par la flexibilité offerte par ces équipements qui supportent l'adaptation automatique des paramètres de communication. A noter que c'est au regard de cette prédisposition (flexibilité) que nous avons pu envisager le mécanisme de contrôle prédictif. En effet, la possibilité d'ajouter au modèle de réservation de canal des paramètres à surveiller en temps-réel qui prennent en compte les exigences de la QoS de manière automatique est fondée sur la flexibilité des équipements Radio Cognitive.

Nous terminons cette partie décrivant nos contributions par un schéma (figure 9.1) qui illustre et récapitule l'ensemble des modules Radio Cognitive auxquels nous avons apporté des idées d'améliorations afin de répondre aux exigences des transmissions en e-santé. Ainsi, à l'exception du module « Mobilité », nous avons étudié plus en détail chacune des fonctions présentées à la figure 9.1 et suggéré des mécanismes permettant leur renforcement.

9.2 Travaux en cours et perspectives

L'architecture de communication e-santé Radio Cognitive, que nous proposons, apporte des réponses à quelques problèmes tels que la connectivité en tout lieu et la gestion des interférences étudiées dans le cadre de cette thèse. Elle introduit par la même occasion de nombreux défis dont il nous faudra continuer l'analyse. Pour ce faire, nous présentons à la sous-section 9.2.1 notre démarche actuelle avec le travail en cours avant d'énoncer quelques orientations sur la suite de cette étude à travers la sous-section 9.2.2.

9.2.1 Les travaux en cours

Nous nous attelons à présent à la mise en place d'un cadre d'expérimentation qui viendra en complément à la plateforme Radio Cognitive existante. En effet, afin de passer à la phase d'expérimenta-

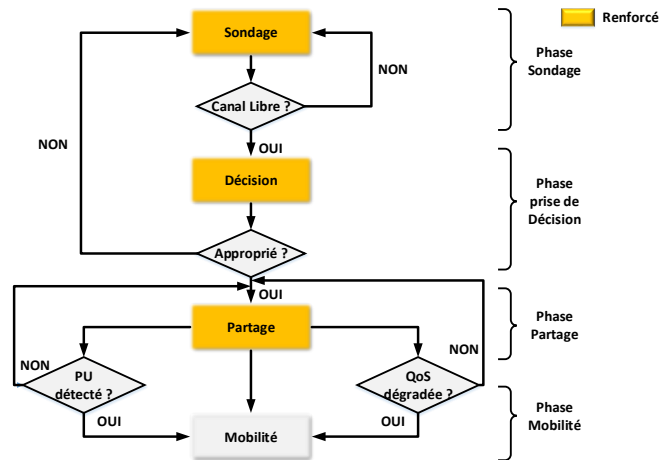


FIGURE 9.1 – Aperçu des modules Radio Cognitive analysés

tion du contexte « réseau corporel » de notre architecture avec l'idée de WBAN Radio Cognitive, nous avons procédé à l'acquisition d'un ensemble de capteurs médicaux. La plateforme en cours d'élaboration comprendra aussi bien le matériel Radio Cognitive précité que les capteurs électrocardiogrammes (ECG), ceux mesurant la saturation d'oxygène dans le sang (SPO_2), ceux testant l'activité respiratoire, ceux mesurant la pression artérielle, la position, la conductance de la peau et l'activité physique. D'autres capteurs pourraient venir compléter cette liste, selon le besoin exprimé des constantes vitales à mesurer. La synchronisation des échanges de données, l'appréhension des problématiques soulevées (se référant à la partie « état de l'art ») et l'évaluation des atouts exprimés par l'approche WBAN Radio Cognitive sous divers contraintes (autonomie d'énergie) constituent les principaux objectifs qui motivent la mise en œuvre de cette plateforme complémentaire. Une prise en main de ce nouveau dispositif est en cours et les premiers résultats sont attendus pour les mois à venir. Par ailleurs, une suite logique de ce travail nous conduira certainement à une extension des expérimentations sur la mesure des performances. Les contours de ce travail en perspective sont fixés à la sous-section 9.2.2.

9.2.2 Les perspectives et discussion

9.2.2.1 Perspectives

Le travail d'expérimentation et de test enclenché devra être poursuivi au vu des prédispositions intéressantes de la Radio Cognitive à véhiculer efficacement les données de santé sous diverses contraintes. Nous proposons à cet effet, les orientations qui nous paraissent importantes à donner à l'étude de chaque critère abordé dans le cadre de cette thèse.

Le critère de connectivité : Pour ce critère, nous nous sommes particulièrement intéressé à l'amélioration du mécanisme de découverte des canaux libres pour le compte du suivi de patients en mobilité. L'algorithme, que nous proposons, s'adapte au changement de cellule imposé par la mobilité en réinitialisant ses fonctions de prédiction à chaque notification de changement de zone. Cette approche mérite d'être renforcée afin de supporter une mobilité plus forte. Par conséquent et comme perspective de recherche à court terme, il serait opportun de mesurer l'impact de cette mobilité sur la fonction de prédiction (AA-Module et GM-Module). A moyen terme, une étude visant à combiner la proposition actuelle avec des mécanismes d'anticipation du transfert intercellulaire (handover) serait

envisageable. Cette étude devra tenir compte des environnements fortement perturbés (ondes électromagnétiques diverses) qui viendraient complexifier la démarche de détection (détection des PU). A long terme, l'on sera alors en mesure d'opérer les meilleurs choix et les compromis possibles entre le coût algorithmique qui n'est pas à négliger (avec les équipements mobiles du patient) et le niveau de précision dans les prédictions.

La capacité de gestion des interférences : Pour ce critère, nous avons expérimenté le saut fréquentiel à chaque détection d'un signal perturbateur ou d'un signal que l'on pourrait perturber. Le bon fonctionnement de cette stratégie a également été démontré dans le cadre du projet LICoRNe. En effet, les changements de fréquence dans le but d'éviter les interférences, au vu des résultats obtenus, n'altèrent pas fortement les performances de transmission. Toutefois, il faudra une extension du mécanisme de saut de fréquence sur plusieurs nœuds (multi-saut) afin de confirmer cette tendance de résultats satisfaisants. Cela pourrait devenir un objectif à moyen et long terme et il serait appréciable que ces nouvelles expérimentations/tests se fassent dans le cadre d'un nouveau projet de recherche sur la thématique d'infrastructure e-santé Radio Cognitive. A moyen terme, il nous semble également important d'approfondir l'analyse de quelques stratégies supplémentaires évoquées ou non dans le plan de gestion des interférences telle que l'adaptation des paramètres de transmission (la puissance). Cette perspective permettra de répondre certainement à la question du choix de puissance qui maximise au mieux la qualité des transmissions tout en minimisant les risques de perturbation des autres utilisateurs (PU).

Le critère de performance : Dans la suite des travaux en perspective, la poursuite de l'évaluation des performances de l'architecture e-santé, dotée des différents mécanismes de contrôle « MPC », tient une place importante. Nous avons constaté, avec les résultats actuels, que cette fonction de contrôle basée sur le MPC se stabilise conformément au comportement attendu lorsque les différents paramètres (variables) sont bien fixés. Toutefois, ces résultats de simulation obtenus, pour rappel, en application du MPC sur le processus de partage des ressources ainsi que sur le mécanisme de contrôle de la qualité de service nécessitent des expérimentations complémentaires. L'intégration de ces deux processus (contrôle de la QoS et allocation de ressource) dans une fonction unique, avec un choix approprié des variables fixant les différentes contraintes, s'affiche comme un objectif à court terme. La suite à moyen et long terme pourrait conduire à une évaluation de la stabilité de cette fonction dans la durée. En effet, il faudra démontrer que ce processus de contrôle demeure stable quelle que soit la durée d'une transmission et les perturbations subies.

9.2.2.2 Discussion

Il nous semble essentiel de rappeler que tout au long de ce travail, une question d'ordre plus générale n'a cessé de nous venir à l'esprit. Il s'agit des restrictions actuelles liées à l'usage de certaines fréquences qui constituent évidemment un frein à la mise en pratique de l'idée d'une architecture e-santé Radio Cognitive. Au-delà de cet aspect législatif, faudra-t-il prévoir de nouvelles installations réseaux Radio Cognitive pour la santé ? Pour répondre à cette dernière préoccupation, nous estimons que la mutation des équipements actuels vers des dispositifs plus intelligents (Radio Cognitive) devrait, *in fine*, suffire à rendre notre architecture opérationnelle. Aussi, nous espérons que la réglementation actuelle sera revue au niveau des agences chargées de la gestion des fréquences radios afin qu'elle soit conforme aux évolutions.

Annexe A

Liste des abréviations et acronymes

AA-Module : Module d'Apprentissage Artificiel
AWGN : Additive White Gaussian Noise
CMD : Clinical Multimedia Data
CRAHN : Cognitive Radio Ad Hoc Networks
CRN : Cognitive Radio Networks
CR-WBAN : Cognitive Radio Wireless Body Area Network
CR-WPAN : Cognitive Radio Wireless Personal Area Network
DFS : Dynamic Frequency Selection
FFT : Fast Fourier Transform
FPGA : Field-Programmable Gate Array
GM : Grey Model
GM-Module : Module de prédiction du Grey Model
GPS : Global Positioning System
GSM : Global System for Mobile Communications
HIS : Health Information Systems
IA : Intelligence Artificielle
IP : Internet Protocol
ISM : Industrial, Scientific and Medical bands
LTE : Long Term Evolution
MAC : Medium Access Control
MIMO : Multiple-Input Multiple-Output
MPC : Model Predictive Control
OFDM : Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
PU : Primary User
QoS : Quality of Service
RFID : Radio Frequency IDentification
RSSI : Received Signal Strength Indication
SDR : Software Defined Radio
SNR : Signal-to-Noise Ratio
SU : Secondary User
TCP : Transmission Control Protocol
UMTS : Universal Mobile Telecommunications System
USRP : Universal Software Radio Peripheral
UWB : Ultra Wide Band
WBAN : Wireless Body Area Network
WPAN : Wireless Personal Area Network
WRAN : Wireless Regional Area Networks

Annexe B

Liste récapitulative des publications

B.1 Publications dans des revues à comité de lecture

1. Omessaad Hamdi, Mohamed Aymen Chalouf, **Dramane Ouattara**, Francine Krief ; « EHealth : Survey on research projects, comparative study of telemonitoring architectures and main issues » ; Journal of Network and Computer Applications, Journal of Network and Computer Applications (JNCA 2014), DOI information : 10.1016/j.jnca.2014.07.026, AUG-2014.
2. **Dramane Ouattara**, Mohamed Aymen Chalouf, Francine Krief and Omessaad Hamdi ; « Wireless Broadband Opportunities through TVWS for Networking in Rural areas of Africa (ICST 2014) » ; The Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, EAI Endorsed Transactions ICST.
3. **Dramane Ouattara**, Francine Krief, Mohamed Aymen Chalouf, Omessaad Hamdi ; « Un système de prédiction spectrale pour une connectivité permanente dans le cadre du suivi en temps réel de patients » ; SM 2013, Revue des Nouvelles Technologies de l'Information (RNTI 2013), volume RNTI-SM-2, Pages 99-120

B.2 Communications avec actes en conférences

1. **Dramane Ouattara**, Mohamed Aymen Chalouf, Omessaad Hamdi and Francine Krief ; « Multimedia Content Delivery for Remote Patient Monitoring using Cognitive Radio Networks » ; 13th IEEE annual Wireless Telecommunication Symposium (WTS 2014), New York City, USA, 8 pages.
2. **Dramane Ouattara**, Mohamed Aymen Chalouf, Omessaad Hamdi and Francine Krief ; « A QoS-control Framework for Medical Multimedia Data Transmission in CRN Environment » ; The nineteenth IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC 2014), Madeira, Portugal, 7 pages.
3. **Dramane Ouattara**, Thao Quach, Francine Krief, Mohamed Aymen Chalouf ; « Mitigating the Hospital Area Communication's Interference Using Cognitive Radio Networks » ; 15th IEEE International Conference on e-Health Networking, Application & Services (IEEE Healthcom 2013), Lisbon, Portugal, October 2013, Pages : 5 pages.
4. Thao Quach, **Dramane Ouattara**, Francine Krief, Hicham Khalife, Mohamed Aymen Chalouf ; « Overlap Regions and Grey Model-Based Approach for Interference Avoidance in Cognitive

- Radio Networks » ; The Fifth International Conference on Ubiquitous and Future Networks, (IEEE ICUFN 2013), July 2013, Viêt Nam, Pages : 5 pages.
5. **Dramane Ouattara**, Francine Krief, Mohamed Aymen Chalouf, Omessaad Hamdi ; « Spectrum Sensing Improvement in Cognitive Radio Networks for Real-Time Patients Monitoring » ; 3rd International Conference on Wireless Mobile Communication and Healthcare, MobiHealth 2012, November 2012, Paris, France Pages 179-188.
 6. **Dramane Ouattara**, Francine Krief, Mohamed Aymen Chalouf, Omessaad Hamdi ; « Amélioration de la phase de détection du spectre d'un système radio cognitive pour le suivi temps réel de patients » ; Conférence Internationale : Nouvelles Technologies de la Répartition - Colloque francophone sur l'ingénierie des protocoles, NOTERE/CFIP 2012, Octobre 2012, Anglet, France, Pages : 9 pages.
 7. **Dramane Ouattara**, Francine Krief, Mohamed Aymen Chalouf, and Tegawendé F. Bissyandé ; « Improving Rural Emergency Services with Cognitive Radio Networks in Sub-Saharan Africa » ; Fifth International Conference on e- Infrastructure and e-Services for Developing Countries, AFRICOMM 2013, Malawi.

B.3 Communications sans actes

1. **Présentation de poster** : Dramane Ouattara, « Optimisation du suivi temps réel de patient par la Radio Cognitive », Journée Scientifique IPB, deuxième édition ; Novembre 2012, Bordeaux, France ; **Prix jeune chercheur de l'ADERA** (Association pour le Développement de l'Enseignement et de la Recherche auprès des universités, des centres de recherche et des entreprises d'Aquitaine).
2. **Communication invité** : Dramane Ouattara, « La cyber-santé (e-santé) face à la problématique de protection des données et de la vie privée », 1er Symposium sur la Cybersanté ; 21 au 22 octobre 2013 ; Abidjan, Côte d'Ivoire.

Bibliographie

- [AHIMA] The American Health Information Management Association (AHIMA), *implementation of electronic health records (EHRs)*, <http://www.ahima.org/about>, Page web consultée le 12 Mai 2014.
- [Akpa 10] Akpan, V.A ; Samaras, I.K. ; Hassapis, G.D., *Implementation of neural network-based non-linear adaptive model predictive control over a service-oriented computer network*. American Control Conference (ACC), p.5495,5500, Jun. 30 - Jul. 2 2010.
- [Aky1 06] Ian F. Akyildiz, Won-Yeol Lee, Mehmet C. Vuran, Shantidev Mohanty, *NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive Radio Wireless Networks : A Survey*. COMPUTER NETWORKS JOURNAL (ELSEVIER), 2006, p.2127-2159.
- [Aky1 09] I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee, K. R. Chowdhury, *CRAHNS : Cognitive Radio Ad Hoc Networks*. Ad Hoc Networks, Elsevier, Vol. 7, No. 5, Jul. 2009, p.810-836.
- [Algh 13] Alghamdi, B. ; Fouchal, H., *Wireless body area network platforms evaluation*. 9th International, Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), p.1348-1352, 1-5 Jul. 2013.
- [Alra 12] Alrabaee, S. ; Agarwal, A. ; Anand, D. ; Khasawneh, M., *Game Theory for Security in Cognitive Radio Networks*. Advances in Mobile Network, Communication and its Applications (MNCAPPS), 2012 International Conference, p.60,63, Aug. 2012.
- [AWGN] Additive White Gaussian Noise Channel : AWGN, *VSS System Block Catalog*, https://awrcorp.com/download/faq/english/docs/VSS_System_Blocks/awgn.htm, NI AWR Design Environment 11, Visual System Simulator System Block Catalog. Page web consultée le 18 Juin 2014.
- [Besb 13] Besbes, H. ; Smart, G. ; Buranapanichkit, D. ; Kloukinas, C. ; Andreopoulos, Y., *Analytic Conditions for Energy Neutrality in Uniformly-Formed Wireless Sensor Networks*. IEEE Transactions, vol.12, Wireless Communications, no.10, p.4916-4931, Oct. 2013.
- [Bour 12] Abderrahim BOUROUIS ; Mohamed FEHAM and Abdelhamid BOUCHACHIA, *A New Architecture of a Ubiquitous Health Monitoring System : A Prototype of Cloud Mobile Health Monitoring System* . IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 9, Issue 2, p.434-438, Mar. 2012.
- [Butu 10] Butun, I. ; Cagatay Talay, A. ; Altılar, D.T. ; Khalid, Murad ; Sankar, Ravi, *Impact of mobility prediction on the performance of Cognitive Radio networks*. Wireless Telecommunications Symposium (WTS), 2010, p.1-5, Apr. 2010.
- [Chav 11] Chavez-Santiago, R. ; Balasingham, I., *Cognitive radio for medical wireless body area networks* ; 2011 IEEE 16th International Workshop, Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), p.148-152, Jun. 2011.

- [Chav 12] Chavez-Santiago, R. ; Nolan, K.E. ; Holland, O. ; De Nardis, L. ; Ferro, J.M. ; Barroca, N. ; Borges, L.M. ; Velez, F.J. ; Goncalves, V. ; Balasingham, I., *Cognitive radio for medical body area networks using ultra wideband*. IEEE Wireless Communications, vol.19, no.4, p.74-81, Aug. 2012.
- [Chav 13] Chavez-Santiago, R. ; Mateska, A. ; Chomu, K. ; Gavrilovska, L. ; Balasingham, I., *Applications of software-defined radio (SDR) technology in hospital environments*. 35th Annual International Conference of the IEEE, Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), p.1266-1269, Jul. 2013.
- [Chav 14] Chavez-Santiago, R. ; Jankunas, D. ; Fomin, V.V. ; Balasingham, I., *Dual-band cognitive radio for wearable sensors in hospitals* ; 8th International Symposium, Medical Information and Communication Technology (ISMICT), p.1-5, Apr. 2014.
- [Chih 10] Chih-Shun Hsu ; Yuh-Shyan Chen ; Chih-En He, *An efficient dynamic adjusting MAC protocol for multichannel cognitive wireless networks*. IEEE International Conference, Wireless Communications, Networking and Information Security (WCNIS), p.556-560, Jun. 2010.
- [Chou 07] Chou, T.-N., *A novel prediction model for credit card risk management*. Second International Conference on, In Innovative Computing, Information and Control, ICICIC, p.211, 2007.
- [Chou 12] Chouhan, S. ; Balakrishnan, M. ; Bose, R., *System-Level Design Space Exploration Methodology for Energy-Efficient Sensor Node Configurations : An Experimental Validation*. IEEE Transactions, Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, vol.31, no.4, p.586-596, Apr. 2012.
- [Chun 07] Chunhua Sun ; Wei Zhang ; Ben, K., *Cluster-Based Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Systems*, IEEE International Conference on , Communications, ICC, pp.2511,2515, 24-28 June 2007.
- [CHRO 12] CHRONIOUS project, Funded by the *European Commission's*, under the 7th Framework Programme (Personal Health Systems), Project's website : <http://www.chronious.eu/>, February 2008 - Mai 2012. Page web consultée le 14 Mai 2014.
- [Chun 13] Chungang Yang ; Jiandong Li ; Min Sheng ; Hongyan Li ; Qin Liu ; Chao Xu, *Hierarchical Power Control in Cognitive Networks*. IEEE 77th, Vehicular Technology Conference (VTC Spring), p.1-5, Jun. 2013.
- [Corn 10] Antoine Cornuéjols, Laurent Miclet, Yves Kodratoff, Tom Mitchell, *Apprentissage artificiel : Concepts et algorithmes*. Eyrolles ; Édition : 2ème édition, 3 juin 2010, 803 pages.
- [DARPA] Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), *neXt Generation Communications Program*. <http://www.darpa.mil/default.aspx>, program funded by the Department of Defense's (DoD), Projet débuté vers les années 2000 ; Page web consultée le 29 Mai 2014.
- [DATA 13] Guide réalisé avec l'appui de la Direction Générale de l'Offre de Soins, l'Agence Nationale de l'Amélioration de la Performance (ANAP) et l'Agence des Systèmes d'Informations Partagés de santé (ASIP), *guide méthodologique pour l'expression des besoins en infrastructures à haut et très haut débit pour le déploiement des projets de télémédecine*. <http://www.datar.gouv.fr/> Guide des bonnes pratiques - Télémédecine - DATAR 2013.
- [DECR] Décret n° 2010-1229 du 19 octobre 2010 relatif à la télémédecine en France, *Rapport de la ministre de la santé et des sports*, <http://www.legifrance.gouv.>

- fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000022932449&dateTexte=&categorieLien=id, Page web consultée le 12 Mai 2014.
- [Demo] Projet ANR LiCoRNe, *Démonstration finale*, <http://www.youtube.com/watch?v=1XLf661nWVo>, Lien de la vidéo de démonstration consulté le 10 Juillet 2014.
- [DeNa 10] De Nardis, L. ; Guirao, M.-D.P., *Mobility-aware design of cognitive radio networks : Challenges and opportunities*. International Conference, Cognitive Radio Oriented Wireless Networks & Communications (CROWNCOM), 2010 Proceedings of the Fifth p.1-5, Jun. 2010.
- [Dimi 10] Dimitrakopoulos, G. ; Logothetis, M. ; Demestichas, P., *Performance Evaluation of Cognitive Management Functionality for Emergency Healthcare Applications*. Telecommunications (AICT), 2010 Sixth Advanced International Conference, p.445-451, May 2010.
- [Doer 08] Doerr, C. ; Sicker, D.C. ; Grunwald, D., *Dynamic Control Channel Assignment in Cognitive Radio Networks Using Swarm Intelligence*. IEEE GLOBECOM, Global Telecommunications Conference, p.1-6, Dec. 2008.
- [Doun 06] Dounis, A. I., D. Tseles, G. Nikolaou, et G. P. Syrcos, *A comparison of grey model and fuzzy predictive model for times series*. In International Journal of computational Intelligence, p.176-181, 2006.
- [EC 11] European Commission, *Public Health, Directive 2011/24/EU, Article 14*. <http://ec.europa.eu/health/ehealth/policy> Jul, 2011 : Page web consultée le 22 Avril 2014.
- [ECMA-368] Standard ECMA-368 standard, *High Rate Ultra Wideband PHY and MAC Standard*. <http://www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-368.htm>, 3rd edition (December 2008). Page web consultée le 18 Juin 2014.
- [Ekra 09] Ekram H., Dusit N., *Dynamic spectrum access and management, Cognitive Radio Networks*. Cambridge University Press, 2009.
- [Feng 10] Feng Jingling ; Liu Wei ; Li Yang, *Performance Enhancement of Wireless Body Area Network System Combined with Cognitive Radio*. 2010 International Conference, Communications and Mobile Computing (CMC), vol.3, p.313-317, Apr. 2010.
- [FuWa 10] Fu-Kang Wang ; Chien-Jung Li ; Chieh-Hsun Hsiao ; Tzyy-Sheng Horng ; Jenshan Lin ; Kang-Chun Peng ; Je-Kuan Jau ; Jian-Yu Li ; Cheng-Chung Chen, *An injection-locked detector for concurrent spectrum and vital sign sensing*. 2010 IEEE MTT-S International, Microwave Symposium Digest (MTT), p.768-771, May 2010.
- [Gavr 14] Gavrilovska, L. ; Denkovski, D. ; Rakovic, V. ; Angjelichinoski, M., *Medium Access Control Protocols in Cognitive Radio Networks : Overview and General Classification*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol.PP, no.99, p.1-1, May 2014.
- [gnuradio] GNU Radio, the free & open software radio ecosystem, *GNU Radio is licensed under the GNU General Public License (GPL) version 3*, <http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki>, Page web consultée le 05 Juillet 2014.
- [Gorc 08] Gorcin, A. ; Arslan, H., *Public Safety and Emergency Case Communications : Opportunities from the Aspect of Cognitive Radio*. 3rd IEEE Symposium, New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN, p.1-10, Oct. 2008.
- [GT_{norme}] IEEE 802.22 Working Group on Wireless Regional Area Networks, *Recipient of the IEEE SA Emerging Technology Award, Enabling Broadband Wireless Access Using Cogni-*

- tive Radio Technology and Spectrum Sharing in White Spaces , Working Group website : <http://www.ieee802.org/22/>. Page web consultée le 4 juin 2014.
- [HaiM 12] Hai-Miao Hu ; Bo Li ; Weiyao Lin ; Wei Li ; Ming-Ting Sun, *Region-Based Rate Control for H.264/AVC for Low Bit-Rate Applications*. IEEE Transactions, Circuits and Systems for Video Technology, vol.22, no.11, p.1564-1576, Nov. 2012.
- [Hata 06] Hatami, A ; Pahlavan, K. ; Heidari, M. ; Akgul, F., *On RSS and TOA based indoor geolocation - a comparative performance evaluation*. WCNC, IEEE Wireless Communications and Networking Conference, vol.4, p.2267-2272, Apr. 2006.
- [Hena 11] Henan Zhao ; Liusheng Huang ; Yindong Zhang ; Hongli Xu, *A Stable Joint Routing and Spectrum Scheduling Scheme for Cognitive Radio Ad Hoc Networks*. Seventh International Conference, Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN), p.323-329, Dec. 2011.
- [Hoan 12] Hoang Duc Chinh ; Panda, S.K., *Real-time power configuration for energy conservation in wireless sensor networks*. 2012 IEEE International Conference, Communication Systems (ICCS), p.152-156, Nov. 2012.
- [HTA 06] Dr. Karen Facey, *Global Networking for Effective Healthcare*, <http://inahta.episerverhotell.net/Glossary>, Jul, 2006 (first compiled) : Page web consultée le 22 Avril 2014.
- [Hsie 08] Hsien-Po Shiang ; van der Schaar, M., *Dynamic channel selection for multi-user video streaming over cognitive radio networks*. 15th IEEE Intern. Conference, Image Processing, ICIP, 2008.
- [HsuK 06] Hsu, K.-T., T.-M. Yan, et P.-W. Liu, *A study on the annualized medical expense prediction model of the bureau of national healthy insurance-the application of the grey prediction theory*. IEEE International Conference on, In Systems, Man and Cybernetics, SMC, Volume 1, p.764-769, 2006.
- [Htik 12] Htike, Z. ; Jun Lee ; Choong-seon Hong, *A MAC protocol for cognitive radio networks with reliable control channels assignment*. 2012 International Conference, Information Networking (ICOIN), p.81-85, Feb. 2012.
- [Huan 97] Huang, Y.-P. et T.-M. Yu, *The hybrid grey-based models for temperature prediction*. IEEE Transactions on 27(2) Systems, Man, and Cybernetics, Part B : Cybernetics, p. 284-292, 1997.
- [HuaR 09] Hua, Z. et R. Ruo-en, *High-frequency time series prediction based on wavelet transform and arma model*. International Conference on, Management and Service Science, MASS, p. 1-4, 2009.
- [Jian 01] Jian-suo zhou ; Zhi-Yuan Liu ; Run Pei, *A new nonlinear model predictive control scheme for discrete-time system based on sliding mode control*. American Control Conference, 2001.
- [Jiec 10] Jiechao, W. et Z. Yidan, *Peers' attribute data prediction in a p2p network based on the grey prediction model and its improvements*. International Conference on, In Information Networking and Automation (ICINA) Volume 2, p.V2-15-V2-19, 2010.
- [Jing 11] Jingfang Huang ; Zhaoyang Zhang ; Honggang Wang ; Hong Liu, *Video transmission over Cognitive Radio networks* IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), 2011.
- [Julo 02] Julog, D., *The basis of grey theory*. Huazhong University of Science and Technology Press, In Chinese, 2002.

- [Junc 12] Junchao Han ; Jing Liu ; Hui Yu ; Chen Chen ; Zhichun Shen, *HCVP : A Hybrid Cognitive Validation Platform for WBAN*. International Conference, Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), p.1-6, Oct. 2012.
- [Kaiw 12] Kaiwang Lu ; Liangjun Zhang ; Jie Yang, *An efficient SIR-first adaptive power control method in cognitive radio network*. IEEE Global High Tech Congress on Electronics (GHTCE), p.91-94, Nov. 2012.
- [Khay 13] Khayami, H. ; Ghassemi, M. ; Ardekani, K. ; Maham, B. ; Saad, W., *Cognitive radio ad hoc networks for smart grid communications : A disaster management approach*. 2013 IEEE/CIC International Conference, Communications in China (ICCC), p.716-721, Aug. 2013.
- [KimH 08] In-Hwan Kim ; Hoo-Jong Kim ; Jong-Tae Ihm ; Gu-Min Jeong ; Ki-Dong Chung, *WPAN Platform Architecture and Application Design for Handset*. International Conference, Consumer Electronics ICCE, Digest of Technical Papers, p.1-2, Jan. 2008.
- [LICO 14] projet LICoRNe, *RESEAUX DU FUTUR ET SERVICES* , [http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/?tx_lwmsuivibilan_pi2\[CODE\]=ANR-10-VERS-0005](http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/?tx_lwmsuivibilan_pi2[CODE]=ANR-10-VERS-0005), Financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), débuté en 2010, terminé en 2014, page du projet consultée le 28 Mai 2014.
- [LiuR 10] Liu, Y., B. Tamma, B. Manoj, et R. Rao, *On cognitive network channel selection and the impact on transport layer performance*. GLOBECOM, IEEE Global Telecommunications Conference, p.1-5, 2010.
- [Lope 13] Lopez, J.P. ; Jimenez, D. ; Cerezo, A. ; Menendez, J.M., *No-reference algorithms for video quality assessment based on artifact evaluation in MPEG-2 and H.264 encoding standards* ; IFIP/IEEE International Symposium, 2013.
- [Mamo 14] Mamoon, Ishtiaq Al ; Islam, A.K.M.Muzahidul ; Baharun, Sabariah ; Wakabayashi, Toshio ; Komaki, Shozo, *A priority aware cognitive radio based hospital system architecture, priority management and communication protocols*. 2014 8th International Symposium, Medical Information and Communication Technology (ISMICT), p.1-5, Apr. 2014.
- [Mann 12] Manna, T. ; Misra, I.S., *Game theoretic spectrum sharing for cognitive radios*. 2012 International Conference, Communications, Devices and Intelligent Systems (CODIS), p.33-36, Dec. 2012.
- [Mast 12] Mastorakis, G. ; Bourdena, A. ; Kormentzas, G. ; Pallis, E., *Spectrum aware routing in ad-hoc cognitive radio networks*. Future Network & Mobile Summit (FutureNetw), p.1-9, Jul. 2012.
- [McGr 13] McGregor, C., *Wearable monitors on babies : Big data saving little people*. 2013 IEEE International Symposium, Technology and Society (ISTAS), p.203-203, Jun. 2013.
- [Miho 11] Mihov, Y.Y. ; Tsankov, B.P., *QoS provisioning via channel reservation in cognitive radio networks*. 2011 IEEE International Conference, Microwaves Communications, Antennas and Electronics Systems (COMCAS), p.1-6, 2011.
- [Ming 07] Mingjing Ai ; Dairui Cui ; Shaopeng Tang, *Network Adaptable Transmission Strategy Applied to H.264* . 2nd Workshop, Digital Media and its Application in Museum and Heritages, 2007.
- [Ming 10] Ming Diao ; Pei Liu ; Chengxin Xu, *Research on forward error correction algorithm in IP-based DVB*. 2010 2nd IEEE International Conference, Network Infrastructure and Digital Content, p.388-392, Sept. 2010.

- [Ming 11] Mingyi Hong ; Garcia, A., *Equilibrium Pricing of Interference in Cognitive Radio Networks*. IEEE Transactions, Signal Processing, vol.59, no.12, p.6058-6072, Dec. 2011
- [MiRy 12] Mi-Ryeong Kim ; Sang-Jo Yoo, *Distributed coordination protocol for ad hoc cognitive radio networks*. Journal of Communications and Networks, vol.14, no.1, p.51-62, Feb. 2012.
- [Mito 99] J. Mitola III and G. Q. Maguire, *Cognitive radio : making software radios more personal*. IEEE Personal Communications, p.13-18, 1999.
- [Mito 06] J. Mitola III, *Cognitive Radio Architecture : The Engineering Foundations of Radio XML*. John Wiley and Sons, Inc, Hoboken, New Jersey 2006, 135 pages.
- [Moha 10] Mohammadian, H.S. ; Abolhassani, B., *Spectrum sharing among multiple secondary users in cognitive radio networks*. 4th International Conference, Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS), p.1-5, Dec. 2010.
- [Muba 10] Mubashir Husain Rehmani, Aline Carneiro Viana, Hicham Khalife, Serge Fdida, *A Cognitive Radio Based Internet Access Framework for Disaster Response Network Deployment*. Rapport de recherche n° 7285, inria-00482593, version 1, May 2010, 16 pages.
- [Mukh 12] Mukherjee, A. ; Pal, A. ; Misra, P., *Data Analytics in Ubiquitous Sensor-Based Health Information Systems*. 2012 6th International Conference, Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies (NGMAST), p.193-198, Sept. 2012.
- [Nama 13] Namanya, A.P. ; Pagna-Disso, J., *Performance modelling and analysis of the delay aware routing metric in Cognitive Radio Ad Hoc networks*. 6th Joint IFIP, Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC), p.1-8, Apr. 2013.
- [Nath 14] Nathani, N. ; Manna, G.C. ; Mule, S.B., *An empirical assessment of Quasi-permanently vacant channels in mobile communication bands for cognitive radio*. 16th International Conference, Advanced Communication Technology (ICACT), p.389-394, Feb. 2014.
- [Nazi 11] Nazir, M. ; Sabah, A., *Cooperative cognitive WBAN : From game theory to population dynamism*. 2011 3rd International Congress, Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), p.1-6, Oct. 2011.
- [NETC 11] NETworked multisensor system for elderly people : healthCARE, safety and securITY, Netcarity Project, supported by the *European Community*, under the Sixth Framework Programme Project's website : <http://www.netcarity.org/>, February 2007 - October 2011. Page web consultée le 13 Mai 2014.
- [NomoTechn] NOMOTECH est une entreprise implanté dans de nombreuses régions en Europe et en Afrique, *spécialisé depuis 2003 dans l'aménagement numérique des territoires, le déploiement de réseaux hertziens*, <http://www.nomotech.com/>, Page web consultée le 10 Juillet 2014.
- [Octave] Octave is distributed under the terms of the GNU General Public License, *GNU Octave*, <http://www.gnu.org/software/octave/>, Page web consultée le 21 Juillet 2014.
- [OMNeT] OMNeT++ is an extensible, modular, component-based C++ simulation library and framework, primarily for building network simulators, <http://www.omnetpp.org/>. Page web consultée le 29 Juillet 2014.
- [OMS 12] Organisation Mondiale de la Santé (OMS), *Vieillesse et qualité de la vie* , <http://www.who.int/ageing/fr/>, Bulletin de l'OMS, Mars 2012 : Page web consultée le 22 Avril 2014.

- [Onem 13] Onem, E. ; Eryigit, S. ; Tugcu, T. ; Akurgal, A., *QoS-Enabled Spectrum-Aware Routing for Disaster Relief and Tactical Operations over Cognitive Radio Ad Hoc Networks*; IEEE Military Communications Conference, MILCOM, p.1109-1115, Nov. 2013.
- [Pand 14] Pandey, Shweta ; Tokekar, Vrinda, *Prominence of MapReduce in Big Data Processing*. 2014 Fourth International Conference, Communication Systems and Network Technologies (CSNT), p.555-560, Apr. 2014.
- [Phun 10] Phunchongharn, P. ; Hossain, E. ; Niyato, D. ; Camorlinga, S., *A cognitive radio system for e-health applications in a hospital environment*. Wireless Communications, IEEE , vol.17, no.1, p.20-28, Feb. 2010.
- [PoKa 12] Po-Kai Tseng ; Huan Chen ; Wei-Ho Chung, *Joint design on energy efficiency and throughput for non-infrastructure based cognitive radio networks*. 8th International, Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), p.642-647, Aug. 2012.
- [Qian 13] Qiang Shen ; Jing Liu ; Hui Yu ; Zhichao Ma ; Ming Li ; Zhichun Shen ; Chen Chen, *Adaptive Cognitive Enhanced Platform for WBAN*. 2013 IEEE/CIC International Conference on, Communications in China (ICCC), p.739-744, Aug. 2013.
- [REAC 14] Remote Accessibility to Diabetes Management and Therapy in Operational health-care Networks, REACTION project, Funded by the *European Commission's*, under the 7th Framework Programme (Personal Health Systems), Project's website : <http://www.reaction-project.eu/>, March 2010 - February 2014. Page web consultée le 14 Mai 2014.
- [Rebe 13] Rebeiz, E. ; Urriza, P. ; Cabric, D., *Optimizing Wideband Cyclostationary Spectrum Sensing Under Receiver Impairments*. IEEE Transactions on, Signal Processing, vol.61, no.15, p.3931-3943, 2013.
- [Rida 13] Rida Laraki , Jérôme Renault, Sylvain Sorin, *Bases Mathématiques de la théorie des jeux*. Les Éditions de l'École polytechnique ; Édition 2013, 186 pages.
- [Rong 11] Rong-Rong Chen ; Koon Hoo Teo ; Farhang-Boroujeny, B., Random Access Protocols for Collaborative Spectrum Sensing in Multi-Band Cognitive Radio Networks, IEEE Journal of, Selected Topics in Signal Processing, vol.5, no.1, pp.124,136, Feb. 2011.
- [SAAP 14] Secure Active Ageing : Participation and Health for the Old, SAAPHO project, Funded by the *European Commission's*, under the 7th Framework Programme (Ambient Assisted Living), Project's website : <http://www.saapho-aal.eu/>, July 2011 - June 2014. Page web consultée le 14 Mai 2014.
- [Shan 10] Shan Feng ; Zhongliang Liang ; Dongmei Zhao, *Providing telemedicine services in an infrastructure-based cognitive radio network*. IEEE Wireless Communications, vol.17, no.1, p.96-103, Feb. 2010.
- [Shen 11] Sheng, C., Y. Lin, Z. Gengwu, Z. Cheng, D. Shijun, et D. Chao , *Short-term wind power prediction based on combined grey-markov model*. International Conference on, In Advanced Power System Automation and Protection (APAP), Volume 3, p.1705-1711, 2011.
- [Shum 04] Shumakher, E. ; Eisenstein, G., *On the noise properties of injection-locked oscillators*. IEEE Transactions on, Microwave Theory and Techniques, vol.52, no.5, p.1523-1537, May 2004.
- [Sind 14] Sinda Boussen, Nabil Tabbane, Francine Krief, Sami Tabbane, "A context aware vertical handover decision approach based on fuzzy logic", The fourth International Conference on Communications and Networking (ComNet), Hammamet, Tunisia. March, 19-22 2014.

- [Siri 06] Siriwongpairat, W.P. ; Su, W. ; Olfat, M. ; Liu, K.J.R., *Multiband-OFDM MIMO coding framework for UWB communication systems*. IEEE Transactions, Signal Processing, vol.54, no.1, p.214-224, Jan. 2006.
- [STRO 14] StrokeBack project, Funded by the *European Commission's*, under the 7th Framework Programme (Personal Health Systems), Project's website : <http://www.strokeback.eu/>, October 2011 - September 2014. Page web consultée le 14 Mai 2014.
- [Syed 13] Syed, A.R. ; Yau, K.-L.A., *On Cognitive Radio-based Wireless Body Area Networks for medical applications*. 2013 IEEE Symposium, Computational Intelligence in Healthcare and e-health (CICARE), p.51-57, Apr. 2013.
- [Thales] Thales Communications & Security est une société créée par le groupe Thales le 1er juillet 2011, *spécialisée dans les produits et systèmes d'information et de communication sécurisés*, <https://www.thalesgroup.com/fr>, Page web consultée le 10 Juillet 2014.
- [Thili 13] Thilina, K.M. ; Kae Won Choi ; Saquib, N. ; Hossain, E., *Machine Learning Techniques for Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.31, no.11, p.2209-2221, Nov. 2013.
- [Tian 11] Tianyi Qin ; Danfeng Jin ; Guoxin Zheng ; Jiahui Wang, *A novel Doppler Effect testing approach for highspeed railway wireless communication systems*. 2011 International Conference, Electronics, Communications and Control (ICECC), p.657-660, Sept. 2011.
- [Trip 13] Tripathi, P.S.M. ; Prasad, R., *Energy efficiency in cognitive radio network*. 2013 3rd International Conference, Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace and Electronic Systems (VITAE), p.1-5, Jun. 2013.
- [Univ 10] Università degli Studi di Bologna, DEIS - LIA, *Mobility and Handover Prediction mechanism : a performance comparison exploiting several filters*. <http://lia.deis.unibo.it/research/SOMA/MobilityPrediction/filters.shtml> ; Mobility Prediction Project, page web consultée le 25 Juillet 2014.
- [USRP] Ettus Research™, a National Instruments (NI) company since 2010, *The world's leading supplier of software defined radio platforms*, <http://home.ettus.com/about> ; www.ettus.com/product/details/WBX, Page web consultée le 05 Juillet 2014.
- [VanW 12] Van Moer, W. ; Bjorsell, N. ; Hamid, M. ; Barbe, K. ; Nader, C., *Saving lives by integrating cognitive radios into ambulances*. IEEE International Symposium, Medical Measurements and Applications Proceedings (MeMeA), p.1-4, May 2012.
- [VITAL 10] Vital Assistance For The Elderly, A Project Co-financed by the *European Commission DG Information Society and Media*, Project's website : <http://www.ist-vital.org/>, January 2007 - September 2010. Page web consulté le 13 Mai 2014.
- [Wang 08] Wang Lu-jia ; Wang Jin-kuan ; Wang Yun ; Liu Xiao, *Location estimation of mobile user in wireless sensor network based on Unscented Kalman Filter*. ICMMT International Conference, Microwave and Millimeter Wave Technology, vol.1, p.96-99, Apr. 2008.
- [WeiQ 10] Wei Ren ; Qing Zhao ; Swami, A., *On the Connectivity and Multihop Delay of Ad Hoc Cognitive Radio Networks*. IEEE International Conference, Communications (ICC), p.1-6, May 2010.
- [WuYu 10] Wu, C. ; Yu, Q. ; Yi, K., *Least-squares support vector machine-based learning and decision making in cognitive radios*. Communications, IET, vol.6, no.17, p.2855-2863, Nov. 2012.

- [YeXu 10] Ye, X., *The application of arima model in chinese mobile user prediction*. IEEE International Conference on, Granular Computing (GrC), p.586-591, 2010.
- [Yuan 12] Yuan Gao; Xin Liu; Yuanjin Zheng; Shengxi Diao; Weida Toh; Yisheng Wang; Bin Zhao; Minkyu Je; Chun-Huat Heng, *A low power interference robust IR-UWB transceiver SoC for WBAN applications*. 2012 IEEE International Symposium, Radio-Frequency Integration Technology (RFIT), p.153-155, Nov. 2012.
- [YuZh 09] Yu, J., L. Zhi, Y. Qiu, L. Jin, et H. Du, *Grey synthetical prediction model of military logistics based on evolutionary neural network*. International Joint Conference on, In Computational Sciences and Optimization, CSO, Volume 1, p.663-665, 2009.
- [Zhan 12] Zhang Ju; Wan Senlin, *A review of explicit model predictive control*. 31st Chinese Control Conference (CCC), Jul. 2012.
- [Zhih 13] Zhihui Shu; Yi Qian; Song Ci, *On physical layer security for cognitive radio networks*. IEEE Network, vol.27, no.3, p.28-33, doi : 10.1109/MNET.2013.6523805; May-Jun. 2013.
- [Ziqi 11] Dong, Ziqian and Sengupta, Shamik and Anand, S. and Hong, Kai and Chandramouli, Rajarathnam and Subbalakshmi, K.P., *Cognitive Radio Mobile Ad Hoc Networks in Healthcare*. Springer, Cognitive Radio Mobile Ad Hoc Networks, New York 2011.